



**HAL**  
open science

## Quels VEGétaux et systèmes de production durables pour satisfaire les besoins en bioénergies, synthons et matériaux biosourcés ?

Paul Colonna, Xavier Montagne, Agnès Kammoun, Christian Sales, Patricia Lefer

### ► To cite this version:

Paul Colonna, Xavier Montagne, Agnès Kammoun, Christian Sales, Patricia Lefer. Quels VEGétaux et systèmes de production durables pour satisfaire les besoins en bioénergies, synthons et matériaux biosourcés ?. Inra. 2013, 409 p. hal-04390666

**HAL Id: hal-04390666**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04390666>**

Submitted on 12 Jan 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## **Atelier de Réflexion Prospective VegA**

**Quels VEGétaux et systèmes de  
production durables pour satisfaire les  
besoins en bioénergies, synthons et  
matériaux biosourcés ?**

**Synthèse Générale**

## Editeurs

**Attention chacun doit avoir validé le document**

### **Paul COLONNA**

Directeur Scientifique Adjoint Alimentation et Bioéconomie  
INRA, UAR 0233 CODIR Collège de Direction  
147 rue de l'Université, 75338 Paris cedex 07

### **Agnès KAMMOUN**

INRA  
Rue de la Géraudière  
BP 71627, 44316 Nantes cedex 03

### **Xavier MONTAGNE**

IFPEN  
Direction scientifique  
1 et 4 avenue du Bois Préau - BP 311  
92852 Rueil-Malmaison Cedex, France

### **Christian SALES**

CIRAD  
Avenue Agropolis, 34398 Montpellier Cedex 5

Avec la contribution de Patricia Lefer pour la mise en page de ce document.

## **Pour citer ce document**

COLONNA P., KAMMOUN A., MONTAGNE X., SALES C. (Editeurs). 2013 .  
*Quels VEGétaux et systèmes de production durAbles pour satisfaire les besoins en  
bioénergie, synthons et matériaux biosourcés ?*  
Rapport CIRAD – IFPEN – INRA (France), ?? p. N° ISBN ??

Le rapport est disponible en ligne sur le site de l'INRA :

<http://www.inra.fr/???>

sur le site de l'IFPen  
???

sur le site du CIRAD  
???

# SOMMAIRE

<b>Introduction</b>	<b>9</b>
<b>Contributeurs</b>	<b>9</b>
<b>1. Résumé</b>	<b>12</b>
<b>2. Objectifs</b>	<b>13</b>
<b>3. Expression des besoins</b>	<b>19</b>
<b>3.1. Attentes et besoins en énergie, synthons et en matériaux biosourcés</b>	<b>19</b>
3.1.1. Energies	20
3.1.1.1. Combustibles	21
3.1.1.2. Biocarburants	23
3.1.1.2.1. Transformation en gaz de synthèse	23
3.1.1.2.2. Le traitement du gaz de synthèse	24
3.1.2. Chimie et synthons	27
3.1.3. Matériaux	30
3.1.3.1. Les polymères	31
3.1.3.2. Le bois et ses dérivés	34
3.1.4. Solvants	36
3.1.5. Tensioactifs	37
3.1.6. Lubrifiants	39
3.1.7. Besoins globaux	41
<b>3.2. Principales familles biochimiques répondant à ces besoins</b>	<b>42</b>
3.2.1. Améliorer la processabilité de la biomasse	45
3.2.2. Approche structurale	46
3.2.2.1. Aptitude à la déconstruction	47
3.2.2.2. Hétérogénéité et variabilité	48
3.2.3. Approche par correspondance fonctionnelle	48
3.2.3.1. Les lignocelluloses	48
3.2.3.2. L'amidon	54
3.2.3.3. Les lipides	56
3.2.3.4. Les protéines	59
3.2.3.5. Oses et oligosaccharides	62
3.2.3.6. Le caoutchouc	64
3.2.3.7. Les métabolites secondaires ou microconstituants	65
3.2.4. Place des biotechnologies blanches	70
3.2.4.1. Génie enzymatique	71
3.2.4.2. Les bioconversions	73
3.2.4.2.1. Approche rationnelle du génie métabolique	75
3.2.4.2.2. Approche combinatoire : génie métabolique inverse	77
3.2.5. Production d'hydrogène	79
<b>3.3. Conclusions</b>	<b>81</b>
<b>4. Exploration de la diversité des solutions végétales</b>	<b>81</b>
<b>4.1. Identification des végétaux où ces structures sont présentes</b>	<b>82</b>
4.1.1. Considérations générales	82

4.1.2. Spécificités qualitatives	83
4.1.2.1. Particularités des sources de lignocelluloses	83
4.1.2.2. Particularités des sources de lipides	84
4.1.2.3. Particularités des ressources algales	86
4.1.2.4. Identification des solutions végétales	88
<b>4.2. Optimisation des espèces déjà exploitées</b>	<b>88</b>
4.2.1. Considérations générales	88
4.2.2. Les céréales	91
4.2.3. Les oléagineux	96
4.2.4. La sylviculture	105
4.2.5. Légumineuses protéagineuses et fourragères	107
4.2.6. Tubercules et racines	110
4.2.7. Plantes à fibres	111
<b>4.3. Utilisation d'espèces végétales encore inexploitées</b>	<b>112</b>
4.3.1. Les algues marines	112
4.3.1.1. Macroalgues marines	115
4.3.1.1.1. Phéophycées (algues brunes)	116
4.3.1.1.2. Algues rouges ( <i>Rhodoplantae</i> )	118
4.3.1.1.3. Algues vertes	120
4.3.1.2. Microalgues marines	123
4.3.1.2.1. Les algues vertes	126
4.3.1.2.2. Les haptophytes	128
4.3.1.3. Les dinoflagellés	129
4.3.1.4. Les diatomées	129
4.3.1.5. <i>Rhodoplantae</i>	131
4.3.1.6. Cyanobactéries	131
4.3.1.7. Phanérogames marines (plantes à fleurs)	133
4.3.2. Plantes	134
4.3.2.1. <i>Jatropha curcas</i> L.	135
4.3.2.2. Jojoba ( <i>Simmondsia chinensis</i> )	139
4.3.2.3. Genre <i>Cuphea</i>	139
4.3.2.4. Crambe ( <i>Crambe abyssinica</i> )	140
4.3.2.5. Le Miscanthus et le switchgrass ( <i>Panicum virgatum</i> )	142
4.3.2.6. Remplacement de l'hévéa	146
4.3.3. Phytoremédiation : les phytotechnologies	148
4.3.3.1. Phytoremédiation des contaminants organiques	148
4.3.3.2. Phytoremédiation des contaminants métalliques : phytostabilisation et phytoextraction	149
<b>4.4. Stratégies d'amélioration génétique</b>	<b>153</b>
4.4.1. Questions spécifiques au métabolisme primaire	156
4.4.1.1. Plantes améliorées pour la production de biopolymères	156
4.4.1.1.1. L'amidon	156
4.4.1.1.2. Les protéines	157
4.4.1.1.3. Les parois végétales	159
4.4.1.2. Plantes améliorées pour la production de lipides	164
4.4.1.2.1. Cible biocarburants	164
4.4.1.2.2. Cible acides gras exotiques	165
4.4.3. Questions spécifiques au métabolisme secondaire	169
4.4.4. Questions spécifiques aux aptitudes technologiques	170
4.4.5. Questions spécifiques au développement de nouvelles fonctionnalités	170
4.4.5.1. Production de polymères hétérologues	170
4.4.5.2. Production d'énergie lumineuse	171
4.4.6. Résolution de questions génériques	172

4.4.7. La transgénèse comme stratégie pour accélérer la domestication des espèces sauvages	174
4.4.8. La transgénèse comme stratégie pour autoriser ou accélérer l'acclimatation d'espèces tropicales	175
4.4.9. Conclusions	177
<b>5. Conception, évaluation et mise en perspective de systèmes de production durables</b>	<b>178</b>
<b>5.1. Etat des lieux des systèmes considérés et des connaissances associées</b>	<b>179</b>
5.1.1. Utilisation/développement de systèmes de productions d'algues	180
5.1.1.1. Etat de l'art des spécificités de la filière	180
5.1.2. Mobilisation de biomasse à partir de forêts naturelles	184
5.1.2.1. Premier axe : connaissances et méthodes pour évaluer des systèmes de culture durables	184
5.1.2.2. Second axe : connaissances et méthodes pour raisonner le positionnement des cultures dans les exploitations et les territoires	186
5.1.3. Taillis à courte rotation	187
5.1.4. Miscanthus/Switchgrass	192
5.1.4.1. Etat de l'art	192
5.1.5. Le jatropha	199
5.1.5.1. Etat de l'art	199
5.1.6. La canne-énergie	203
5.1.7. La luzerne	205
5.1.7.1. Etat de l'art	205
5.1.8. Le triticales	211
5.1.9. Le sorgho	216
5.1.9.1. Etat de l'art	216
5.1.10. Exemple de culture énergétique annuelle : le colza	220
5.1.10.1. Etat de l'art	20
5.1.11. Association légumineuses et céréales	232
<b>5.2. Questions transversales</b>	<b>236</b>
5.2.1. Conception et évaluation des systèmes de production	236
5.2.2. Cultures énergétiques, territoires et biodiversité	238
5.2.3. Domestication <i>versus</i> OGM	240
<b>5.3. Pistes de recherche</b>	<b>240</b>
5.3.1. Quelles connaissances et méthodes sont nécessaires pour concevoir et évaluer des systèmes de culture durables et adaptés aux conditions locales de production en intégrant de multiples exigences à différentes échelles temporelles ?	241
5.3.1.1. Adéquation entre cultures de biomasse et conditions de milieu	241
5.3.1.2. Changements d'usages des parcelles et des cultures	242
5.3.1.3. Amélioration de l'efficacité d'utilisation des ressources naturelles (eau, sols, énergie lumineuse) et des intrants externes fossiles	243
5.3.1.4. Evaluation de la durabilité des systèmes de culture	244
5.3.2. Quelles connaissances et méthodes pour raisonner le positionnement des cultures dans les exploitations et les territoires et en évaluer les impacts multiples	245
5.3.2.1. Analyse des déterminants de l'usage des terres	245
5.3.2.2. Quelles méthodes d'évaluation spatio-temporelle des modes de gestion multicritères de ces nouvelles cultures ? Quelle échelle pour une analyse pertinente du territoire ?	245
5.3.2.3. Quel potentiel dans les zones « marginales » pour les cultures à vocation non alimentaire	247
5.3.2.4. Comment raisonner le choix des espèces et génotypes à introduire dans un environnement donné vis-à-vis des ressources naturelles et flux de gènes et d'interactions biotiques (pathogènes, prédateurs, auxiliaires) et leur insertion spatiale ?	247
5.3.2.5. Quelles sont les conditions requises au niveau de l'exploitation agricole ou de la ferme aquacole et de la filière pour favoriser l'insertion de ces nouvelles cultures ?	248
<b>5.4. La bioraffinerie</b>	<b>249</b>

5.4.1. Notions générales	249
5.4.1.1. Définition et frontières de la bioraffinerie	249
5.4.1.2. Autres définitions de la bioraffinerie	250
5.4.1.3. Caractéristiques liées à la matière première biologique	251
5.4.1.4. Complexité des voies de valorisation possibles	252
5.4.2. Les opérations unitaires de la bioraffinerie et leurs contraintes	255
5.4.2.1. Généralités	255
5.4.2.2. Déconstruction / fractionnement de la biomasse	256
5.4.2.2.1. Etat de l'art – Procédé voie sèche et voie humide	257
5.4.2.2.2. Etat de l'art – Transformation en gaz de synthèse	262
5.4.2.2.3. Principaux verrous identifiés	264
5.4.2.3. Séparation et extraction des molécules d'intérêt	266
5.4.2.3.1. Etat de l'art	266
5.4.2.3.2. Principaux verrous identifiés	268
5.4.2.4. Maintien ou obtention des propriétés fonctionnelles	270
5.4.2.4.1. Etat de l'art	270
5.4.2.4.2. Principaux verrous identifiés	273
5.4.3. Production, récolte, stockage, transport des matières premières végétales – contraintes et opportunités	276
5.4.3.1. Généralités	276
5.4.3.2. Etat de l'art	276
5.4.3.2.1. Production	276
5.4.3.2.2. Aptitude de la biomasse à la bioraffinerie	277
5.4.3.2.3. Récolte, transport et stockage	278
5.4.3.2.4. Organisation de la chaîne logistique	279
5.4.3.3. Principaux verrous identifiés	281
5.4.3.3.1. Améliorer la processabilité de la biomasse	281
5.4.3.3.2. Assurer la stabilité des approvisionnements des bioraffineries	281
5.4.3.3.3. Réduire la variabilité de la biomasse	282
5.4.3.3.4. Fonder des systèmes de production-transformation durables	283
5.4.4. La gestion de la complexité	286
5.4.4.1. Complexité de la conception	286
5.4.4.1.1. Etat de l'art	286
5.4.4.1.2. Principaux verrous identifiés	288
5.4.4.2. Complexité du fonctionnement	291
5.4.4.2.1. Principaux verrous identifiés	291
5.4.5. Conclusions	293
<b>5.5. Analyses socio-économiques : des systèmes de production aux marchés internationaux</b>	<b>293</b>
5.5.1. La polyvalence économique des filières produits biosourcés : pistes de recherche	294
5.5.1.1. Eléments de problématique	295
5.5.1.2. Eléments de réflexion	296
5.5.2. Outils et méthodes	301
5.5.2.1. Eléments de problématique	301
5.5.2.2. Les conventions sur les méthodes d'évaluation, critères économiques, sociaux et éthiques : faisabilité, durabilité	301
5.5.2.3. Quantification et caractérisation de la demande en produits biosourcés et évaluation des implications	303
5.5.3. Dimension structurante de la ressource, de son mode de gestion et d'approvisionnement sur l'organisation de la filière	304
5.5.3.1. Acteurs de l'approvisionnement : quels sont les déterminants de l'adoption de nouvelles pratiques ?	304
5.5.3.2. Organisation de l'approvisionnement et articulation des temporalités	306
5.5.4. La dimension structurante des modalités du bioraffinage sur l'organisation de la filière (bassin d'approvisionnement et aménagement régional)	307
5.5.4.1. Eléments de problématique	307

5.5.4.2. Reconversion d'unités industrielles existantes (comme la filière papeterie) en bioraffineries	308
5.5.4.3. Reconversion d'unités industrielles existantes (hors produits biosourcés) en bioraffineries	309
5.5.4.4. Création d'une bioraffinerie	310
5.5.5. Quel est le rôle des acteurs dans l'émergence et le maintien des filières produits biosourcés durables et renouvelables ?	311
5.5.5.1. Eléments de problématique	311
5.5.5.2. Les « acteurs » et les interactions	311
5.5.5.3. Aménagement du territoire : dynamiques d'acceptabilité sociale et environnementale	313
5.5.5.4. Conditions d'acceptabilité des OGM pour les filières produits biosourcés	317
5.5.6. Conclusions : synthèse des pistes de recherche	325
<b>5.6. – Analyses de cycles de vie et de bilans environnementaux</b>	<b>326</b>
5.6.1. Définition des approches possibles pour l'évaluation environnementale	328
5.6.2. Disponibilité et qualité des données	329
5.6.2.1. Typologie des données disponibles	329
5.6.2.2. Calculs d'incertitudes	330
5.6.3. Amélioration des méthodes d'évaluation des impacts locaux en relation avec le milieu	332
5.6.3.1. Biodiversité	333
5.6.3.2. Acidification	334
5.6.3.3. Toxicité humaine / écotoxicité	334
5.6.3.4. Mobilisation et altération des ressources naturelles	335
5.6.3.5. Usage des sols	336
5.6.4. Amélioration de l'évaluation de l'impact des produits d'origine végétale sur le changement climatique	339
5.6.5. Prise en compte des effets dynamiques	340
5.6.5.1. Prise en compte du carbone contenu dans la biomasse / stockage et déstockage du carbone (sols, peuplements, produits du bois et leur fin de vie, recyclages)	340
5.6.5.2. Effets dynamiques sur les inventaires	340
5.6.5.3. Effets dynamiques dans les impacts	343
5.6.6. Aspects méthodologiques transverses	344
5.6.6.1. Allocation des impacts entre coproduits	344
5.6.6.2. Impacts positifs	346
5.6.6.3. Frontières des systèmes	346
5.6.6.4. Unité fonctionnelle	350
5.6.6.5. Evolution des impacts globaux	351
5.6.6.6. Evaluation multicritère	351
<b>5.7. Etude prospective sur les usages non alimentaires de la biomasse végétale : les scénarios d'évolution à 2050</b>	<b>351</b>
5.7.1. Cadre d'analyse et méthode de l'étude prospective	352
5.7.1.1. Démarche générale et cadre d'analyse	352
5.7.1.2. Eléments de méthode	352
5.7.1.3. L'illustration des scénarios par des ordres de grandeur : une confrontation des résultats de prospectives sur l'énergie et l'alimentation	353
5.7.1.4. Les hypothèses par composante	354
5.7.1.4.1. Composante 1 : ressources énergétiques et en carbone en 2050	354
5.7.1.4.2. Composante 2 : attentes des citoyens et des consommateurs vis-à-vis des produits biosourcés	357
5.7.1.4.3. Composante 3 : filières produits biosourcés et innovations	360
5.7.1.4.4. Composante 4 : gouvernance mondiale et politiques publiques	363
5.7.1.4.5. Composante 5 : croissance et développement	367
5.7.2. Les quatre scénarios d'évolution possible des usages non alimentaires de la biomasse végétale à l'horizon 2050	370
5.7.2.1. Les hypothèses par composante	370
5.7.2.2. Récit des scénarios d'évolution des usages non alimentaires de la biomasse à 2050	371
5.7.2.2.1. Scénario 1 : fuite en avant sur l'énergie et l'environnement, des usages de la biomasse limités	371
5.7.2.2.2. Scénario 2 : la biomasse dans la « néo-modernisation » verte	374



5.7.2.2.3. Scénario 3 : course à la biomasse, dans un contexte de crise énergétique	377
5.7.2.2.4. Scénario 4 : des territoires métropolitains et ruraux qui mobilisent la biomasse pour une diversité d'usages	379
5.7.3. Implication des scénarios sur l'occupation du sol	382
5.7.3.1. Objectifs et démarche	382
5.7.3.2. Principe, hypothèses et résultat des simulations	383
5.7.3.3. Interprétations	386
5.7.3.4. Quels enseignements plus spécifiques des scénarios	390
5.7.4. Conclusions	394
<b>6. Conclusions</b>	<b>397</b>
<b>7. Lexique</b>	<b>397</b>

## **ANNEXES**

**Annexe 1 : organisation de l'ARP Vega**

**Annexe 2 : les organismes coordonnateurs**

**Annexe 3 : pistes de recherche par filière analysée**

**Annexe 4 : Modalités de classification des variétés de luzerne**

**Annexe 5 : évolution des surfaces de triticales en France et principales zones de production**

**Annexe 6 : aire de production du sorgho**

**Annexe 7 : présentation du projet Sweetfuel**

**Annexe 8 : glossaire**



## Introduction

Ce document est le fruit d'un travail collectif, réalisé dans le cadre de l'Atelier de Réflexion Prospective « *Quels VEGétaux et systèmes de production durables pour satisfaire les besoins en bioénergie, synthons et matériaux biosourcés ?* »

Les participants ont rédigé 13 documents de synthèse ou livrables, correspondants aux différents groupes de travail, mis en place dans l'ARP VegA. Chaque groupe de travail a eu pour objectif de cerner l'état des connaissances et identifier des pistes de recherche : il a travaillé avec des frontières poreuses pour ne pas contraindre les réflexions, aux dépens de problématiques parfois difficilement attribuables à un seul groupe. Une synthèse a été établie, à partir de ces 13 documents de travail, avec un regroupement en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre identifie les attentes et les besoins en énergies, synthons et matériaux biosourcés, comparativement aux usages actuels du carbone fossile,
- Le deuxième explore la diversité des solutions végétales susceptibles de répondre qualitativement à ces besoins,
- Le troisième aborde la conception, l'évaluation et la mise en perspective de systèmes de production durables, fondées sur ces solutions végétales et répondant aux attentes et besoins du premier chapitre.

## Contributeurs

### Chapitre 1 : Attentes et besoins en énergie, synthons et en matériaux biosourcés

Paul **Colonna** (INRA, coordinateur ARP VegA), Agnès **Kammoun** (INRA, animatrice ARP VegA), Xavier **Montagne** (IFP, coordinateur du sous-atelier A, animateur de la tâche 1), Yves **Barbin** (Pierre Fabre), Denis **Bellenot** (ITEIPMAI), Léonard **Boniface** (ADEME), Marie-Elisabeth **Borredon** (ENSIACET), Sylvain **Caillol** (CNRS), Hélène **Carrère** (INRA), Denilson **Da Silva Perez** (FCBA), Bruno **Delfort** (IFP), Lisa **Gauvrit** (INRA), Alexandrine **Guillez** (BASF), Bernard **Mompon** (Archimex), Zéphirin **Mouloungui** (ENSIACET), Olivier **Mora** (INRA), Brigitte **Ohl** (Schneider Electric), Virginie **Pevere** (Rhodia), Michel **Philippe** (L'Oréal), Jean-François **Rous** (Sofiproteol)

### Chapitre 2 : Principales familles biochimiques répondant à ces besoins

Marie-Elisabeth **Borredon** (ENSIACET), Jean-Paul **Cadoret** (IFREMER), Claudine **Campa** (IRD), Paul **Colonna** (INRA, coordinateur ARP Veg, animateur de la tâche 2), Denilson **da Silva Perez** (FCBA), Eric **Gontier** (Université Amiens), Jacques **Guéguen** (INRA), Herman **Höfte** (INRA), Lise **Jouanin** (INRA), Bernard **Kurek** (INRA), Catherine **Lapierre** (AgroParisTech), René **Lessire** (CNRS), Philippe **Marion** (Rhodia), Bernard **Mompon** (Archimex), Xavier **Montagne** (IFP, coordinateur du sous-atelier A), Zéphirin **Mouloungui** (ENSIACET), Patrick **Perre** (AgroParisTech), Gilles **Pilate** (INRA), Daniel **Pioch** (CIRAD)

### Chapitre 3 : Choix de l'origine biologique : biomasse végétale et/ou biomasse microbienne

Paul **Colonna** (INRA, coordinateur ARP VegA), Agnès **Kammoun** (INRA, animatrice ARP VegA), Xavier **Montagne** (IFP, coordinateur du sous-atelier A), Daniel **Thomas** (UTC, animateur de la tâche 3), Jean-Charles **Delebecque** (Agence Régionale d'Innovation Picardie), Jean-Philippe **Delgenes** (INRA), Patrick **Durand** (IFREMER), Lisa **Gauvrit** (INRA), Jean-Jacques **Godon** (INRA), Gérard **Goma** (INSA Toulouse, animateur de la tâche 4), René **Lessire** (CNRS), Rémy **Marchal** (IFP), Richard **Martin** (L'Oréal), Stéphane **Octave** (UTC), Jean-Louis **Prioul** (Université Paris-Sud 11), Denilson **da Silva Perez** (FCBA)

### Chapitre 4 : Identification des besoins en carbone et en azote pour les bioconversions

Paul **Colonna** (INRA, coordinateur ARP VegA), Agnès **Kammoun** (INRA, animatrice ARP VegA), Xavier **Montagne** (IFP, coordinateur du sous-atelier A), Gérard **Goma** (INSA Toulouse, animateur de la tâche 4), Jean-Philippe **Delgenes** (INRA), Jean-Jacques **Godon** (INRA), Dominique **Grizeau** (CNAM), Jacques **Guéguen** (INRA), Stéphane **Guillouet** (INSA Toulouse), Bernard **Kurek** (INRA), René **Lessire** (CNRS), Nicolas **Lindley** (CNRS), Carole **Molina-Jouve** (INSA Toulouse), Jean-François **Morot-Gaudry** (INRA), Stéphane **Octave** (UTC), Michael **O'Donohue** (INRA), Jean-Charles Portais (INSA Toulouse), Magali **Remaud-Simeon** (INSA Toulouse), Jean-Louis **Uribelarrea** (INSA Toulouse)

#### Chapitre 5 : Identification des végétaux où des structures intéressantes sont présentes

Paul **Colonna** (INRA, coordinateur ARP VegA), Agnès **Kammoun** (INRA, animatrice ARP VegA), Xavier **Montagne** (IFP, coordinateur du sous-atelier A), Jean-François **Morot-Gaudry** (INRA, animateur de la tâche 5), Monique **Axelos** (INRA), Marie-Elisabeth **Borredon** (ENSIACET), Lesya **Baudoin** (INRA), Thierry **Chardot** (INRA), Laurent **Cournac** (CEA), Michel **Delseny** (CNRS), Giovanni **Finazzi** (CNRS), Jacques **Gueguen** (INRA), Marie-Andrée **Hartmann** (CNRS), William **Helbert** (CNRS), Lise **Jouanin** (INRA), Bernard **Kurek** (INRA), René **Lessire** (CNRS), Zephirin **Mouloungui** (ENSIACET), Georges **Pelletier** (INRA), Gilles **Peltier** (CEA), Jean-Claude **Pernollet** (INRA), Yves **Popineau** (INRA), Brigitte **Thomasset** (UTC)

#### Chapitre 6 : Optimisation des productions végétales existantes

Paul **Colonna** (INRA, coordinateur ARP VegA), Agnès **Kammoun** (INRA, animatrice ARP VegA), Georges **Pelletier** (INRA, coordinateur du sous-atelier B), Yves **Barrière** (INRA, animateur de la tâche 6), Michel **Delseny** (CNRS, animateur de la tâche 6), Joël **Abecassis** (INRA), Bruno **Bachelier** (CIRAD), Dominique **Boutin** (CIRAD), Catherine **Boyen** (CNRS), Serge **Braconnier** (CIRAD), Brigitte **Chabbert** (INRA), Jacques **Chantereau** (CIRAD), Guillaume **Chantre** (FCBA), Angélique **D'Hont** (CIRAD), Gérard **Duc** (INRA), Jean-Louis **Durand** (INRA), Tristan **Durand-Gasselin** (CIRAD), Thierry **Fourcaud** (CIRAD), Pascal **Frey** (INRA), Georges **Freyssinet** (Limagrain), Lisa **Gauvrit** (INRA), Eric **Giraud** (IRD), Régis **Goebel** (CIRAD), Alain **Gojon** (INRA), Jean-Yves **Hoarau** (CIRAD), Marc **Lacape** (CIRAD), Gisèle **Laguerre** (INRA), Thierry **Langin** (Université Paris-Sud 11), Catherine **Lapierre** (AgroParisTech), Sylvain **Marsac** (Arvalis), Jean-François **Morot-Gaudry** (INRA), Nathalie **Munier-Jolain** (INRA), Laurent **Nussaume** (CEA), Loïc **Pagès** (INRA), Sylvain **Pellerin** (INRA), Gilles **Pilate** (INRA), Christophe **Plomion** (INRA), David **Pot** (CIRAD), Jean-François **Rami** (CIRAD), Michel **Renard** (INRA), Hervé **Rey** (CIRAD), Thierry **Tran** (CIRAD), James **Tregear** (IRD), Gilles **Trouche** (CIRAD), Patrick **Vincourt** (INRA)

#### Chapitre 7 : Exploration de la diversité naturelle des espèces végétales, non valorisées à ce jour

Pierre **Berthomieu** (SupAgro), Catherine **Boyen** (CNRS, animateur de la tâche 7), Chris **Bowler** (CNRS), Stéphane **Cadoux** (INRA), Jean-Paul **Cadore** (IFREMER), Claudine **Campa** (IRD), Michel **Chauvet** (Agropolis), Paul **Colonna** (INRA, coordinateur ARP VegA), Laurent **Cournac** (CEA), Alexandre **De Kochko** (IRD), Bruno **de Reviere** (MNHN), Patrick **Durand** (IFREMER), Fabien **Ferchaud** (INRA), Bernard **Genty** (CEA), Brigitte **Gontero-Meunier** (CNRS), Jacques **Joyard** (CNRS), Michel **Lebrun** (IRD), Yannick **Lerat** (CEVA), René **Lessire** (CNRS), Bernard **Mompon** (Archimex), Hervé **Moreau** (CNRS), Fabrice **Not** (CNRS), Georges **Pelletier** (INRA, coordinateur du sous-atelier B), Gilles **Peltier** (CEA), Roland **Pirot** (CIRAD), Ian **Probert** (CNRS), Jean-François **Sassi** (CEVA), Jean **Tayeb** (INRA), Francis-André **Wollman** (CNRS).

#### Chapitre 8 : Faisabilité de la transformation génétique des végétaux pour répondre à des besoins en énergie, synthons et matériaux biosourcés

Joël **Abecassis** (INRA), Hélène **Barbier-Brygoo** (CNRS), Pierre **Barret** (INRA), Michel **Caboche** (INRA), Paul **Colonna** (INRA, coordinateur ARP VegA), Annabelle **Dejardin** (INRA), Michel **Delseny** (CNRS), Jean-Denis **Faure** (INRA), Georges **Freyssinet** (Limagrain), Alain **Gojon** (INRA), Jacques

**Gueguen** (INRA), Philippe **Guerche** (INRA), Simon **Hawkins** (Université de Lille 1), Herman **Höfte** (INRA), Lise **Jouanin** (CNRS), Fabien **Nogué** (INRA), Laurent **Nussaume** (CEA), Georges **Pelletier** (INRA, coordinateur du sous-atelier B, animateur de la tâche 8), Gilles **Pilate** (INRA), Michel **Renard** (INRA), Benoit **St-Pierre** (Université de Tours), Jean **Tayeb** (INRA), Evelyne **Téoulé** (INRA), Brigitte **Thomasset** (UTC), Jean-François **Trontin** (FCBA)

#### Chapitre 9 : **Les bioraffineries**

Joël **Abacessis** (INRA, animateur de la tâche 9), Violaine **Athes-Dufour** (AgroParisTech), Jean-Luc **Baret** (Soufflet), Stéphanie **Baumberger** (AgroParisTech), Léonard **Boniface** (ADEME), Hélène **Carrère** (INRA), Thierry **Chardot** (INRA), Jean-Luc **Duplan** (IFP), Jacques **Evrard** (CETIOM), Edouard **Freund** (Procethol-2G), Yvon **Le Henaff** (ARD), Yannick **Lerat** (CEVA), Jean-Philippe **Leygue** (Arvalis), Christophe **Luguel** (Pôle IAR), Valérie **Mechin** (INRA), Jean-Marc **Meynard** (INRA), Jean-François **Morot-Gaudry** (INRA), Georges **Pelletier** (INRA, coordinateur du sous-atelier B), Patrick **Perre** (AgroParisTech), Daniel **Pioch** (CIRAD), Caroline **Remond** (Université de Reims), Luc **Rigal** (ENSIACET), Xavier **Rouau** (INRA), Christian **Sales** (CIRAD, coordinateur du sous-atelier C), Thierry **Stadler** (Pôle IAR), Jean **Tayeb** (INRA, animateur de la tâche 9).

#### Chapitre 10 : **conception de systèmes de culture et de systèmes de production**

Alain **Bailly** (FCBA), Marc **Benoit** (INRA), Alain **Berthelot** (FCBA), Olivier **Bertrand** (FBE), Stéphane **Cadoux** (INRA), Guillaume **Chantre** (FCBA), Jean-Baptiste **Coulon** (INRA), Bruno **de Reviers** (MNHN), Bertrand **Debret** (BASF Agro SAS), Patrick **Dion** (CEVA), Fabien **Ferchaud** (INRA), Florence **Jacquet** (INRA), Marie-Hélène **Jeuffroy**, (INRA), Eric **Justes** (INRA), Marianne **Le Bail** (AgroParisTech), François **Lecompte** (INRA), C. Lesur (AgroParisTech), Chantal **Loyce** (AgroParisTech), Nicolas **Marron** (INRA), ), Jean-Marc **Meynard** (INRA), Antoine **Messéan** (INRA, animateur de la tâche 10), Jean-François **Morot-Gaudry** (INRA), Nicolas **Nguyen-The** (FCBA), Etienne **Pilorge** (CETIOM), Roland **Pirot** (CIRAD), Philippe **Potin** (CNRS), Michel **Renard** (INRA), Christian **Sales** (CIRAD, coordinateur du sous-atelier C), Christian **Valentin** (IRD), Jacques Wery (INRA)

#### Chapitre 11 : **Analyses de cycles de vie et de bilans environnementaux**

Claudine **Basset-Mens** (CIRAD), Jean-François **Bonnet** (Université de Bordeaux), Frédérique **Bouvard** (IFP), Michel **Cariolle** (ITB), Claire **Cornillier** (FCBA), Fabien **Ferchaud** (INRA), Benoit **Gabrielle** (AgroParisTech), Bruno **Gagnepain** (Ademe), Céline **Gomes** (UCFF), Arnaud **Helias** (SupAgro), Vanessa **Jury** (ENITIAA), Laurent **Lardon** (INRA), Afsaneh **Lellahi** (Arvalis), Joël **Léonard** (INRA), Stéphane **Lepochat** (Evea Conseil), Mireille **Montréjaud-Vignoles** (ENSIACET), Etienne **Poitrat** (Ademe), Anne **Prieur** (IFP, animateur de la tâche 11), Nicolas **Robert** (INRA), Patrick **Rousseaux** (Université de Poitiers), Caroline **Sablayrolles** (ENSIACET), Guy-Noël **Sauvion** (Rhodia), Thomas **Senac** (Roquette)

#### Chapitre 12 : **Analyses socio-économiques**

Marie-Claude **Belis-Bergouignan** (Université Bordeaux 4), Sylvie **Bonny** (INRA), Robin **Bourgeois** (CIRAD), Sylvie **Ferrari** (Université Bordeaux 4), Nathalie **Gaussier** (Université Bordeaux 4), Jacques **Hubert** (Coop de France), Claude **Jannot** (CIRAD), Caroline **Lejars** (CIRAD, animateur de la tâche 12), Elisabeth **Le Net** (FCBA), Daphné **Lorne** (IFP), Jean-Jacques **Malfait** (Université Bordeaux 4), Christian **Sales** (CIRAD, coordinateur du sous-atelier C), Sébastien **Treyer** (AgroParisTech)

#### Chapitre 13 : **Prospective**

Marc **Barbier** (INRA), Michel **Benoit-Cattin** (CIRAD), Paul **Colonna** (INRA), Catherine **Esnouf** (INRA), Lisa **Gauvrit** (INRA), Agnès **Kammoun** (INRA), Valérie **Mazza** (Limagrain), Antoine **Méssean** (INRA), Olivier **Mora** (INRA, animateur de la tâche 13), Sandrine **Paillard** (INRA)

## **1. Résumé**

*A finaliser en une/deux pages*

## 2. Objectifs

Depuis leur émergence, les sociétés humaines transforment des matières végétales et animales (biomasse) pour s'alimenter, se vêtir, se loger, produire de l'énergie, s'éclairer, se chauffer et faire sécher, ou encore travailler les métaux. Actuellement, pour près de la moitié de l'humanité, la biomasse représente au moins un tiers de l'énergie primaire totale consommée<sup>1</sup>. Depuis le début du XVIII<sup>ème</sup> siècle, les molécules obtenues à partir de la biomasse ont été pour une très large part remplacées par celles issues de la carbochimie puis de la pétrochimie. Cette évolution a reposé fondamentalement sur l'exploitation minière d'un carbone d'origine fossile (pétrole, gaz naturel, charbon).

Au cours des dernières années, le domaine de la valorisation non alimentaire des produits agricoles (VANA), tel qu'il était encore défini dans les années 1990, a fortement évolué vers celui de l'utilisation de la biomasse et de la conception de nouveaux systèmes de production dédiés à des finalités énergétiques, chimiques ou de production de nouveaux matériaux. Ce véritable changement de point de vue, qui peut certes être perçu comme un retour en arrière, a lieu dans un contexte radicalement différent aux plans technologique et scientifique, social et économique, et aussi environnemental.

La substitution du carbone fossile par du carbone renouvelable est motivée en particulier par trois enjeux majeurs : (i) contrôler, limiter et réduire les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère pour conduire à un développement neutre au plan carbone<sup>2</sup> ; (ii) élaborer des produits de substitution aux hydrocarbures fossiles (et à leurs dérivés) dont les réserves, pour un coût donné, seront de plus en plus rares ; (iii) développer une bio-agro-industrie, avec l'émergence et l'organisation de nouvelles filières et améliorer l'indépendance énergétique.

Pour répondre à ces défis, la biomasse végétale présente un certain nombre d'atouts : (i) parmi les différentes formes de stockage de l'énergie solaire, la biomasse issue des végétaux représente le potentiel le plus important, le plus ubiquiste tant au niveau planétaire qu'au niveau des différents pays et régions ; (ii) son utilisation permettrait de réduire les émissions de gaz à effet de serre ; (iii) la biomasse permettrait d'accéder à des propriétés nouvelles, par rapport aux produits pétro-sourcés : matériaux présentant des propriétés d'hyperhydrophobie (effet lotus), matériaux ayant une bonne tenue thermique, disponibilité de molécules chirales pour toutes les applications en chimie fine, biodégradabilité accrue par la présence d'éléments structuraux reconnaissables par les enzymes et micro-organismes des milieux naturels.

Cette perspective s'inscrit aussi dans le cadre du développement de la « chimie verte »<sup>3,4,5</sup>. Dès 1991, l'EPA (l'Agence Américaine pour la Protection de l'Environnement) a lancé la première initiative de recherche en chimie verte dont le but était de concevoir des produits et des procédés chimiques permettant de réduire ou d'éliminer l'utilisation et la synthèse de substances dangereuses, le « danger » étant pris au sens le plus large : physique (substance inflammable, explosive,...), toxicologique (cancérogène, mutagène,...) ou global (destruction de la couche d'ozone, changement climatique,...). Cette définition a été ensuite développée en douze principes par les chimistes américains Anastas et

<sup>1</sup> IEA International Energy Agency. 2008. *Energy Technology Perspectives 2008 - Scenarios and Strategies to 2050*. Paris (FRA): OECD/IEA.

<sup>2</sup> GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) : <http://www.ipcc.ch>  
Changements climatiques 2001. Rapport de synthèse : <http://www.ipcc.ch/pub/un/syrfrench/spm.pdf>

<sup>3</sup> Anastas, P.T., Warner, J.C. 1998. *Green chemistry theory and practice*. Oxford University Press, Oxford, 135 p.

<sup>4</sup> Lancaster, M. 2002. *Green chemistry, an introductory text*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, 310 p.

<sup>5</sup> Colonna, P. 2006. *La chimie verte*. Paris (FRA): Lavoisier.

Warner<sup>6</sup>. Sont rappelés ici ceux qui sont les plus pertinents pour la problématique de cet ARP, non seulement « l'utilisation de matières premières renouvelables » (7<sup>ème</sup> principe), mais aussi : « l'économie d'atomes et d'étapes » (2<sup>ème</sup> principe) pour réaliser, à moindre coût, l'incorporation de fonctionnalités dans les produits recherchés tout en limitant les problèmes de séparation et de purification ; « la recherche d'alternatives aux solvants polluants et aux auxiliaires de synthèse » (5<sup>ème</sup> principe). Beaucoup de solvants traditionnels ont un impact environnemental élevé (CFC, COV,...) et leur usage est aujourd'hui soumis à des restrictions importantes. Cela entraîne le développement de procédés faisant appel à des solvants verts, utilisés dans des conditions de réaction particulières, tels que le dioxyde de carbone à l'état supercritique (intermédiaire entre gaz et liquide) et l'eau comme solvant de substitution de solvants organiques mais polaires ; « la conception de produits chimiques moins toxiques avec la mise au point de molécules plus sélectives et non toxiques » (4<sup>ème</sup> principe) ; « la réduction du nombre de dérivés en minimisant l'utilisation de groupes protecteurs ou auxiliaires » (8<sup>ème</sup> principe) ; « l'utilisation des procédés catalytiques (dont les biotechnologies font partie) de préférence aux procédés stœchiométriques avec la recherche de nouveaux réactifs plus efficaces et minimisant les risques en terme de manipulation et de toxicité » (9<sup>ème</sup> principe). Les économies d'atome conduisent à remplacer les réactions stœchiométriques par des réactions catalytiques plus efficaces (si elles existent) et à privilégier les réactions intrinsèquement les plus efficaces, comme les réarrangements, au cours desquels les atomes du réactif se réarrangent pour former le produit et dont l'utilisation atomique est de 100 %.

Parallèlement, le développement de matériaux biosourcés issus du fractionnement et de la recombinaison de la biomasse végétale tend lui aussi à se développer. Ce domaine n'est pas considéré prioritairement dans l'ARP, mais ne peut pas être complètement occulté du fait (i) de la concurrence entre les différents usages de la biomasse et (ii) que la conception de certains matériaux biosourcés (les composites dérivés du végétal) pose des questions similaires à celles traitées pour les finalités énergétiques et chimiques. Il importe à ce stade de reconnaître que les besoins associés à ces finalités énergétiques, chimiques et de production de matériaux biosourcés ne sont pas de même nature et posent des questions scientifiques et technologiques distinctes : les besoins énergétiques sont immenses et mettent d'abord en jeu des questions de rendement ; les besoins pour la chimie sont en volume moins importants mais sensiblement plus diversifiés, et aussi plus spécialisés et segmentés.

Dans ce contexte général, des politiques publiques ont été mises en place, notamment afin d'encourager la valorisation énergétique de la biomasse<sup>7</sup>. La forte croissance des investissements dans les biocarburants dits de 1<sup>ère</sup> génération (biodiésel et bioéthanol) qui utilisent les ressources actuelles en huiles végétales, en saccharose ou en amidon, a suscité des controverses, dont la solution devrait émerger des travaux sur les biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération fondés sur la valorisation, par la voie biologique ou la voie thermochimique, de la biomasse lignocellulosique et des micro-algues pour la 3<sup>ème</sup> génération.

La simultanéité des réflexions et des actions dans le domaine des usages alimentaires, chimiques et

---

<sup>6</sup> Anastas, P.T. et Warner, J.C. 1998. Green chemistry theory and practice. Oxford University Press, Oxford, 135 p.

<sup>7</sup> France : loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique ; Allemagne : Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, und Reaktorsicherheit (BMU), *Erneuerbare Energien in Zahlen – Stand, März 2003* – Deutscher Bundestag, *Bericht über die Bestandsaufnahme durch die Deutsche Energie-Agentur (dena) über den Handlungsbedarf bei der Förderung des Exportes erneuerbarer Energie-Technologien*, Drucksache 15/1862 (November 2003). - Europe : 1997, *Directive on renewable energy source* – 08/03/2006, *Livre vert. Une stratégie européenne pour une énergie sûre, compétitive et durable* ; USA Energy Policy Act of 2005 (Pub.L. 109-058), United States Congress on July 29, 2005.

énergétiques de la biomasse rencontre une difficulté particulière due aux grand nombre de filières concernées qui répondent à des besoins diversifiés et qui ne sont pas indépendantes du fait de la finitude des ressources disponibles (compétition entre usages du sol), de leur complémentarité (assolements et rotations, intégration territoriale), et de la diversité des produits et coproduits, de l'interconnexion des marchés et des filières technologiques (Figure 1).

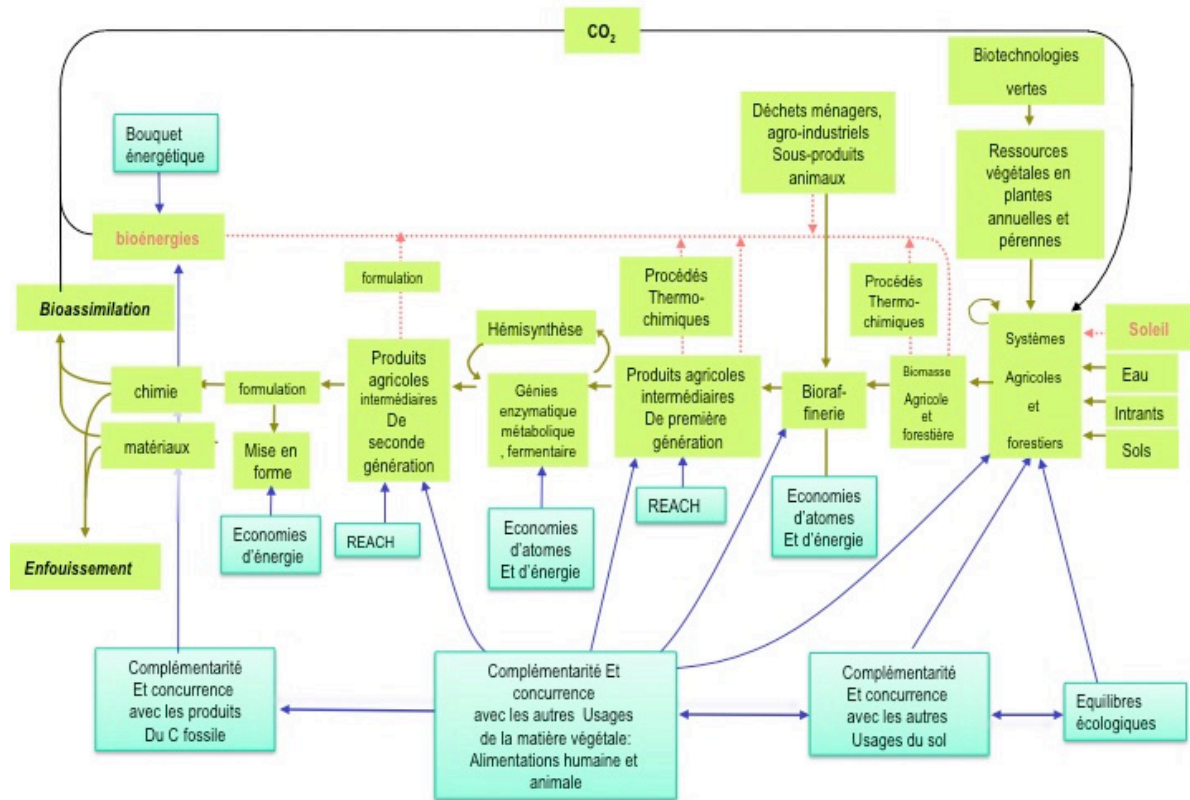


Figure 1: vision synoptique de l'économie circulaire du carbone renouvelable.

Une approche systémique est donc nécessaire en synergie à l'approche réductionniste « quelle plante pour un usage défini ? » : un grand nombre de voies parallèles permettent de produire de la biomasse à des fins énergétiques ou chimiques<sup>8,9,10</sup> : l'optimisation des cultures existantes, l'exploration de la diversité naturelle et l'acclimatation d'espèces jusqu'ici non cultivées, la transformation des espèces, l'optimisation des usages de la biomasse (concept de bioraffinerie), le choix des espèces, qu'il s'agisse de définir celles qui seront utilisées en production (cultures annuelles ou pérennes, algues) ou de choisir quelques espèces modèles sur lesquelles des résultats de portée générique facilement transposables pourront être acquis<sup>11</sup>.

Ces choix relatifs au matériel végétal et à son fractionnement ne peuvent évidemment pas être abordés sans considérer dès le départ le type de produits attendus — quels synthons ? quel biocarburant ? — et les procédés nécessaires pour les extraire, les purifier ou les transformer à partir de la biomasse. Il n'est pas non plus possible de réfléchir aux végétaux du futur sans considérer la façon dont ils seront

<sup>8</sup> Business Feature. 2006. *Nature* 444 : 669-678.

<sup>9</sup> Kennedy, D. 2007. The Biofuels Conundrum. *Science* 316 :515

<sup>10</sup> Sommerville, C. 2006. The Billion-Ton Biofuels Vision. *Science* 312 :1277

<sup>11</sup> Morot-Gaudry, J.F., Lea, P., Birat, J.F. 2007. Functional Plant Genomics. Science Publishers, Enfield, NH, USA



produits — c'est-à-dire aux systèmes de culture et de production qui seront mis en œuvre — ni sans évaluer les conséquences directes et indirectes — en termes de bénéfices, de coûts et de risques — de ces choix sur l'environnement, sur les territoires, sur les marchés. Ces questions sont aujourd'hui débattues et il existe un besoin de recherche pour les approfondir. Une approche systémique, incluant une analyse multicritères, du berceau à la tombe, s'impose afin d'assurer des voies d'amélioration globales. Ce type d'approche évite ainsi tout transfert de pollution entre acteurs ou entre milieux, tout en permettant l'identification des points à améliorer en priorité aux différentes étapes d'une filière<sup>12,13</sup>. Cette approche systémique ne doit pas se limiter à la seule approche « filière » mais aussi prendre en compte les opportunités d'intégration, de synergie entre filières sur un site industriel ou un bassin d'approvisionnement. Ces différentes approches systémiques contribuent à une évolution des bioraffineries<sup>14</sup>.

Le développement et la diversification des usages de la biomasse présentent également des risques ou limites. Parmi les différents facteurs déterminants pour l'évolution des usages énergétiques et chimiques de la biomasse, il faut notamment considérer :

- La pression sur les ressources fossiles, avec à court terme l'augmentation et la fluctuation de leurs prix et à long terme leurs raréfactions.
- L'évolution des marchés des matières premières agricoles, en lien avec la complémentarité et la concurrence entre usages alimentaires et non alimentaires de la biomasse.
- L'adaptation des ressources naturelles sous la pression du changement climatique (cf ARP ADAGE <https://www1.clermont.inra.fr/adage/>).
- Les innovations technologiques et les avancées de la recherche dans les filières bio-sourcés mais aussi dans les filières concurrentes (substitution) concernant notamment le développement des biocarburants de deuxième et troisième générations ; les innovations concurrentes dans les transports (ex. des véhicules électriques) ; les nouveaux procédés physiques, chimiques et biologiques ; l'innovation dans les secteurs aval.
- La durabilité des systèmes de production agricoles et industriels, les impacts environnementaux directs et indirects de ces filières (bilan carbone, impacts sur les ressources naturelles), leurs effets sur le développement territorial. Cet enjeu environnemental avec la nécessaire limitation des intrants (eau, engrais,...) et les impacts potentiels (équilibres écologiques, paysage,...) n'est pas spécifique à l'ARP, même s'il interpelle directement sur les finalités mêmes de ces politiques (réduction des GES,...).
- Les demandes sociétales, susceptibles d'évoluer avec des changements de modes de vie, de formes d'habitats, mais aussi avec le développement des préoccupations sanitaires, environnementales et territoriales.
- Les politiques publiques nationales et internationales qui jouent un rôle primordial en influant sur l'offre et la demande en produits bio-sourcés par des mesures incitatives (mesures fiscales par exemple), réglementaires (ex. de REACH) ou de certification dans les domaines agricoles, énergétiques, environnementaux et industriels.
- Le contexte géopolitique, susceptible d'influer sur les choix stratégiques des Etats en matière de sécurité alimentaire et d'indépendance énergétique, et sur les marchés et les prix des matières premières fossiles et agricoles. Ce facteur doit être analysé au regard des systèmes de gouvernance qui se développeront à l'échelle internationale.

Ces problématiques expliquent l'intensité des débats et controverses qui émergent sur un thème qui

---

<sup>12</sup> ADEME/DIREM. 2002. Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants en France. <http://www.industrie.gouv.fr/energie/renou/biomasse/ecobilan-synthese.pdf>

<sup>13</sup> WTW EUCAR/JRC/CONCAWE. 2002. Well-towheels analysis of future automotive fuels and power trains in the European context (<http://ies.jrc.ec.europa.eu/wtw.html>)

<sup>14</sup> DOE (U.S. Department of Energy) <http://www.energy.gov/>  
[http://www1eere.energy.gov/biomass/program\\_areas.html](http://www1eere.energy.gov/biomass/program_areas.html)

concerne aussi bien le court que le très long terme. La nécessaire combinaison des approches de différentes natures, ascendantes, descendantes et systémiques rend indispensable la mobilisation de compétences disciplinaires très variées avec un large spectre des acteurs potentiellement concernés, non seulement dans le champ académique mais aussi dans ceux des pouvoirs publics, des acteurs agricoles et industriels, des représentants de la société civile. Les enjeux liés à cet ARP nécessitent donc à la fois une vision prospective et une grande ouverture.

Tableau 1 : évolution sémantique du champ considéré

Période	Dénominations dominantes	Commentaires
1990 -2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les valorisations agricoles non alimentaires (VANA)</li> <li>• Les usages de la biomasse</li> <li>• La valorisation de la biomasse</li> <li>• Les agro-ressources</li> </ul>	Problématique axée sur la recherche de débouchés à une agriculture et une agro-foresterie ayant des excédents
2000 -2008	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'agro-chimie, la chimie du végétal</li> <li>• La chimie bio-sourcée (bio-based) (bioproducts)</li> </ul>	Insiste sur la chimie alors que les progrès majeurs sont attendus dans les biotechnologies blanches et vertes
depuis 2008	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La bio-économie</li>   <li>• La chimie verte du carbone renouvelable</li>   <li>• Economie décarbonée</li> </ul>	<p>Associe les filières alimentaire, énergétique et chimique, répondant ainsi au besoin d'une vision systémique</p> <p>Focalisée sur la chimie et les bioénergies</p> <p>Oxymoron car le carbone reste l'atome central dans toute la problématique. Défossilisée eut été plus adéquat.</p>

**Cet ARP est centré sur l'identification d'espèces végétales et de voies métaboliques d'intérêt ainsi que sur la conception et l'évaluation des systèmes de production durables, pour répondre aux besoins en biomasse végétale, provenant du développement des nouvelles filières énergétiques et du carbone renouvelable.** En termes de finalités, il a privilégié les biocarburants et la chimie du végétal, sans négliger d'autres formes de valorisation de la biomasse — énergétiques (combustion directe pour la production d'énergie) ; matériaux biosourcés (notamment ceux qui sont basés sur le fractionnement fin de la biomasse) ; alimentaires (coproduits, compétition entre filières) — du fait même de l'interdépendance des filières et des marchés. Il visera un équilibre entre des états de l'art à court terme (synthèse des connaissances) et des approches à long terme plus prospectives.

Cet atelier s'inscrit dans une dynamique très large, où l'évolution des choix sémantiques (Tableau 1) converge vers la chimie verte du carbone renouvelable en accord avec les principes de la chimie verte et le souci de durabilité.

Cette réflexion prolonge les réflexions publiées par les organismes internationaux<sup>15</sup>, aux USA<sup>16</sup>, au Brésil<sup>17</sup>, en Europe<sup>18</sup>, avec plusieurs plates-formes technologiques<sup>19</sup>. En France, l'ADEME<sup>20</sup> à travers l'animation du GIS AGRICE et du programme Bois – Energie a contribué très tôt à stimuler des recherches dans ces domaines et plusieurs pôles de compétitivité ont centré leurs activités sur ces thématiques<sup>21</sup>. Aujourd'hui plusieurs programmes nationaux traitent le sujet<sup>22</sup>, chacun sous un angle particulier. Par ailleurs, les établissements de recherche eux-mêmes y ont contribué soit par le montage de programmes interdisciplinaires (cf. le programme « Chimie pour le Développement Durable » du CNRS en partenariat avec l'INRA), soit par le renforcement de leurs compétences et la structuration de leurs dispositifs (cf. la mission « CARBIO : CARbone Renouvelable et Bioindustries » de l'INRA) ou encore, par la mise en place, avec le soutien de l'All, de prototypes industriels pour les biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération.

Sur la base de ces nombreuses connaissances et savoir-faire industriels, **trois objectifs ont été fixés à ce travail collectif** :

- Etablir un état de l'art qui soit directement utilisable par les acteurs publics et privés.
- Déterminer les limites et les lacunes afin d'identifier des pistes de recherche, en termes de méthodes (ex. bilans environnementaux ou modèles économiques) aussi bien que d'espèces ou de voies métaboliques étudiées, de défis biotechnologiques ou de conception de systèmes intégrés, en regard des enjeux énergétiques, environnementaux, socio-économiques et géopolitiques.
- Etablir une plate-forme de discussion, large et ouverte, dont il est espéré qu'elle persiste au-delà de l'atteinte des deux premiers objectifs.

---

<sup>15</sup> AIE. World Energy Outlook 2007. AIE (2008) Energy Technology Perspective, Scenarios and Strategies to 2050

<sup>16</sup> DOE-USA joint solicitations in the Biomass Research and Development Initiative (<http://www.brdisolutions.com/default.aspx>).

<sup>17</sup> Filho, M.V., Araujo, C., Bonfa A., et Porto W. 2011. *Enzyme Research*. Doi:10.4061/2011/654596, 8 pages

<sup>18</sup> AEE. 2006. How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? EPOBIO (2008) The Impact of 'Non-Food' Research (1988 to 2008).

<sup>19</sup> Plates-formes technologiques européennes concernées :

–Au plan des finalités énergétiques et chimiques : l'*European Biofuels Technology Platform* (<http://www.biofuelstp.eu/>); et l'*European Technology Platform for Sustainable Chemistry* (<http://www.suschem.org/>) ;

–Au plan des productions végétales au sens large : l'*European Technology Platform Plants for the Future* (<http://www.epsoweb.org/Catalog/TP/>) ; l'*European Forest-based Technology Platform* (<http://www.forestplatform.org/>).

<sup>20</sup> ADEME- ALCIMED. 2007. Marché actuel des bioproduits industriels et biocarburants et évolution à échéance 2015-2030.

<sup>21</sup> Pôles de compétitivité à vocation mondiale concernés : AXELERA (Chimie et environnement, Rhône-Alpes) (<http://www.axelera.org/>) ; Industries Agro-Ressources (<http://www.iar-pole.com/>).  
Autres pôles de compétitivité concernés : AGRIMIP Innovations (Midi-Pyrénées) (<http://www.agromip.educagri.fr/agrimip-innovation.html>) ; Céréales Vallée (Auvergne) (<http://cereales-vallee.org/>) ; Fibres du Grand Est (<http://www.polefibres.fr/>) ; Industries et Pin maritime du futur (Aquitaine) (<http://www.ipmf.fr/>) ; Q@LI-MEDiterranée (<http://www.agropolis.fr/qalim/>) ; Parfums, arômes, saveurs et senteurs (PACA) (<http://www.pole-pass.org/>).

<sup>22</sup> Au premier chef, les programmes « Chimie et procédés pour le développement durable » et « Bioénergies » (PNRB). Mais aussi : les programme GENOPLANTE et « Génomique microbienne à grande échelle » au titre des recherches en génomique végétale et des micro-organismes ; le programme national de recherche sur les OGM ; les suites qui seront éventuellement données au programme « Agriculture et développement durable » au titre de la conception de systèmes durables

Les **deux lignes d'horizon** choisies sont l'échéance de 2050 et une vision internationale, en considérant que les besoins fondamentaux (alimentation, hygiène, habitat, transport, emballages,...) sont identiques partout, les solutions pouvant différer selon les conditions locales environnementales et de développement.

La valeur ajoutée de cet ARP sera évaluable à l'aune des orientations et des inflexions dans les programmes ANR existants ou à venir, chez les partenaires de l'ARP en parallèle, ou encore à favoriser l'émergence de projets technologiques portés par l'ADEME, OSEO ou des pôles de compétitivité.

Le plan de présentation des résultats est construit à partir des trois approches :

- Une approche d'ingénierie inverse partant des besoins en bioénergie, synthons et matériaux biosourcés, formulés par les industriels et la société, et remontant vers l'identification des propriétés attendues des végétaux.
- Une approche descendante par filière visant à explorer la diversité des solutions végétales pour produire la biomasse tout en intégrant la question transversale de la bioraffinerie.
- Une approche systémique qui porte sur la conception, l'évaluation et la mise en perspective de systèmes de production durables.

Chaque approche a été synthétisée dans un chapitre de 3 à 5. Au cours des discussions il est apparu nécessaire de définir, ou d'établir un consensus sur des définitions des principaux mots clés de ce domaine, ce qui s'est concrétisé par un lexique.

## 3. Expression des besoins

### 3.1. Attentes et besoins en énergie, en synthons et en matériaux biosourcés

Les molécules attendues correspondent d'abord à des synthons, c'est-à-dire aux molécules qui sont à la base des processus ultérieurs de synthèse et de fonctionnalisation. Toutefois la chimie utilise aussi des molécules associées dans des organisations supramoléculaires (ex. fibres de cellulose), dont le maintien de l'association est nécessaire tant du point de vue des propriétés attendues que de l'efficacité des procédés ultérieurs et de l'utilisation. L'analyse sera structurée sur les familles des grands intermédiaires chimiques, des carburants et additifs, des éléments supramoléculaires (fibres,...). Cette tâche pourra notamment s'appuyer sur les réflexions déjà conduites dans le cadre du DoE américain, des plates-formes technologiques européennes Sustainable Chemistry et Biofuels, de la stratégie européenne pour les biocarburants et de l'ADEME.

Délivrable 1 : recenser les molécules et leurs assemblages supramoléculaires en précisant les volumes de production et la valeur ajoutée des produits, les degrés de pureté et l'hétéromolécularité acceptables pour les procédés actuels ou futurs, de la chimie et des carburants. Pour les organisations supramoléculaires, les dimensions caractéristiques font aussi partie du cahier des charges.

Le référentiel actuel de la chimie et de l'énergie est fondé sur la pétrochimie qui a supplanté la carbochimie à base de charbon. Les trois sources de carbone fossile, le gaz naturel, le pétrole et le charbon, sont simultanément à la base des systèmes énergétiques et de l'industrie chimique. Ces trois ressources font l'objet de technologies différentes, en raison des caractéristiques initiales de ces trois matières.

La spécificité de ces procédés chimiques est de partir de molécules de base  $\text{CH}_4$  (gaz naturel),  $-\text{C}$  (charbon), ou  $\text{C}_n\text{H}_m$ , n pouvant atteindre 50 (pétrole). Dans ce dernier cas, les molécules sont

essentiellement de nature paraffiniques ou naphthéniques (quasiment pas d'oléfiniques ou d'aromatiques sauf pour ces derniers, dans la fraction la plus lourde avec des polyaromatiques condensés). Le point commun à ces trois filières est que la première étape est toujours un fractionnement moléculaire, parfois suivi par une simplification moléculaire. Le gaz naturel, la ressource la plus simple, ne comporte qu'un fractionnement.

Pour le pétrole, le raffineur dispose d'une palette d'options assez large pour adapter sa production à la demande, mais la mise en œuvre est :

- Soit très dépendante des conditions économiques prévalant sur les marchés pétroliers (le raffinage, dont les marges sont très volatiles et ont été souvent faibles, est le « parent pauvre » des opérateurs pétroliers dans un contexte de compétition internationale forte).
- Soit directement la conséquence de décisions réglementaires (teneur en aromatiques des essences, teneur en soufre très faible des carburants et maintenant forte réduction de la teneur en soufre des soutes maritimes,...).

### 3.1.1. Energies

A l'échelle mondiale, **deux défis énergétiques** se dessinent : (i) accomplir une défossilisation des systèmes énergétiques et (ii) assurer des approvisionnements énergétiques fiables à des prix raisonnables. La biomasse peut contribuer à répondre au premier défi, mais il est essentiel pour cela de tenir compte du second.

La demande énergétique est de deux ordres :

- Une demande de **combustibles solides**, où le bois-énergie (ou bois de feu) est une solution technologique rencontrée dans de nombreux pays.
- Une demande de **carburants** pour les moyens de transports.

Dans le bouquet énergétique, les énergies carbonées sont des formes de stockage qui diffèrent entre elles par la densité énergétique. Pour illustration, 1 tonne équivalent pétrole (tep) équivaut à 1,43 tonne équivalent charbon, 4,46 m<sup>3</sup> de bois, 1,96 m<sup>3</sup> d'éthanol, 1 110 m<sup>3</sup> de gaz naturel, 41,848 GJ ou encore 11 600 kWh.

En 2004, les énergies renouvelables mondiales ont représenté 13,1 % des énergies primaires (production totale d'énergie primaire mondiale de 11 059 Mtep). Les combustibles et déchets (97 % de biomasse) ont représenté 79,4 % du total des énergies renouvelables, suivis par l'énergie hydraulique (16,7 %).

En France, d'après l'Inventaire Forestier National (2008), la production de la forêt par accroissement naturel représente environ 100 Mm<sup>3</sup> par an, soit 22,4 Mtep. L'utilisation du bois pour l'énergie (dont le bois de feu) a été de 8 Mtep en 2008.

Pour les pays en voie de développement comme l'Afrique, 80 % de l'énergie provient du bois. Dans le monde, d'après la FAO, environ 40 % du bois est consommé en bois de feu (FAO Food and Agriculture Organization, 2009).

Dans le scénario de référence de type « Business as usual » de l'Agence Internationale de l'Energie (2008), la demande mondiale en énergie primaire double sur la période 2005-2050 et passe de 11 730 Mtep à plus de 23 000 Mtep. L'énergie fossile représente 84 % du bouquet énergétique mondial en 2050 avec une forte mobilisation du charbon, même si les énergies renouvelables augmentent le plus rapidement. Dans ce scénario, en 2050, la biomasse représenterait 2 150 Mtep, soit 9 % de la

demande d'énergie primaire et serait principalement utilisée sous la forme de biomasse traditionnelle et, dans une moindre mesure, pour la production de chaleur et d'énergie.

Cependant, dans les différents scénarios à 2050 réalisés par l'AIE, la demande énergétique mondiale varie de 23 000 Mtep dans le scénario « Business as usual » à 16 000 Mtep pour les scénarios de réduction des émissions de gaz à effet de serre (Bluemap et Actmap) où des innovations radicales en termes d'efficacité énergétique sont mises en place dans tous les secteurs d'activités.

Deux facteurs sont particulièrement importants pour le développement des bioénergies :

- L'évolution des politiques publiques en lien avec les dynamiques des controverses, les évolutions des attentes sociétales et les enjeux géostratégiques.
- Le prix des énergies fossiles qui conditionne la rentabilité économique de ces filières.

### 3.1.1.1. Combustibles

La production d'énergie à partir de turbines ou de groupes électrogènes, le chauffage domestique, la production de chaleur à usage industriel sont autant d'applications qui sont déjà consommatrices de composés ex-biomasse, sous forme de combustibles. Pour ces applications, les produits solides (bois, déchets), les produits liquides ou gazeux (tous les produits précédemment décrits avec des critères de sélection légèrement différents) sont envisageables. On peut considérer que toutes les solutions d'alternatives liquides ou gazeuses sont déjà cernées. C'est donc le bois et les résidus agricoles, en tant que combustibles, qu'il faudra ici détailler.

Un combustible est une matière qui, en présence d'oxygène et d'énergie, peut se combiner à l'oxygène (qui sert de comburant) dans une réaction chimique générant de la chaleur. La plupart des matériaux d'origine organique sont des combustibles.

Tableau 2 : propriétés physiques des principaux carburants et combustibles

Etat physique	Composé	PCI (KJ/kg)	Masse volumique	T° ébullition	Etat d'oxydoréduction
liquide	hydrogène	242,7	67,8 kg/m <sup>3</sup>	-252,8	
liquide	méthanol	19,9	0,8 g/mL	65	-2
liquide	éthanol	28,8	0,8 g/mL	79	-2
liquide	butanol	33,1	0,78	82	-2
liquide	propanol	30,7	0,8	98	-2
	méthane	50	0,68 kg/m <sup>3</sup>	-161	-4
	propane	46		-42,1	-2,6
	butane	46	600 kg/m <sup>3</sup> à 0°C	-0,5	-2,5
liquide	vegetable oil	40			-1,75
liquide	essence	47,3			
liquide	gazol (diesel)	44,8	0,83 - 0,86		
solide	bois	15	0,5 - 0,85	-	0
solide	charbon	15-25	1,4 - 17	-	-1
	paraffines longues	44	0,9	46-68	-2
liquide	benzène	40	0,87	80	-1

Les composés de la biomasse (bois, copeaux ou granulés de bois, pailles et autres fractions de la biomasse) présentent cette propriété. Les principaux avantages de la biomasse sont (i) une large

répartition géographique des ressources à la surface du globe, accrue par la prise en compte des déchets agricoles et urbains ; (ii) une décarbonisation du système énergétique. Parmi les facteurs limitants de la biomasse, il convient de citer la teneur en eau, résultant soit de la récolte d'un organe avant dessiccation, soit de la récupération d'une fraction au cours d'un processus technologique employant l'eau comme milieu vecteur.

Le charbon et le bois présentent des analogies dans les technologies disponibles pour leurs usages énergétiques, ce qui permet de bénéficier des innovations technologiques par transfert, voire d'envisager des valorisations mixtes charbon-biomasse (Tableau 3).

Tableau 3 : transferts de technologie des procédés thermochimiques de combustion entre les ressources fossiles et renouvelables.

Technologie	Produits
Combustion en présence d'oxygène, à pression atmosphérique	Chaleur et vapeur d'eau. La bioélectricité provient actuellement de la cogénération, par production simultanée d'électricité et de chaleur.
Carbonisation 400°C, plusieurs jours	Charbon de bois, charbon actif Bois torréfié
Pyrolyse basse température 8h, 500°C, absence d'oxygène	Huiles et charbon de bois
Pyrolyse Haute température Absence d'oxygène	Gaz, méthane
650-1200°C	Le syngaz a été utilisé directement dans un moteur à combustion interne mais cette solution n'est quasiment plus concevable aujourd'hui. Il sert à produire de l'hydrogène et du méthanol, mais il est surtout converti <i>via</i> le procédé Fischer-Tropsch en carburants de synthèse (CtL, BtL pour la production de gazoles et de carburéacteurs).

### Verrous et questions de recherche

L'utilisation énergétique de la biomasse en combustible rencontre **3 verrous**:

- La production de goudrons formés au cours de la pyrolyse, étape primaire de tous les procédés thermochimiques, et qui se retrouvent dans tous les effluents gazeux sous forme de HAP gazeux, aérosols ou liquides. Leur élimination est problématique : étudier les mécanismes de formation des goudrons à partir des lignines, pour une sélection adaptée des biomasses à mettre en œuvre.
- La production importante de cendres et poussières dues à la présence de matières minérales dans la biomasse (1 à 6 % pour les matières ligneuses). Les cendres composées essentiellement de carbonate de sodium et de carbonate de potassium suscitent après la combustion des opérations de manipulation. La présence de silice, notamment chez les plantes annuelles et dans les résidus agricoles, peut également constituer une contrainte forte vis à vis des procédés thermochimiques : maîtriser la teneur et la nature des matières minérales.
- La faible efficacité des combustions traditionnelles (bois de feu) pouvant descendre jusqu'à 10 % : améliorer l'efficacité énergétique des procédés de combustion.

### 3.1.1.2. Biocarburants

Chaque carburant est adapté à un type de moteur et doit répondre à une gamme de spécificités techniques étroites. En outre une grande partie de ces carburants sont utilisés pour le transport, ce qui induit de rendre disponibles ces biocarburants sur des zones géographiques très larges pour ne pas obérer les capacités des moyens de transport ! Le corollaire est que **les procédés d'obtention des carburants sont convergents** : à partir de différentes matières premières, une famille réduite de molécules doit être obtenue par la mise en œuvre de procédés adaptés dans cet objectif qualitatif.

Toutes les solutions de biocarburants vont bénéficier d'une distribution facile, pouvant profiter de l'infrastructure déjà en place, sans modification ni investissements particuliers.

#### 3.1.1.2.1. Transformation en gaz de synthèse

Constitué d'hydrogène ( $H_2$ ) et de monoxyde de carbone (CO), le gaz de synthèse (syngaz) est aujourd'hui produit industriellement surtout à partir de gaz naturel mais aussi à partir de résidus pétroliers, de charbon et dans une moindre mesure de biomasse. S'il y a séparation du CO ou conversion du CO en  $H_2$ , l'hydrogène qui en résulte est utilisé tel quel ou sert d'intermédiaire pour la production d'ammoniac. Sans étape de séparation/conversion du CO, le gaz de synthèse sert entre autres comme intermédiaire à la production de méthanol, d'autres alcools ou de carburants de synthèse (Figure 2).

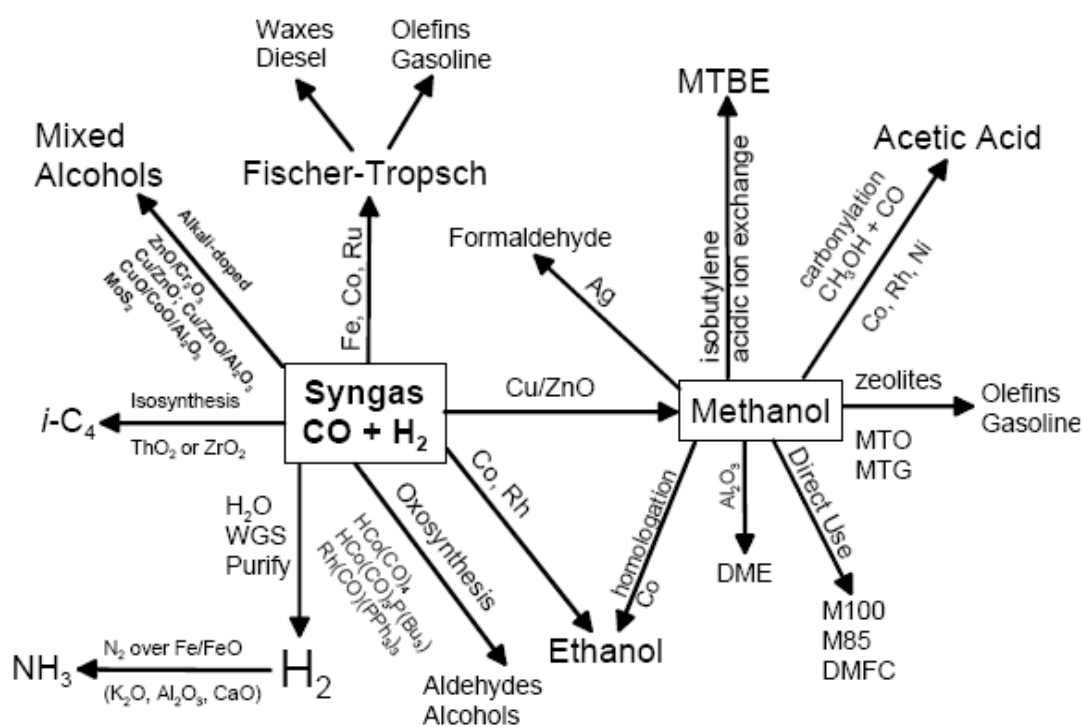


Figure 2 : produits dérivés du gaz de synthèse (syngaz)

La gazéification est le procédé thermo-chimique qui permet de produire le gaz de synthèse à partir de la biomasse et d'un réactif gazeux tel que l'air, l'oxygène ou la vapeur d'eau. La transformation a lieu à haute température ( $800-1000^\circ C$ ) et généralement à pression atmosphérique ou moyenne pression. Les gazéificateurs de biomasse opèrent soit en lit fixe, soit en lit fluidisé plus performant et acceptant une grande diversité de biomasse, soit en lit mobile. Parallèlement, outre les principaux produits  $H_2$  et  $CO$ ,



d'autres produits gazeux (CH<sub>4</sub>, hydrocarbures plus lourds, CO<sub>2</sub> mais aussi NH<sub>3</sub>, gaz soufrés ou chlorés, NO<sub>x</sub>) et des produits solides (goudrons, charbon et poussières) sont formés. La voie la plus simple pour apporter la chaleur nécessaire au gazéifieur consiste à utiliser l'air comme agent de gazéification et ainsi à brûler partiellement la biomasse. Toutefois, du fait de la grande teneur en azote dans l'air, la valeur calorifique du gaz produit est alors faible. L'utilisation d'oxygène pur est très efficace mais conduit à un coût total du procédé élevé.

L'enchaînement de procédé concernant la gazéification de biomasse et sa valorisation en produits biosourcés est décrit de manière simplifiée dans le schéma ci dessous :

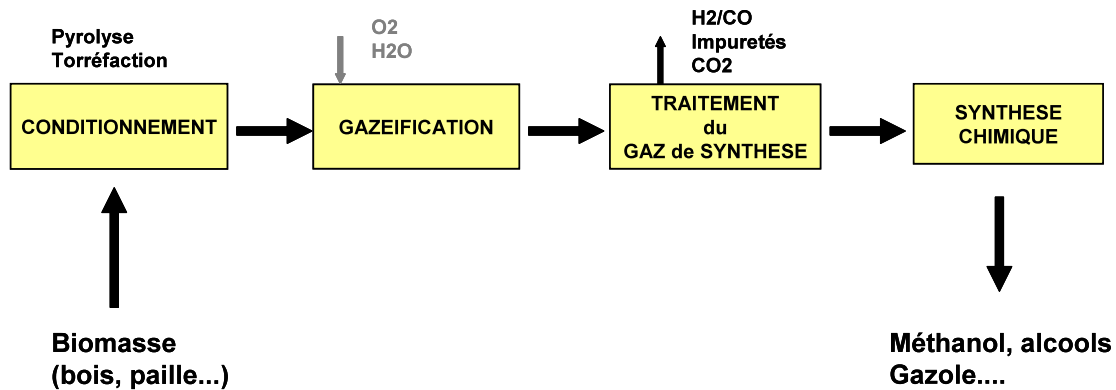


Figure 3 : étapes de la transformation de la biomasse en syngaz

### 3.1.1.2.2. Le traitement du gaz de synthèse

Le gaz de synthèse issu du gazéifieur doit être adapté à la réaction de synthèse souhaitée : méthanol, éthanol, etc. Il s'agit d'épurer le gaz de ses impuretés, mais aussi d'augmenter le ratio H<sub>2</sub>/CO et d'abaisser le CO<sub>2</sub>. Nous retiendrons les principales étapes suivantes : la filtration, la réaction de « Water Gas Shift », le lavage et enfin la captation (filtrage ultime).

En sortie du gazéifieur, la nature et la quantité des impuretés possibles peuvent varier selon la composition de la biomasse (bois ou paille) et selon la technologie de gazéification. Ce sont des particules solides, des produits organiques, des composés azotés, soufrés, des halogénures, des métaux notamment alcalins. Même en très faibles quantités, ces impuretés sont des poisons des catalyseurs nécessaires pour la synthèse chimique. Ils peuvent aussi être des agents corrosifs des installations.

La filtration permet d'éliminer les particules solides, carbonates, oxydes réfractaires, particules ou aérosols d'alcalins. Les technologies à mettre en œuvre sont connues pour certains composés mais des démonstrations restent à réaliser pour s'assurer de l'élimination correcte de certains d'entre eux, notamment le sodium et le potassium.

La réaction de « Water Gas Shift »,  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ , permet de convertir une partie du CO contenu dans le gaz de synthèse en H<sub>2</sub> afin d'obtenir un ratio H<sub>2</sub>/CO correct. C'est une réaction catalytique qui, selon le catalyseur utilisé, peut également permettre d'hydrolyser une partie des composés azotés et soufrés.

Le lavage peut se réaliser par l'intermédiaire d'eau, d'amines, de méthanol ou d'autres solvants. Il s'agit d'éliminer les acides de type HCl, HF, HCN, H<sub>2</sub>S ainsi que NH<sub>3</sub> et COS. Enfin, des masses de captation,

introduites en quantité suffisante, vont éliminer les dernières traces de polluants gazeux en vue d'obtenir un gaz de synthèse aux spécifications de la réaction souhaitée.

Le gaz de synthèse est utilisé comme intermédiaire réactionnel, notamment pour la réaction de Fischer-Tropsch, qui permet de produire des analogues d'hydrocarbures (carburant diesel, kérosène) pour la production d'électricité (moteur à gaz + alternateur) et éventuellement de chaleur. Il peut aussi être utilisé comme substrat de fermentation : cette voie biologique alternative est décrite en détail dans la tâche 4.

Parmi les carburants alternatifs aux carburants pétroliers le diméthyléther (DME) et le gazole Fischer-Tropsch sont ceux qui suscitent le plus d'intérêt aujourd'hui. Découvert en 1923, la synthèse de gazole FT a été jusqu'à présent essentiellement mise en œuvre dans des conditions de pénurie de produits pétroliers (guerres, embargos, chocs pétroliers). La France est impliquée dans cette technologie avec deux projets de démonstrateurs : BioTfuel et Gaya.

Le gazole issu de ce procédé est attractif pour la formulation des biocarburants car il ne contient pas de soufre, pas de composés aromatiques et a un indice de cétane élevé, d'où une réduction des émissions d'hydrocarbures imbrulés et de particules de près de 50 %. En revanche sa production est pénalisante puisque très consommatrice d'énergie. Cette logique est déjà présente dans les biocarburants. Le tableau 4 regroupe les différentes énergies ex biomasse avec les types d'utilisation dans le transport, associées aux types de ressources et au niveau de maturité évalué à ce jour. Demain, le spectre d'usage s'élargira, tout d'abord avec l'aéronautique et la traction off-road, et on peut aussi envisager des applications ferroviaires et marines. Pour chacune de ces applications, les exigences techniques et de qualité des produits sont déjà bien cernées ou le seront rapidement, avec des caractéristiques et des critères de sévérité propres à chaque application.

Tableau 4 : différentes énergies ex biomasse avec les types d'utilisation dans le transport, associées aux types de ressources et au niveau de maturité évalué à ce jour.

Produits	Niveau de développement	Ressources	Type d'application
Alcools : Éthanol 1ère Génération Éthanol 2ème Génération Butanol Alcools supérieurs	Mature En développement En développement En développement	Sucre, amidon Lignocellulose, déchets Lignocellulose, déchets Lignocellulose, déchets	Routier, moteur thermique Routier, moteur thermique Routier, aérien Routier, aérien
Hydrocarbures : BtL, WtL  HVO	En développement  Certains process identifiés	Lignocellulose, déchets  Huiles végétales, triglycérides, algues	Routier, aérien, stationnaire  Routier, stationnaire, aérien
Huiles de pyrolyse	En développement	Ligno-cellulose, déchets	Énergie, routier
Huiles végétales  Triglycérides	Connu  En développement	Plantes oléagineuses, mais impact de l'origine clé  Substrat variable	Moteur diesel ancien, chauffage, gros moteurs diesel rustiques, énergie, maritime-fluvial  A préciser en fonction des produits
Ester d'acides gras	Mature	Plantes oléagineuses, mais impact de l'origine	Routier, stationnaire, ferroviaire, aérien peu

		important, algues	probable,
Acétals	Prospectif	Lignocellulose, coproduits	Routier, aérien
Éther DME ETBE Autres	Mature ou prospectif	Dépend de l'éther	Routier, énergie, domestique
H <sub>2</sub>	Prospectif	Sucre, algues, Lignocellulose	Routier, aérien, stationnaire (PAC)
Biogaz	Mature mais à optimiser	Déchets, lignocellulose, algues	Routier, stationnaire
Autres : furane, dérivés d'acide succinique, lévulinique, ...	A optimiser ou à développer		Routier, aérien

Dans ce tableau, n'apparaissent clairement que le transport routier et le transport aérien. Dans les deux cas, la diversification de la ressource est bien entendu un critère dominant mais l'enjeu d'une réduction drastique de la contribution du transport routier et aérien aux émissions de gaz à effet de serre fait que ce critère devient prédominant. Ainsi, toute filière ex-biomasse qui sera identifiée devra montrer un bilan énergétique et un bilan des émissions de gaz à effet de serre favorable du champ au réservoir. Notons que dans la récente directive européenne (2009/28/EC) concernant l'utilisation des énergies renouvelables, les filières identifiées sont caractérisées par des critères de durabilité.

A l'instar de ce qui sera décrit pour les synthons, les molécules présentes dans les biocarburants ont des spécificités qui s'étendent bien au delà du seul PCS. Le monde du transport a des exigences de qualité rigoureuses afin de permettre une utilisation instantanée offrant toutes les garanties de sécurité, d'agrément et d'impact sur les rejets polluants, mais aussi de permettre une utilisation pérenne sans dégradation des points précédents. Par exemple, aujourd'hui le biodiesel (esters méthyliques d'acides gras) et le bioéthanol doivent répondre à des spécifications précises (en Europe, respectivement EN14214 et EN15376) pour offrir les minima de qualité que requiert une utilisation sur moteur. Une réflexion européenne vient d'être engagée au sein du Comité Européen de Normalisation (CEN) afin de légiférer sur les caractéristiques des BtL. On signalera que ces spécifications sont régulièrement révisées, soit pour tenir compte d'une modification des modes d'utilisation (par exemple, accroissement du taux d'incorporation dans le pool carburant), soit pour intégrer une évolution technologique rendue nécessaire dans un contexte donné. Le tableau 5 regroupe les contraintes du transport routier et aérien et présente une analyse critique du potentiel de chaque filière.

Tableau 5 : avantages et inconvénients des différentes filières selon les critères considérés

Critères	Avantages	Inconvénients
Critères de combustion indices d'octane indice de cétane combustion turbine	Alcools, biogaz, biodiesel, BtL, WtL, HVO Biogaz, biodiesel, BtL, WtL, HVO	
Emissions de polluants	Alcools : CO, HC Biodiesel : PM, CO, HC DME : PM BtL, WtL, HVO : PM, HC Biogaz : HC, CO H <sub>2</sub> : CO, HC	Alcools : aldéhydes (alcools, acides) Biodiesel : NOx  HAP (?)  H <sub>2</sub> : NOx à voir
Stabilité au stockage, à l'oxydation	BtL, WtL, HVO	Huiles végétales, Biodiesel, huiles de

		pyrolyse,
Tenue au froid	Alcools légers, alcools supérieurs jusqu'à C6	Alcools lourds, biodiesel, Huiles végétales
Distillation et volatilité	BtL, WtL, HVO, alcools lourds	DME, huiles végétales, alcools légers, huiles de pyrolyse
Impuretés (métaux, structures chimiques)		Huiles végétales, huiles de pyrolyse
Contenu énergétique	BtL, WtL, HVO	Tous les composés oxygénés à des degrés divers Les produits gazeux doivent faire l'objet d'une analyse spécifique
Compatibilité avec les autres carburants	BtL, WtL, HVO	
Compatibilité avec matériaux	BtL, WtL, HVO	Alcools, biodiesel
Encrassement	BtL, WtL, HVO Biogaz, H2, DME	Huiles végétales, huiles de pyrolyse, biodiesel

Les critères ci-dessus sont ceux qui orienteront les choix des filières en priorité, dans un contexte de croissance forte de la consommation. En effet, en France, c'est une consommation de 4 Mtep en 2020, correspondant aux 10 % PCI de biocarburants pour le transport routier, dictée par la directive européenne 2009/28/EC, qui est attendue. Par ailleurs, le transport aérien qui va être très prochainement confronté aux contraintes des marchés CO<sub>2</sub> envisage l'utilisation de biocarburants : un objectif de 10 % en 2020 pourrait être avancé.

### Verrous et questions de recherche

Certaines molécules aux caractéristiques attractives n'ont pas encore émergé et une réflexion importante mérite d'être menée afin de savoir si ces molécules peuvent être produites à partir de biomasse ou bien peuvent résulter d'une chimie verte.

Des structures attrayantes sont attendues soient en tant que bases, soient en tant qu'additifs :

- Les éthers autres que ceux déjà cités
- Les esters
- Les acétals
- Les cétones
- Les furanes

Il faut explorer des voies combinant procédés biotechnologiques et/ou chimiques pour relier ces structures et les sources de biomasse conventionnelles et nouvelles (algues, Jatropha par exemple).

#### 3.1.2. Chimie et synthons

Les trois sources de carbone fossile alimentent doublement l'industrie chimique en énergie pour les procédés et en base carbonée pour constituer le squelette des molécules. Le besoin en énergie pour la chimie est consubstantiel aux réactions mises en œuvre à haute température et aux changements de phase associés. Il convient de souligner qu'une partie de la chimie repose sur d'autres atomes : silicium, soufre, sels, métaux, azote, etc.

Les produits chimiques, hors énergie, sont issus de 132 Mtep de gaz naturel, 363 Mtep de pétrole et 4 Mtep de charbon, auxquels il faut rajouter 235 Mtep dans l'industrie et 114 Mtep dans les productions électriques et énergétiques (source AIE). L'industrie chimique représente ainsi environ 500 Mtep

utilisées annuellement comme matières premières, soit 9 % de la demande mondiale de pétrole, 3 % de la demande en gaz et seulement 0,1 % de la demande en charbon. Les asphaltes ne sont pas considérés dans cette analyse. En 2009, le chiffre d'affaires de la chimie au niveau mondial a été estimé à 1 320 milliards d'euros, dont 0,5 % en chimie fine, 21 % en polymères, 33 % en spécialités chimiques et 42 % en intermédiaires (HCCA Haut Conseil de la Coopération Agricole Section économique 2009).

L'industrie chimique dispose d'une large gamme de produits de base à partir desquels sont produites des molécules complexes (aldéhydes, cétones, amines, molécules polyfonctionnelles, etc.) et des intermédiaires de synthèse qui conduiront aux produits finis. Une grande diversité caractérise les structures utilisées. Il existe un grand nombre de molécules récurrentes dans l'industrie chimique qui sont appelées synthons, dont un grand nombre pourrait être produit à partir de biomasse. A l'inverse des carburants, **la stratégie technologique des chimistes est divergente** : à partir du nombre le plus faible de synthons, comment couvrir la gamme des produits chimiques attendus ?

Dans les années 90, les 50 produits à plus fort tonnage de production (USA, 1991) présentés dans le tableau 6, soulignent la diversité des structures. La situation est assez voisine aujourd'hui. Les composés carbonés sont en gras.

Tableau 6 : produits chimiques classés par tonnage de production (USA, 1991)

1	Acide sulfurique	18	CO <sub>2</sub>	35	Oxyde de propylène
2	Azote	19	Méthyltertiobutyléther	36	Phénol
3	<b>Ethylène</b>	20	<b>Ethylbenzène</b>	37	<b>Butadiène</b>
4	Oxygène	21	<b>Styrène</b>	38	<b>Noir de carbone</b>
5	Ammoniac	22	<b>Méthanol</b>	39	<b>Acrylonitrile</b>
6	Chaux	23	<b>Acide téréphtalique</b>	40	<b>Acétate de vinyle</b>
7	Acide phosphorique	24	<b>Toluène</b>	41	Sulfate d'ammonium
8	Soude	25	<b>Formaldéhyde</b>	42	<b>Cyclohexane</b>
9	Chlore	26	<b>Xylènes</b>	43	Oxyde de titane
10	<b>Propylène</b>	27	Acide chlorhydrique	44	<b>Acétone</b>
11	Carbonate de sodium	28	<b>p-xylène</b>	45	Silicate de sodium
12	<b>Urée</b>	29	<b>Oxyde d'éthylène</b>	46	<b>Acide adipique</b>
13	Acide nitrique	30	<b>Ethylène glycol</b>	47	Sulfate de sodium
14	Nitrate d'ammonium	31	<b>Sulfate d'ammonium</b>	48	<b>Alcool isopropylique</b>
15	<b>1,2 dichloroéthane</b>	32	<b>Cumène</b>	49	Chlorure de calcium
16	<b>Benzène</b>	33	Potasse	50	<b>Caprolactame</b>
17	<b>Chlorure de vinyle</b>	34	<b>Acide acétique</b>		

Le Département américain de l'énergie (DoE) a piloté plusieurs études, avec des rapports parus entre 2004 et 2008, concernant l'analyse de synthons potentiellement accessibles à partir de biomasse. Certains de ces rapports<sup>23,24</sup> constituent d'excellentes références qui à l'heure actuelle restent incontournables. Notons cependant que cette approche ne doit pas fermer le champ des possibles aux seules connaissances actuelles : de nouveaux synthons peuvent aussi conduire à des produits

<sup>23</sup> Werpy, T., and G. Petersen. 2004. Top Value Added Chemicals from Biomass: Volume I - Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas. Pp. 76: U.S. Department of Energy.

<sup>24</sup> Bozell, J.J., J.E. Holladay, D. K. Johnson, and J.F. White. 2007. Top Value-Added Chemicals from Biomass Volume II - Results of Screening for Potential Candidates from Biorefinery Lignin Pp. 87: U.S. Department of Energy; Northwest National Laboratory (PNNL); National Renewable Energy Laboratory (NREL).

valorisés sur de nouveaux marchés. Par exemple, il est possible d'obtenir à partir des lignines une grande diversité de composés aromatiques complexes dont la structure est très proche de celle des monomères de lignines, et qui sont difficiles à produire par les voies classiques de la pétrochimie. Les applications de tels composés doivent encore être développées, même si pour les chimistes, l'intérêt de tels synthons dans sa boîte à outils ne fait aucun doute. Ces questions étant considérées comme relevant du domaine compétitif par les industriels, il n'y a pas eu de réactualisation collective de ces travaux au niveau de l'ARP.

A titre d'illustration des travaux menés par le DoE à partir d'un inventaire de plus de 300 molécules d'intérêt susceptibles d'être produites à partir des sucres ex-biomasse, une première sélection a permis de choisir les molécules listées dans le tableau 7, suivie d'une seconde sélection menant au choix de 30 molécules présentées selon une classification par nombre d'atome de carbone.

Tableau 7 : Top 30 de l'étude du DoE (Werpy et Peterson<sup>25</sup>)

Nombre d'atome de carbone	Molécules considérées
1	monoxyde de carbone en mélange avec l'hydrogène (syngas)
2	aucun
3	glycérol, acide hydroxypropionique, acide lactique, acide malonique, acide propionique, acide succinique, thréonine
4	acétone, acide aspartique, acide fumarique, 3-hydroxylactone, acide malique, acide succinique, thréonine
5	arabinitol, furfural, acide glutamique, acide itanonique, acide lévulinique, proline, xylitol, acide xylonique
6	acide aconitique, acide citrique, acide dicarboxylique 2,5 furanique, acide glucarique, lysine, lévoglucosane, sorbitol

Les acides gras ne sont pas cités dans ce tableau et méritent largement d'être intégrés dans le récapitulatif des molécules d'intérêt.

Dans la suite de ce document, les différentes substances d'intérêt pour l'industrie chimique et le secteur de l'énergie seront abordées par leurs propriétés physiques sur la base de leurs contributions existantes ou potentielles aux fonctions d'usage, en vue de satisfaire les besoins matériels de la société (Figure 4).

<sup>25</sup> Werpy, T., and G. Petersen. 2004. Top Value Added Chemicals from Biomass: Volume I - Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas. Pp. 76: U.S. Department of Energy.

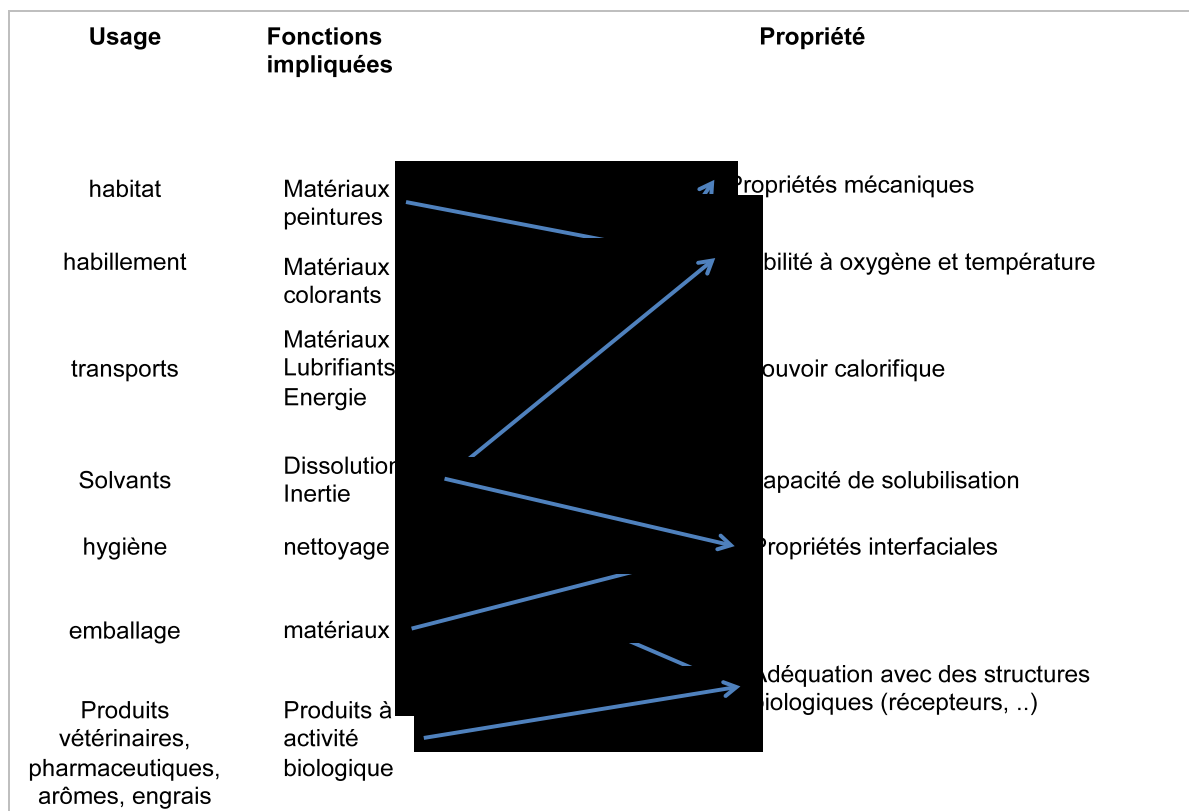


Figure 4 : correspondance propriétés d'usage et propriétés physico-chimiques pour les produits issus du carbone renouvelable.

### 3.1.3. Matériaux

Ce terme désigne ici des matières capables d'apporter des propriétés physiques et sélectionnées en vue d'un usage défini. Les propriétés mécaniques ont reçu le plus d'attention. Les propriétés chimiques (tenue aux solvants, résistance à l'hydrolyse, au vieillissement sous UV, odeur, etc.) et les propriétés d'usage seraient également à prendre en compte (tenue au feu, propriétés diélectriques, etc.) De même, il serait nécessaire que le moulage des matériaux issus de la biomasse soit compatible avec les outillages et procédés existants. On peut envisager une variante dans l'origine des matières premières, mais il est beaucoup plus difficile d'envisager un complet remaniement de l'outil industriel à cause des coûts d'investissement majeurs qui seraient engendrés.

Les principaux déterminants de la structure d'un matériau à ses différentes échelles et donc de ses propriétés mécaniques, sont ses éléments constitutifs et leur organisation, en particulier le niveau microstructural, tel qu'il résulte des procédés de mise en forme.

Les principales classes de matériaux sont les métaux, les céramiques, les polymères et les matériaux naturels. Seuls seront considérés dans ce chapitre les polymères et les matériaux naturels qui peuvent être produits à partir de carbone renouvelable.

Les matériaux à base de carbone renouvelable ont généré des dénominations que l'on peut classer ainsi :

- Polymères bio-sourcés : polymères dont le monomère est issu de ressources renouvelables.
- Biopolymères : polymères naturels dont la ressource est renouvelable.
- Matériaux biosourcés : terme générique englobant tous les matériaux d'origine biologique, polymères et composites.

- Agromatériaux : matériaux majoritairement d'origine agricole.
- Biodégradable : substance qui peut, sous l'action d'organismes vivants, se décomposer en éléments divers dépourvus d'effet dommageable sur le milieu naturel (définition selon la norme EN 13432).

Il convient de souligner que l'origine biologique d'un matériau à base de carbone renouvelable ne préjuge nullement de sa biodégradabilité, des modifications chimiques intenses ou d'une encapsulation physique pouvant bloquer toute possibilité de biodégradation. Inversement des polymères issus du carbone fossile peuvent présenter ce comportement.

### 3.1.3.1. Les polymères

Les polymères issus des dérivés du pétrole sont souvent appelés résines. Les produits finaux (films, objets tridimensionnels, etc.) résultent de la combinaison d'un ou plusieurs polymères ou additifs, ensuite préparés dans une forme définitive (d'où l'appellation plastiques). Les « additifs » en science des polymères concernent les composés ajoutés au mélange initial de polymères pour en modifier les propriétés. Deux difficultés importantes pour appréhender les propriétés d'usage d'un polymère, liées aux propriétés finales, sont la forte influence (i) de la structure moléculaire (distribution des masses, linéarité, présence de substituant, (ii) des plastifiants, adhésifs et autres additifs incorporés. Par exemple, le polyéthylène (PE) va répondre à des applications simples, comme les sacs à provisions jetables, mais aussi les canalisations souterraines de gaz et d'eau avec le PE de densité moyenne MDPE, et enfin les prothèses avec le polyéthylène appelé High Molecular Weight UHMWPE. L'emploi des additifs est réexaminé actuellement avec la mise en œuvre de la directive REACH.

Parmi les principaux polymères utilisés, le PVC, dont le précurseur est un monomère classé CMR, se prête à un incroyable éventail d'applications (emballages, isolation, vêtements,...). Les autres polymères auront des propriétés adaptées à des cibles plus étroites : la résistance mécanique, la conductivité électrique, l'électro-fluorescence, la stabilité thermique, etc.

Les élastomères présentent un comportement élastique sans aucune plasticité : ils supportent de très grandes déformations avant rupture. Ces matériaux élastomères, comme les pneumatiques, sont souvent à base de caoutchouc naturel et de caoutchouc synthétique. Les élastomères d'usage général, insaturés, sont le caoutchouc naturel (de sigle NR) issu du latex collecté dans les plantations d'hévéas, le « naturel synthétique » ou polyisoprène synthétique (IR) très voisin du NR, le polybutadiène (BR) et le styrène-butadiène (SBR) (copolymère). Les élastomères sont généralement thermodurcissables, après de faibles réticulations des polymères. L'emploi d'agents de réticulation (soufre pour la vulcanisation, peroxydes,...) est la clé de cette réticulation dont la maîtrise est essentielle pour assurer la longévité du comportement élastique.

A ces applications où un seul polymère est présent, il faut ajouter les alliages où deux polymères sont intimement mélangés, les composites avec deux ou plusieurs phases macroscopiques. Le matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles, dont les phases vont fortement interagir (adhésion) en général avec des additifs. Le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas. L'incorporation de fibres (verre, acier ou cellulose) est une voie classique pour améliorer la tenue mécanique. Outre les propriétés d'usage des polymères, un certain nombre de caractéristiques nouvelles sont recherchées, en réponse aux attentes sociétales et industrielles.

Les exigences relatives à l'innocuité des matériaux et additifs se trouvent renforcées par la réglementation REACH. Cette question de la toxicité vaut autant pour les plastiques d'origine



pétrochimique que pour les plastiques issus de la biomasse. Utiliser par exemple des plastifiants d'origine végétale pour flexibiliser un PVC reste une opération très difficile à valoriser au plan environnemental. Il en est de même pour l'ajout d'une matrice issue de bio-ressources dans un composite mettant à profit du styrène monomère. Une conscience écotoxicologique reste très utile pour le développement des bio-plastiques.

L'adoption d'une démarche d'éco-conception et la réglementation (directives 2000/53/CE, 2004/12/CE, 2005/32/CE,...) incitent également à prendre en compte la gestion des produits en fin de vie. La recyclabilité et la réutilisation pour des plastiques de seconde génération doivent être pris en compte. Industriellement parlant, ces questions sont d'actualité et font partie des éléments de décisions. Les propriétés de biodégradabilité doivent être recherchées chaque fois que la fin de vie d'un produit ne peut rentrer dans un contexte de filière, avec un risque d'abandon dans un écosystème. Notons toutefois que pour certains secteurs comme l'électrotechnique, des biopolymères non biodégradables sont demandés pour des applications durables avec une exigence de recyclabilité en fin de vie.

Le marché des polymères est actuellement dominé par 5 familles de produits : polyéthylène (60 %), polypropylène, polyvinylchloride (15 %), polystyrène (7 %) et polyéthylène téréphtalate (8%). En Europe, les principaux secteurs concernés sont l'emballage (38 %), l'habitat (tuyaux et gaines, 21 %), les transports (7 %), l'électronique et l'électricité (6 %). Depuis 1950, le taux de croissance annuel est de 9 %. La production totale est passée de 1,5 millions de tonnes en 1950 à 245 millions de tonnes en 2008. Le recyclage et la valorisation énergétique représentent respectivement 21,3 % et 30 % dans l'UE27. Le recyclage mécanique pose des problèmes de contaminations chimiques croisées. En revanche le recyclage chimique, par décomposition en monomère ou au-delà (pyrolyse, hydrogénation, gazéification et cracking thermique) est en cours de développement malgré des coûts d'industrialisation importants. La biodégradabilité est de ce fait recherchée.

Les biopolymères ne représentent que 0,5 % de l'ensemble de ce marché à l'échelle mondiale, soit 500 000 tonnes/an en 2005, à partir de l'amidon, de la cellulose, du PHA (polyhydroxyalcanoate) et du PLA (acide polylactique) (Festel Capital ; Plastics Europe - Association of Plastics Manufacturers).

Les principales filières de production de matériaux biosourcés peuvent être décrites comme suit :

- Les plus accessibles, l'amidon et la lignocellulose initiale ou transformée.
- La filière des protéines.
- La filière des élastomères.
- La filière des « composites », par exemple des combinaisons pétrochimie/biopolymère (PE/amidon) ou polymère biodégradable synthétique/biopolymère.
- La production des bioplastiques qui pourrait être initiée à partir de matière végétale classique (amidon, fibres, huiles).

Des matériaux issus de monomères dérivés de la biomasse peuvent aussi s'inscrire dans cette catégorie. C'est le cas de l'acide polylactique qui résulte de la polymérisation strictement chimique de l'acide lactique biologique.

Notons que tous les polysaccharides à l'exception de la cellulose, et toutes les protéines ont un **comportement thermoplastique**. Les principales propriétés considérées sont le module de traction, les conductivités électrique et thermique, la sensibilité à l'eau, la porosité et la perméabilité.

A ce jour, les applications courantes de la biomasse sont les suivantes :

- Des applications « traditionnelles » telles que la production de papier, de tissus, d'huiles époxydées, de résines, d'additifs, etc. Ces applications sont aujourd'hui bien établies sur leurs marchés.

Les principaux utilisateurs de ces matériaux biosourcés sont les métiers de l'emballage (37 %), le secteur domestique (sport, loisir, santé, mobilier : 21 %), le BTP (19 %), l'électronique et l'informatique (7 %), l'automobile (7 %), l'industrie lourde (5 %) et l'agriculture (3 %).

- Des applications sur le marché des plastiques, dont 40% des volumes sont dédiés à l'emballage (films, sacs, barquettes, filets, restauration rapide, médecine, automobile, chips de calage, etc.). En 2002, les polymères biodégradables représentaient 0,17 % de ce marché des matières plastiques au niveau mondial, 87 % de ces polymères étant issus de ressources renouvelables. Les bioplastiques semblent correspondre à un marché de niche mais pourraient avoir un potentiel de développement important.
- Des applications dans la filière bois pour la production de profilés de fenêtres, de murs anti-bruit, de panneaux de signalisation.
- Utilisation de dérivés de la farine de bois / PE / PP / PVC ou de fibre de bois / Ciment / plâtre.
- Des applications dans la filière fibres bien que ces fibres soient moins résistantes que le verre (1/10) ou le carbone (1/500). Leurs caractéristiques acoustiques et thermiques sont intéressantes.

Pour certaines de ces utilisations le caractère biodégradable peut être un atout.

Les principaux avantages liés à l'emploi de polymères issus de la biomasse sont :

- La défossilisation de la filière technologique.
- Pour certaines classes de biopolymères, des performances élevées en matière d'hydrophobicité, de perméabilité aux gaz. Le caoutchouc issu de l'hévéa présente de meilleures propriétés d'élasticité et de résilience que le caoutchouc synthétique.
- La biodégradabilité pour les usages sans modification chimique ultérieure ou mélange intime avec un polymère non biodégradable. Toutefois, ce point n'est pas toujours identifié comme un avantage.
- Certains biopolymères montrent une résistance au feu intéressante.

### **Verrous et questions de recherche**

Les problèmes rencontrés sont :

- La sensibilité à l'eau, entraînant une (bio)dégradation ou fragmentation par hydrolyse. Pour des applications de longue durée, la biodégradabilité des matériaux n'est pas nécessairement une qualité recherchée :
  - Etablir les relations entre les structures chimiques et ultrastructures composites, lamellaires, alliages et les mécanismes d'hydratation.
  - Des performances mécaniques moindres que celles des polyoléfines, en particulier concernant la résistance aux chocs, au vieillissement (sur des durées supérieures à 10 ans par exemple) et l'élasticité.
  - Définir l'applicabilité des technologies d'obtention d'alliage, composites, et structures lamellaires pour moduler en particulier les propriétés mécaniques (intensité, durée) et de transport.
- Le recyclage :
  - Améliorer l'aptitude des matériaux élaborés au recyclage
  - Organiser des filières de recyclage pour des matériaux en fin de vie (utilisateur final) ou pour des matériaux bruts (transformateur)
- Les odeurs :
  - Identifier la nature des molécules odorantes
  - Analyser le déterminisme de leur origine
- La réticence des usagers à utiliser des produits dont les matières premières entrent en concurrence avec la filière alimentaire ou dont la production a des effets négatifs sur l'environnement :
  - Disposer d'outils d'éco-conception intégrés et de bases de données publiques

correspondantes pour passer d'une analyse multicritère à une analyse de cycle de vie attributionnelle.

- Mesurer l'acceptabilité sociale des produits bio-sourcés sous l'angle de l'éthique (voir chapitre 5.3)

### 3.1.3.2. Le bois et ses dérivés

Le bois a un statut à part dans cette présentation. C'est un matériau naturellement structuré produit par le xylème secondaire dans les tiges d'arbres (et d'autres plantes ligneuses). C'est le matériau de construction par excellence. De plus, après réduction de la taille ou séparation des fibres, le bois peut donner naissance à différents matériaux. Parmi ces matériaux, on peut citer le papier et les panneaux de fibres et de particules, mais aussi les matériaux composites contenant des particules ou fibres de bois.

La tendance à l'augmentation de la consommation de bois et produits dérivés est de + 0,3 % sur la base des 20 dernières années. La consommation de bois est annuellement de l'ordre de 3,5 milliards de m<sup>3</sup>, dont 1,55 milliards de m<sup>3</sup> pour le matériau bois. Outre l'utilisation de ressources renouvelables, le positionnement des matériaux à base de bois dans l'économie du carbone et leur contribution à la lutte contre le changement climatique est un enjeu tout à fait majeur : la durée de vie élevée de ces matériaux permet une séquestration du carbone biogénique qu'ils contiennent.

Les papiers et cartons représentent un secteur économique à maturité avec des installations qui relèvent de l'industrie lourde avec des cycles longs. La consommation mondiale de papier était de 366 millions de tonnes en 2008. Les estimations évaluent la consommation mondiale de papier à 600 millions de tonnes pour 2020. La consommation de papier par habitant dans les différents pays du globe est fortement corrélée avec le PIB par habitant : le développement de la Chine, de l'Inde et du Brésil conduit donc à une croissance de la demande en pâte à papier. La demande mondiale de papier et de carton augmentera en moyenne de 2,2 % jusqu'en 2015 (soit un peu moins que la croissance économique de 2,9 %).

Le papier est fabriqué à partir de fibres cellulosiques issues de trois matières premières différentes : les plantes annuelles ou résidus agricoles, le bois et les vieux papiers.

Parmi les plantes annuelles, on peut distinguer les fibres nobles, telles le coton, le chanvre ou le lin qui sont plus résistantes en raison de la longueur des fibres et qui sont présentes dans des marchés de niche. Les papiers de coton, par exemple, sont réservés aux usages les plus nobles : aquarelle, billet de banque et travaux d'imprimerie traditionnels.

Les pâtes à papier à base de bois sont principalement produites par deux technologies :

- La pâte (thermo)mécanique est produite par traitement à la vapeur des copeaux qui sont ensuite défibrés à 110-130°C dans un premier raffineur sous pression, puis raffinés dans un second raffineur à pression atmosphérique. Une étape de classage de la pâte peut intervenir à ce stade : les fibres les plus grossières et les bûchettes sont séparées des autres fibres. Les fibres rejetées sont raffinées une nouvelle fois et celles qui sont acceptées sont conservées. La pâte est alors stockée avant d'être éventuellement blanchie.
- Les pâtes chimiques sont obtenues par des procédés consistant à éliminer au maximum les composants autres que les polysaccharides du bois (la lignine et les extractibles) pour ne conserver que la fibre de cellulose contenant également des hémicelluloses. Deux procédés sont utilisés pour cette finalité : au bisulfite (acide) et au sulfate (alcalin), on parle alors de papier kraft. La préparation de la pâte se fait dans de grands lessiveurs à température élevée (100°C - 175°C). Le bois est cuit sous pression en présence de composés chimiques pendant 2h à 5h. Les fibres en sortent souples et

individualisées. Il ne reste plus qu'à les laver, rincer, épurer et éventuellement blanchir.

Le recyclage des vieux papiers représente désormais la troisième source d'approvisionnement pour l'industrie papetière. En France le taux de recyclage du papier est de 58 %.

Les industries des panneaux à base de bois sont reconnues comme un secteur d'importance stratégique pour l'Europe. La production mondiale de panneaux a dépassé les 180 millions de m<sup>3</sup> en 2003. L'Europe contribue à hauteur d'environ 30 % de la production mondiale juste derrière l'Amérique du Nord avec 33 %. En ce qui concerne l'industrie des panneaux de process (particules, MDF et OSB), la France arrive au 2<sup>ème</sup> rang des producteurs européens (derrière l'Allemagne) avec en 2005 une production de 5,7 millions de m<sup>3</sup> (dont 4,7 millions de m<sup>3</sup> pour les panneaux de particules et l'OSB). Cette production, supérieure à la consommation domestique (4,1 millions de m<sup>3</sup>) est assurée par 24 usines détenues par 13 entreprises (certaines étant des filiales du même groupe). Par ailleurs la France est au 1<sup>er</sup> rang européen des exportateurs de panneaux MDF. Les prévisions d'évolution de la consommation des panneaux vont dans le sens croissant et de manière importante dans les années à venir, notamment afin de répondre à la demande des économies en forte croissance des pays émergents (Chine, Inde, Amérique du Sud, etc.). On peut s'attendre à ce que, lorsque le PIB par habitant de ces pays avoisinera celui des pays de l'Europe de l'Ouest, la consommation de fibres végétales (y compris par les panneaux) par habitant sera multipliée par 4. En faisant l'hypothèse conservatoire que cette augmentation du niveau de vie concerne 2 milliards d'habitants, on mesure l'importance stratégique de rester compétitif dans le secteur des produits à base de fibres végétales.

Pour les panneaux à base de bois, la cohésion du matériau est en général assurée par l'adjonction d'une colle. La composition massique moyenne d'un panneau est la suivante : bois 85 %, colle 7 %, eau 7 %, autres produits 1 %. Quelques 15 millions de tonnes de colles à base de formaldéhyde sont ainsi utilisées chaque année dans le monde par les industries du bois dont 6 millions de tonnes en Europe. La majeure partie (environ 90% en volume) est utilisée comme liant dans les panneaux à base de bois dont la fabrication met en jeu 80 à 90 kg de colle par m<sup>3</sup> de panneau. En France, la consommation de colles à base de formaldéhyde par les industries des panneaux à base de bois était ainsi de 300 000 tonnes en 1999 et 450 000 tonnes environ en 2004 soit 50 % d'augmentation sur 5 ans.

Depuis janvier 2006, l'ensemble des producteurs de panneaux de process se sont engagés à produire des panneaux dont la teneur en formol mesurée au perforateur est inférieure à 8 mg pour 100 grammes de panneau. Au-delà de cette mesure à court terme, l'industrie des panneaux en France doit anticiper un éventuel changement de la législation concernant le formaldéhyde afin d'assurer dans le futur une production industrielle respectueuse de l'environnement et de la santé et conserver son leadership.

Les matériaux composites à base de bois (généralement désignés par le sigle WPC, de l'anglais Wood-Plastics Composites) connaissent un grand succès à l'heure actuelle, notamment en Amérique du Nord. La production évaluée aux USA de WPC est de 135 000 tonnes alors que celle du Japon est de 20 000 tonnes et celle en Europe de 50 000 tonnes. La croissance de la production en WPC aux USA est de 50 % par an. La part de l'utilisation des WPC en platelage est à peu près de 50 %. Les WPC ont pris 10 % du marché global des platelages et balustrades en Amérique du Nord, avec une augmentation prévue de 4 % par an. Les prévisions actuelles indiquent que les WPC pourraient prendre bientôt des parts de différents marchés avoisinant 1 milliard d'euros de chiffre d'affaires.

Les applications visées sont non- ou semi-structurelles. Les applications majeures aux Etats-Unis sont dans le domaine de la construction avec des applications limitées en structurel (75 % des applications), dont 50 % sont consacrées au platelage. Le second marché est celui de la menuiserie et de la porte. Le

troisième usage aux Etats-Unis est celui de l'automobile avec 14 % des applications. Les applications futures sont les bardages (3 %) et les palettes (3 %).

### **Verrous et questions de recherche**

Sur ces matériaux traditionnels, de nombreuses pistes d'amélioration restent encore à explorer :

- Mise en œuvre d'une production de bois durable en phase avec le développement économique d'une nouvelle filière basée sur la chimie du végétal et les défis liés au changement climatique, en prenant en compte les risques majeurs dans la gestion des peuplements et les relations entre fonction de production et autres fonctions de la forêt.
- Conception et mise en œuvre des stratégies de sélection variétale pour des critères de croissance et de qualité favorisant l'adaptation aux évolutions climatiques en y intégrant les biotechnologies.
- Optimisation des chaînes de valorisation du bois, depuis la ressource jusqu'aux industries de transformation avec un accent plus marqué sur les technologies permettant une traçabilité parfaite depuis la croissance de l'arbre en passant par la transformation et les produits finaux.
- Développement des techniques innovantes de transformation de la matière première en vue de proposer de nouveaux produits en bois et à base de bois (non déstructurés) jusqu'aux échelles pilote/démonstrateur.
- Maîtrise des performances des matériaux à base de bois pour la construction (mécaniques, énergétiques, acoustiques, risques naturels et artificiels tels les séismes ou les incendies).
- Optimisation de la durabilité (naturelle et conférée) du bois, des matériaux à base de bois et des systèmes constructifs vis-à-vis des agents biotiques, abiotiques et du feu.
- Développement de procédés propres permettant la valorisation de toutes les fractions ex-biomasse avant la production de fibres, particules, etc. (le concept de bioraffinerie est développé dans la tâche 9 de l'ARP VegA).
- Valorisation des molécules issues de matériaux lignocellulosiques par le développement de nouveaux produits et procédés.
- Approfondissement de la connaissance de nouveaux produits et procédés à base de matériaux lignocellulosiques en particulier des outils de caractérisation type contrôle non-destructif (CND) à haut débit, pour une insertion dans le pilotage des lignes.
- Développement d'éco-technologies pour améliorer la performance environnementale (y compris énergétique) des chaînes de transformation quels que soient les procédés de transformation du bois.
- La réticence des usagers à utiliser des produits dont la production peut avoir des effets négatifs sur l'environnement.
- Disposer d'outils d'éco-conception intégrés et de bases de données publiques correspondantes pour passer d'une analyse multicritère à une analyse de cycle de vie attributionnelle.

#### **3.1.4. Solvants**

Les solvants organiques peuvent être classés en fonction de leur structure chimique en trois familles :

- Les solvants hydrocarbonés (aromatiques, aliphatiques) ou aprotiques apolaires, avec un moment dipolaire permanent nul : le benzène, les hydrocarbures : alcanes ramifiés ou linéaires, alcanes cycliques, alcènes. Les alcanes peuvent être obtenus par voie biologique.
- Les solvants halogénés : chlorés, fluorés.
- Les solvants oxygénés (alcools, cétones, esters comme l'acétate d'éthyle, éthers, éthers de glycol, etc.) ou protiques, c'est-à-dire comprenant au moins un atome d'hydrogène susceptible de former des liaisons hydrogènes.
- Au-delà de leurs performances, l'emploi de ces solvants est réexaminé pour des raisons de sécurité. Trois réglementations ont un impact sur la consommation de ces solvants :

- La directive européenne 1999/13/CE qui vise à diminuer les composés organiques volatils (COV) pour les usages industriels. Cette directive définit les catégories d'application concernées, les seuils de consommation de solvants et les valeurs limites d'émissions.
- Les directives sur les substances dangereuses (67/548/CE) et sur les produits dangereux (1999/45/CE) révisées en 2002 qui concernent essentiellement les solvants chlorés.
- La directive REACH (EC 1907/2006) sous la conduite de l'ECHA.

Les caractéristiques recherchées dans les solvants s'interprètent dans un couple solvant-soluté(s) : pouvoir solvant, pression de vapeur, tension de surface. Alors que l'approche par pouvoir solvant a été très fructueuse, le critère pression de vapeur (volatilité) suscite de réels verrous technologiques.

Les facteurs favorables à l'utilisation de biosolvants sont :

- La défossilisation de la filière.
- La réduction des composés organiques volatils, responsables de conséquences délétères sur l'environnement. Les solvants fluorés et chlorés sont particulièrement visés.
- L'amélioration de l'hygiène et de la sécurité à l'utilisation.
- L'effet levier indirect des biocarburants.

Ce dernier point est aussi en faveur d'une utilisation de produits bio-sourcés dans d'autres applications ; ces derniers sont plus faciles à mettre en œuvre dans des phases aqueuses ou des solvants oxygénés.

Les solvants basés sur du carbone renouvelable les plus développés sont :

- Les esters méthyliques d'huiles végétales (colza, tournesol, lin) qui ont de bonnes performances : laurate, myristate, oléate, linoléate, linoléate de méthyle, triacétate de glycéryle, lactate d'éthyle, adipate de méthyle, succinate de diéthyle, acétate d'éthyle.
- La série des alcools (méthanol, éthanol, butanol, alcool isoamylique, éthylène glycol, propylène glycol, propandiol-1,3), un éther (diméthylisosorbide), l'acétone, le carbonate de glycérol, et les terpènes ( $\alpha$ -pinène,  $\beta$ -pinène et limonène).
- Les esters d'acides organiques, en particulier d'acide lactique, pour le remplacement des dérivés du glycol.

Le marché des solvants est de l'ordre de 5 millions de tonnes en Europe, dont 600 000 tonnes pour la France. Le taux de pénétration des biosolvants n'est que de 2,5 % actuellement (biofluxants, nettoyage, adjuvants phytosanitaires) avec un objectif d'atteindre 90 000 tonnes en France à terme.

### Verrous et questions de recherche

- L'adéquation des différentes solutions technologiques publiées en regard des réglementations.
- L'élaboration de bases de données partagées nécessaire pour aborder l'ensemble des formulations et dégager des règles, d'abord empiriques.
- La réticence des usagers à utiliser des produits dont les matières premières entrent en concurrence avec la filière alimentaire, ou dont la production peut avoir des effets négatifs sur l'environnement
- La disponibilité d'outils d'éco-conception intégrés et de bases de données publiques correspondantes pour passer d'une analyse multicritère à une analyse de cycle de vie attributionnelle.

#### 3.1.5. Tensioactifs

Les tensioactifs sont présents dans la plupart des formulations en détergences, peintures, encres, cosmétiques et pharmacie.

Les tensioactifs peuvent se regrouper en différentes classes de molécules :

- Les tensioactifs anioniques (alkylsulfates, alkylsulfonates, alkylarylsulfates) — principalement utilisés dans les lessives et produits de nettoyage.
- Les tensioactifs cationiques (chlorhydrates d'amines, ammoniums quaternaires) — principalement utilisés dans les milieux industriels et hospitaliers en raison de leurs propriétés désinfectantes.
- Les tensioactifs amphotères, s'ionisant négativement (anions) ou positivement (cations), selon les conditions du milieu.
- Les tensioactifs non-ioniques (hydroxyles) — utilisés dans l'industrie textile, la métallurgie et en cosmétologie (hygiène corporelle et beauté) en raison d'une moindre agressivité et d'un faible pouvoir moussant.

Les deux caractéristiques principales des tensioactifs sont :

- La balance hydrophile-lipophile « HLB », définie par Griffin<sup>26</sup>. La valeur HLB de chaque molécule est calculée par le rapport  $HLB = 20 * M_h / M$ , où  $M_h$  est la masse de la partie hydrophile et  $M$  la masse totale de la molécule. HLB est exprimée sur une échelle arbitraire de 0 à 20, permettant de découper en quatre classes, (i) de 0 à 3 pour un agent antimoussant, (ii) de 4 à 6 pour un émulsifiant « Water in Oil » (W/O), (iii) de 7 à 9 pour un agent mouillant, (iv) de 8 à 18 pour un émulsifiant « Oil in Water » (O/W), la plupart des détergents étant dans la gamme 13 à 15.
- La biodégradabilité : la pollution des cours d'eau a entraîné la mise en place d'une réglementation très stricte depuis les années 70 sur le respect d'une dégradabilité minimale (90 % est une valeur couramment avancée) pour tous les tensioactifs synthétiques.

Les principales molécules de synthèse, dérivées du pétrole, sont :

- SDS (dodécylsulfate de sodium) :  $NaSO_4(CH_2)_{11}CH_3$
- alkylbenzènesulfonate de sodium:  $C_{18}H_{29}SO_3Na$
- CTAB (bromure d'hexadécyltriméthylammonium) :  $(CH_3)_3N(CH_2)_{15}CH_3Br$
- CTAC (chlorure d'hexadécyltriméthylammonium) :  $(CH_3)_3N(CH_2)_{15}CH_3Cl$
- Triton :  $C_8H_{15}C_6H_4(OC_2H_4)_9OH$
- Brij 35.

Les tensioactifs obtenus à partir de ressources végétales possèdent soit une des deux parties hydrophile ou hydrophobe d'origine végétale, soit les deux à la fois. La partie hydrophile est constituée de sucres ou peptides issus notamment du maïs, du blé, de plantes sucrières (canne, betterave, etc.), ou de glycérol. La partie hydrophobe est obtenue à partir d'acides ou alcools gras issus d'huiles de coprah, palmiste, tournesol, colza, lin, etc.

Une forte concurrence existe entre les sources végétales avec au niveau mondial la forte compétitivité du coprah, du palme et du palmiste, en termes de prix.

Les tensioactifs entièrement issus de ressources renouvelables sont pour les plus fréquents les alkylpolyglucosides (agents moussants ou émulsifiants), les esters de sucre, les phospholipides (essentiellement les lécithines) qui sont directement utilisables après leur extraction des tissus végétaux ou des produits animaux (jaune d'œuf notamment) et les saponines (Quillaya, noix de lavage, etc.). Les différentes crises dans le monde animal ont suscité un fort désengagement des industriels vis-à-vis des produits d'origine animale au profit des produits d'origine végétale.

---

<sup>26</sup> Griffin W.C., 1949. Classification of surface-active agents by "HLB". *Journal of the Society of Cosmetic Chemists* 311:1.

Les produits finaux sont des formulations qui consistent à mélanger des produits intermédiaires afin d'obtenir des propriétés prédéfinies en fonction de l'application visée. Le but est donc de créer un produit en testant différentes formules permettant de sélectionner les ingrédients en fonction de leur compatibilité les uns vis-à-vis des autres.

Dans les formulations finales, sont aussi présents des arômes, des colorants, des conservateurs, des épaississants et des agents de blanchiment.

Les principaux avantages des produits bio-sourcés sont leur biodégradabilité, leur moindre agressivité dans les produits d'hygiène, des procédés de synthèse plus compatibles avec les principes de la chimie verte, la décarbonisation de la filière technologique.

Le secteur des tensioactifs est très concentré et Unilever, Procter and Gamble, Henkel AG & Co., Merck KGaA sont les principaux opérateurs industriels. Le marché mondial des savons et détergents est estimé à 33 millions de tonnes en 2008, avec un taux de croissance du marché entre 1 et 3 %. En Europe 20 % sont d'origine végétale et 5 % d'origine animale. Les alkylpolyglucosides (150 000 t/an) représentent le meilleur succès dans ce domaine.

Le chiffre d'affaires total pour l'UE27 est estimé en 2008 à 35,7 milliards d'euros, la moitié concernant les produits industriels (AISE Association Internationale de la Savonnerie de la Détergence et des Produits d'Entretien).

La durabilité, en particulier la protection de l'environnement, est l'un des moteurs de ce secteur industriel, ce qui se traduit par des formulations faisant appel à des produits de la biomasse (à l'exception des produits animaux) et à des produits à biodégradabilité élevée. Ce dernier point est encadré par de complexes réglementations (Directives 82/242/CE, 82/243/CE, 86/94/CE, Detergents Regulation, EC 907/2006).

### **Verrous et questions de recherche**

- Explorer des voies biologiques de production d'acides gras de longueur adéquate avec une faible polydispersité.
- Analyser les prix de revient industriels des tensioactifs pour identifier les marges de progrès sur chacune des étapes de la technologie d'obtention des tensioactifs.
- La réticence des usagers à utiliser des produits dont les matières premières entrent en concurrence avec la filière alimentaire, ou dont la production peut avoir des effets négatifs sur l'environnement.
- La disponibilité d'outils d'éco-conception intégrés et de bases de données publiques correspondantes pour passer d'une analyse multicritère à une analyse de cycle de vie attributionnelle.

### **3.1.6. Lubrifiants**

La propriété principale de la lubrification est de changer le coefficient de frottement entre deux pièces mécaniques afin de faciliter le glissement ou le roulement entre elles et d'éviter l'usure et les échauffements. Les lois physiques qui régissent ce domaine (la tribologie) sont très complexes et sont basées à la fois sur la résistance des matériaux et la mécanique des fluides. Au-delà de cette lubrification, les propriétés recherchées sont la stabilité thermique et chimique (absence d'oxydation à l'air) et le pouvoir mouillant pour assurer, malgré des pressions importantes, l'existence d'une pellicule d'huile entre les pièces en contact (par exemple, le copeau et la surface d'attaque de l'outil – filmo-résistance de l'huile).



Les caractéristiques techniques à prendre en compte sont :

- La viscosité avec des classes SAE (SAE = Society of Automotive Engineers) pour les huiles moteurs et huiles à engrenages, et la norme *ISO-3448* pour les autres applications.
- La tenue viscosité-température (indices de viscosité).
- La tenue viscosité-pression.
- La tenue viscosité et gradient de cisaillement.

Les plus importants lubrifiants sont :

- Les lubrifiants automoteurs, avec les huiles moteurs, les huiles à engrenages, les liquides de frein.
- Les lubrifiants industriels, avec les fluides hydrauliques, les huiles à engrenages pour compresseurs, les huiles pour turbines, les produits anticorrosion, les réfrigérants lubrifiants, les huiles isolantes et huiles blanches, les graisses lubrifiantes.

Les produits actuels sont principalement des huiles d'origine biologique ou fossile.

Dans le pétrole, les fractions les plus intéressantes sont :

- Les paraffines (alcanes) qui présentent une grande stabilité au vieillissement.
- Les naphènes (molécules cycliques saturées) qui ressemblent beaucoup aux paraffines, mais disposent d'un comportement au froid sensiblement meilleur, étant donné qu'ils ne présentent pas de dépôt de paraffines.

Globalement les lubrifiants sont des molécules  $C_{20}$  à  $C_{35}$ , avec une plage d'ébullition de 210 à 600°C, un point d'inflammation de 100 et 300°C, une masse volumique de 840-920 kg/m<sup>3</sup>.

A côté de ces huiles minérales existent l'huile d'hydrocraquage et des huiles synthétiques, dont les huiles à base de polyalphaoléfinés (PAO) et d'esters d'acides carboxyliques. Leurs meilleures performances techniques s'accompagnent de prix plus élevés.

Les huiles végétales sont utilisables en huile de coupe (colza, lin). Leur principal atout réside dans leur biodégradabilité (une huile végétale sans additifs est détruite à 95 % en 21 jours alors que, sur un même laps de temps, l'huile minérale sans additifs se dégrade de moins de 25 %), leur faible écotoxicité et la décarbonisation de cette filière. Les chaînes longues et saturées sont recherchées. Les acides gras libres ont montré des bonnes propriétés de surfaçage des pièces métalliques, comparativement aux esters d'alcool et de glycérol. Toutefois, leur grande instabilité les condamne pour des applications en température en dessous de 120°C.

Le marché des lubrifiants est d'environ 6 millions de tonnes en Europe dont seulement 150 000 tonnes de biolubrifiants. C'est un marché en évolution rapide.

Le suivi des réglementations et normes industrielles est essentiel puisque 45 % des lubrifiants servent dans les applications des véhicules et 45 % dans les machines industrielles. Cependant le cadre réglementaire (Directives CE/1999/45 et CE/2001/58 pour l'affichage des lubrifiants dangereux) est insuffisant pour orienter spontanément vers le choix de biolubrifiants. Le principal moteur d'évolution est la biodégradabilité. L'éco-label européen, inspiré des labels allemand (Blauer-Angel) et scandinave (Nordic Swan), ainsi que l'interdiction française d'utiliser des lubrifiants non biodégradables dans des zones naturelles sensibles, en application de l'article 44 de la Loi d'orientation agricole du 5 janvier 2006, devraient susciter un meilleur comportement des utilisateurs.

## Verrous et questions de recherche

- Les huiles végétales ont une insuffisante stabilité avec l'apparition de rancidité ; les dérivés de l'huile de colza contiennent de l'acide linoléique (C18:3  $\omega$ -3) et de ce fait résistent moins bien à la chaleur que ceux du tournesol.
  - Etablir les relations entre structure fine des acides gras, formulation et stabilité vis-à-vis de la rancidité et des températures hautes et basses.
- Les huiles végétales ont un coût supérieur à celui des huiles minérales, d'un facteur 2 à 4.
  - Analyser les prix de revient industriels des biolubrifiants pour identifier les marges de progrès sur chacune des étapes de la technologie d'obtention de ces produits bio-sourcés.
  - La réticence des usagers à utiliser des produits dont les matières premières entrent en concurrence avec la filière alimentaire, ou dont la production peut avoir des effets négatifs sur l'environnement.
  - La disponibilité d'outils d'éco-conception intégrés et de bases de données publiques correspondantes pour passer d'une analyse multicritère à une analyse de cycle de vie attributionnelle.

### 3.1.7. Besoins globaux

En dehors du bois-énergie, l'analyse des besoins en biocarburants et en chimie converge vers une description en une multitude de molécules dont la principale caractéristique est d'être toutes carbonées. En revanche les structures, l'état d'oxydation du carbone sont très variables.

Le prix de l'atome de carbone dans les différentes molécules varie considérablement.

Tableau 8 : prix des principaux composés chimiques usuels exprimés sur une base carbone (valeurs 2010).

Matière	Unité	Prix	Source	Euro/kg de carbone
bois de chauffage	euro/tonne	48	Les échos	0,048
gaz naturel	\$/MMBtu	2,728	Usine nouvelle	0,100
charbon	\$/tonne	181	EU	0,120
coton	cent US/lb	56,1	Les échos	0,172
éthanol (canne)	\$/gallon	1,55 - 1,60	Les échos	0,190
fatty acid methyl ester (FAME)	\$/tonne	270 - 320	icispricing	0,201
bois peuplier	euro/m3	100	Les échos	0,250
bois pin		100	Les échos	0,250
bois douglas		110-120	Les échos	0,275
rapeseed methyl ester (RME)	\$/tonne	390 - 430	icispricing	0,279
ethanol	\$/tonne	425 - 450	icispricing	0,297
propane	\$/tonne	550	Usine Nouvelle	0,374
naphta	\$/tonne	600-610	Usine Nouvelle	0,408
butane	\$/tonne	615	Usine Nouvelle	0,417
pétrole brut Brent	\$/baril	68	Usine Nouvelle	0,480
pâte à papier	euro/t	491,2	Les échos	0,490
sucre	cent US /livre	24-25	Les échos	0,520
huile de palme	riggints/tonne	2535	Les échos	0,639
huile de soja	\$/kg	0,78	Les échos	0,780
PVC	euro/kg	0,921	Usine Nouvelle	0,921
polypropylène	euro/kg	0,987	Usine Nouvelle	0,987

PEHD film	euro/kg	1,007	Usine Nouvelle	1,007
PEBD	euro/kg	1,04	Usine Nouvelle	1,040
PEHD soufflage	euro/kg	1,048	Usine Nouvelle	1,048
polystyrène	euro/kg	1,213	Usine Nouvelle	1,213
PET	euro/kg	1,455	Usine Nouvelle	1,455
caoutchouc	\$/kg	2,18	Les échos	1,480
laine de Sydney	cts australien/kg	1050	Les échos	6,320

Remplacer une partie du carbone fossile par du carbone renouvelable doit être analysé sous différents angles, où bien entendu l'adéquation technique et le coût sont des arguments forts. Cependant l'usage final des molécules créées doit être une variable d'analyse dans le cadre d'une société durable. La capacité de recyclage des molécules fait apparaître deux classes qui doivent retenir notre attention, chacune représentant de l'ordre de 25 à 30 % des usages :

- Usages strictement dispersifs, sans possibilité de recyclage avec les usages en agriculture, dans l'hygiène, les solvants lors des applications finales, une partie des papiers.
- Usages avec des durées de moins d'un an, avec des possibilités de recyclage très variables, ce qui concerne les emballages en particulier.

Ces deux classes sont des cibles préférentielles car elles permettraient de répondre à une société neutre en carbone, en promouvant l'emploi de carbone renouvelable. La conception de produits à cycles courts (de la photosynthèse à la biodégradation) s'inscrit directement dans l'éco-conception, pour une demande en pétrole équivalente à 250 Mtep. Inversement d'autres familles de produits s'inscrivent dans des durées de vie entre 5 ans et plus de 10 ans : habitat, moyens de transports. Le piégeage de carbone peut alors être une opportunité, comme le sont déjà les bois de construction et d'ameublement.

Cette approche des domaines potentiels où le carbone renouvelable pourrait être une source complémentaire significative à côté du carbone fossile, se construit depuis l'idée de l'usage jusqu'à l'ensemble de l'itinéraire technologique. Sont donc à envisager l'analyse du cycle de vie, le choix des matières premières (fossiles ou renouvelables), le choix des réactions avec le minimum de rejets, le choix des procédés en tenant compte de leurs coûts énergétiques, le choix des formulations et les contrôles écotoxicologiques et toxicologiques. Chaque élément de cet ensemble peut être décisif pour choisir de produire et distribuer des produits à base de carbone renouvelable. L'ACV (Analyse de Cycle de Vie) n'est plus suffisant car il identifie seulement les impacts environnementaux d'un produit de sa fabrication à sa fin de vie.

Un dernier point résulte de l'utilisation conjointe de structures renouvelables et de structures moléculaires fossiles pour élaborer les produits finis. Au delà du déclaratif, il est nécessaire de disposer de normes établies et stabilisées pour quantifier les parts respectives des fractions renouvelables et fossiles. Ramener la question au seul carbone revient à oublier la fraction massique apportée par les autres atomes, en particulier l'oxygène.

### 3.2. Principales familles biochimiques répondant à ces besoins

Cette matière provient de divers types de ressources :

- Les produits d'origine agricole : subdivisés entre les cultures traditionnelles de plantes annuelles (céréales, oléagineux) cultivées principalement pour leurs parties nobles (grains et graines et tubercules) et les cultures dédiées développées spécifiquement pour l'utilisation en bioraffinerie (Miscanthus, switch grass,...), ainsi que les résidus de cultures et d'élevage.

- Les produits d'origine forestière : bûches, granulés, plaquettes et résidus de l'exploitation forestière ou de cultures sylvicoles spécifiques (taillis à courte ou très courte rotation).
- Les produits d'origine aquatique : algues, résidus de la pêche et de la pisciculture.
- Les co-produits et effluents des industries de transformation des matières biologiques : scieries, papeteries, industries agroalimentaires, élevages industriels.
- Les autres déchets organiques : déchets urbains, boues de station d'épuration, ordures ménagères, déchets verts de parcs et jardins.

Bien que ces ressources soient abondantes, elles représenteront à long terme un facteur limitant en raison de compétitions pour l'usage des terres. Néanmoins, cette biomasse reste encore sous-exploitée sous forme de gisements fatals directement disponibles concentrés (ex. déchets industriels) ou diffus (ex. rémanents d'exploitations forestières ou pailles agricoles), soit au travers des marchés organisés des productions des cultures et boisements traditionnels ou du développement de nouvelles cultures agricoles et forestières dont il faut construire les filières. Elles seront mobilisables pour de nouvelles utilisations dans le cadre d'une exploitation rationnelle tenant compte des utilisations préexistantes de la biomasse : vitales comme l'alimentation ou traditionnelles comme la papeterie, la construction, l'ameublement, le chauffage,...

Au delà d'un objectif de maximisation de la production du point de vue quantitatif, d'autres critères doivent être considérés notamment la facilité de récolte et de stockage ainsi que l'aptitude à la transformation. Cette aptitude à être utilisée en bioraffinerie constitue un facteur déterminant qui dépend d'un ensemble de paramètres relevant à la fois de la composition chimique et de l'organisation structurale des constituants des matières premières mises en œuvre. En conséquence, les améliorations de productivité devront s'élaborer dans le cadre d'une optimisation globale prenant en compte les attentes des utilisateurs industriels en termes de coût et de processabilité, ainsi que de critères environnementaux et territoriaux.

Deux principales approches sont possibles pour identifier les biomolécules d'intérêt :

- **L'approche structurale** consiste à identifier des biomolécules ressemblant à celles utilisées dans la chimie du carbone fossile et à adapter le procédé pour opérer la substitution.
- **L'approche fonctionnelle**, plus innovante et plus en adéquation avec les principes de la chimie verte, consiste à explorer les molécules existantes dans le domaine végétal pour y trouver des fonctions semblables à celles recherchées, même si ces fonctions sont portées par des molécules de structures différentes de celles actuellement utilisées et à les valoriser.

Une valorisation optimisée des différents composants d'une biomasse plaide donc en faveur de l'utilisation de végétaux les mieux adaptés possibles aux usages, afin de contourner un certain nombre de contraintes liées à la composition chimique et à la structure de la matière première. Ces limites, forcément imposées par le végétal *in fine*, nécessitent donc aussi le recours à des étapes de transformation constituant un procédé de bioraffinage ; ces procédés doivent à leur tour être optimisés pour aboutir à des fractions dotées des propriétés recherchées. La fonctionnalisation est la modification d'assemblages de macromolécules ou l'introduction de groupements chimiques (dans des molécules ou macromolécules) pour conférer des propriétés à valeur d'usage.

En pratique, des avancées respectives sont nécessaires à la fois dans le domaine du végétal et dans celui des procédés, ces deux domaines étant à appréhender de manière complémentaire. L'optimisation de cet ensemble « biomasse-procédé » qui vise à proposer les meilleurs débouchés pour les différents organes ou composants d'organes végétaux récoltés, bute sur un certain nombre de verrous constituant autant de questions de recherche.

De nombreux produits d'origine végétale sont d'ores et déjà disponibles sur le marché non alimentaire et regroupent principalement des dérivés de sucres et d'amidon (alcools, acides), des huiles et dérivés lipidiques (glycérine, acides gras,...), des gommes et dérivés du bois (résines, ...) ainsi que des dérivés de cellulose et de fibres (cellulose, acétate, ...). Le développement de bioraffineries reposant sur l'utilisation des plantes entières devrait permettre d'élargir le panel de molécules issues du végétal mises sur le marché. Dans ce contexte, diverses étapes de déconstruction/séparation/fonctionnalisation de la biomasse végétale sont nécessaires afin d'obtenir des produits pouvant substituer les molécules issues de la raffinerie pétrolière et de la pétrochimie. Un enjeu pour le développement des bioraffineries est également de permettre l'émergence de nouvelles propriétés fonctionnelles à l'origine de nouvelles applications et donc de nouveaux marchés.

En terme de propriétés fonctionnelles, les potentialités des produits issus de bioraffineries sont assez vastes et concernent des champs d'application tels que l'énergie, les polymères, les lubrifiants, les solvants, les adhésifs, les herbicides, les molécules pharmaceutiques,... Les molécules d'application pour la chimie organique représentent un enjeu majeur pour substituer les molécules d'origine fossile. Sur la base d'évaluations techniques, industrielles et économiques, Werpy et Peterson (2004)<sup>27</sup> ont établi une liste de 12 molécules (building-blocks) issues du végétal à fort potentiel d'utilisation dans l'industrie chimique. Ces molécules (acide itaconique, acide 3-hydroxypropionique, ...), pour la plupart obtenues par fermentation de sucres, présentent des groupes fonctionnels variés et peuvent être converties en diverses molécules chimiques et matériaux à haute valeur ajoutée. De nombreuses recherches portant sur le développement de voies chimiques de transformation des sucres, des lipides et des terpènes ont été menées lors des 20 dernières années<sup>28</sup>.

La « BioHub Project » de la société Roquette® illustre de manière synthétique le potentiel de la biomasse dans le domaine de la chimie (le schéma présenté concerne une biomasse particulière : blé ou maïs, mais une partie de ce qui est présenté reste valable en partant de la biomasse lignocellulosique). On voit que le glucose est une véritable plaque tournante, à la fois vers des polymères spécifiques (qui sortent du répertoire de la pétrochimie et des polymères qui en découlent), mais aussi, par des voies originales, vers des grands produits de la pétrochimie : par exemple le 1-3 propane diol (procédé désormais industriel) et le PTT qui en dérive, ou les glycols *via* le sorbitol, ou les acrylates *via* l'acide lactique. Bien que cela ne soit pas mentionné, l'éthanol est aujourd'hui sérieusement considéré comme un précurseur d'éthylène (en lieu et place du naphta pétrolier). Bien entendu, il ne faut pas croire qu'une même « bioraffinerie » pourra produire de manière efficace l'ensemble des produits et coproduits aux spécifications requises. Il faut choisir au préalable le ou les produits finaux principaux recherchés, ce qui détermine la qualité des intermédiaires, et par la même, la nature et la qualité des sous-produits.

Les applications actuelles de la lignine sous forme polymérique sont basées sur ses propriétés de polyélectrolytes (dispersants, émulsifiants, séquestrants). Généralement, ces applications ne requièrent pas ou peu de modifications autres qu'une sulfonation ou qu'une thio-hydroxyméthylation. La structure phénolique et la réactivité des lignines permet aujourd'hui d'envisager une large gamme d'utilisations dans le domaines des adhésifs (substitution du phénol dans les résines phénoliques, obtention de résines époxy par ajout d'agents classiques de réticulation). Pour ces applications, l'origine et le procédé d'obtention des lignines ont une influence sur les performances finales des adhésifs, la

---

<sup>27</sup> Werpy, T. et Petersen, G. 1949. Top value added chemicals from biomass : Volume I - Results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gs. U.S. Department of Energy, 76.

<sup>28</sup> Corma, A., S. Iborra, and A. Velty. 2007. Chemical routes for the transformation of biomass into chemicals. *Chemical Reviews* 107(6):2411-502.

structure chimique et la masse molaire étant deux paramètres déterminants<sup>29</sup>. Une fonctionnalisation préalable des lignines, notamment par voie enzymatique, permet de pallier leur hétérogénéité chimique et d'accroître leur réactivité. Un autre ensemble d'applications potentielles concerne l'utilisation des lignines dans des matrices thermoplastiques, d'origine naturelle ou non. L'effet des lignines sur ces matrices est dans ce cas principalement conditionné par l'existence d'une fraction de lignine soluble dans la matrice et par la proportion de groupements réactifs (OH phénoliques libres)<sup>30</sup>. Enfin, il est possible de synthétiser de nouveaux polymères à partir des lignines, les méthodes mises en œuvre jusqu'à présent étant essentiellement de nature chimique<sup>31</sup>. Très récemment, un laboratoire du DOE (USA) a développé un procédé économiquement viable à base de lignines produites par un procédé Organosolve pour substituer les fibres de carbone. La nature des lignines et leur mode d'obtention sont déterminants dans l'obtention des propriétés fonctionnelles obtenues.

Dans le cas de la recherche d'obtention de nouvelles propriétés fonctionnelles, la chimie classiquement mise en œuvre dans la pétrochimie pourrait mieux exploiter les caractéristiques des molécules issues de la biomasse végétale. En effet, ces dernières sont très oxygénées et polaires (dans la plupart des cas) comparativement aux molécules d'origine fossile. Si l'objectif est de substituer la biomasse à une matière première fossile (en pratique coupe pétrolière ou condensat de gaz naturel), le fait que les molécules issues de la biomasse soient oxygénées (alcools ou acides en particulier) peut être considéré comme un avantage. En effet, si l'on examine les intermédiaires nécessaires pour l'élaboration des grandes familles de polymères, une fraction importante fait intervenir des précurseurs oxygénés. C'est le cas pour les acrylates, les polyesters et les polyuréthanes. Or, lorsqu'on part d'hydrocarbures (fossiles), en général saturés et peu réactifs, l'étape difficile et généralement limitante est précisément une réaction d'oxydation, conduite le cas échéant de manière non catalytique, avec des réactifs coûteux et délicats d'emploi. En partant de la biomasse, il est possible de développer de nouveaux schémas d'obtention des mêmes précurseurs, *via* des réactions en partie biocatalytiques « propres ».

### 3.2.1. Améliorer la processabilité de la biomasse

Les matières premières potentiellement mobilisables pourront provenir de différentes sources de biomasse : agricoles (plantes annuelles, plantes pérennes dédiées), forestières ou encore d'autres origines (algues, sous-produits de l'agriculture ou de l'industrie). Ces futures ressources doivent faire l'objet de programmes de sélection et d'amélioration basés sur des critères agronomiques, mais aussi sur des critères de modification de composition/structure (lignines, ...) pour une meilleure dégradabilité. Par exemple, la densification de ces biomasses devrait consister en un broyage suivi d'une séparation. Un critère d'aptitude au fractionnement (broyabilité/séparabilité) pourrait conduire à créer des plantes se réduisant, à moindre coût, en poudres plus facilement utilisables.

La facilité de dégradation de la paroi végétale (cette propriété dépend aussi des enzymes utilisées pour assurer sa dégradation) en lien avec sa composition et son état d'organisation doit être évaluée pour comparer les différentes sources de biomasse, améliorer les ressources végétales et développer des procédés qui permettent d'accroître la réactivité de ces polymères et faciliter ainsi les opérations de déconstruction.

---

<sup>29</sup> Stewart, D. 2008. Lignin as a base material for materials applications: Chemistry, application and economics. *Industrial Crops and Products* 27(2):202-07.

<sup>30</sup> Pouteau, C., P. Dole, B. Cathala, L. Averous, et N. Boquillon. 2003. Antioxidant properties of lignin in polypropylene. *Polymer Degradation and Stability* 81(1):9-18.

<sup>31</sup> Hu, T.Q. (Ed.). 2002. *Chemical modification, properties and usage of lignins*. New York (USA): Klumer Academic

Pour les applications qui reposent sur l'extraction de molécules particulières, la facilité d'accès aux organes contenant ces molécules ainsi qu'aux structures (micelles, liposomes, etc.) qui les contiennent doit aussi servir de critères de sélection.

### 3.2.2. Approche structurale

Une large gamme de molécules issues du fractionnement de la biomasse et/ou de modification/décomposition moléculaire peuvent déjà être repérées.

Seule la **lignine** présente une analogie structurale directe avec les motifs structuraux présents dans le pétrole et ses dérivés. Toutefois l'incrustation de la lignine dans les structures lignocellulosiques rend sa mobilisation délicate et coûteuse, avec pour conséquence un faible éventail d'usages de la lignine et de ses dérivés (Figure 5).

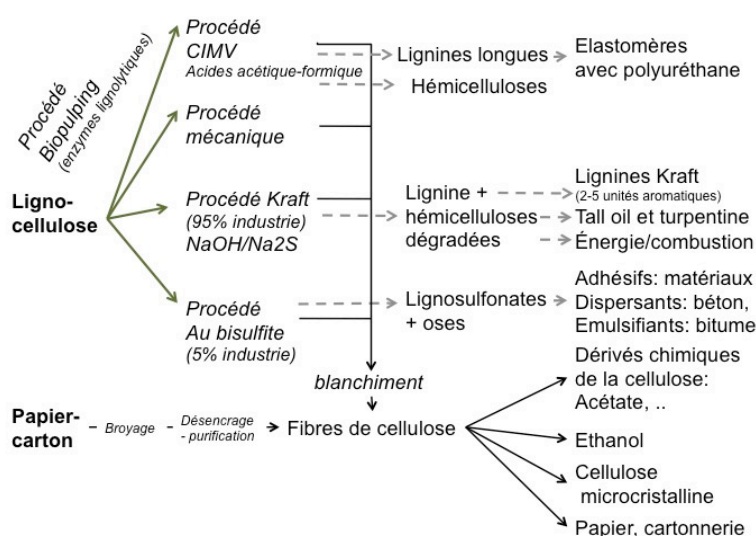


Figure 5 : typologie des usages de la lignocellulose et des produits dérivés du recyclage des papiers et cartons.

Pour répondre à l'**objectif de remplacement sur une correspondance structurale**, les autres molécules devront être obtenues par voie de conversion, chimique ou biotechnologique, à partir des molécules présentes dans la biomasse végétale. Plusieurs exemples de réalisation méritent d'être soulignés dès maintenant :

- Propylène avec le dérivé du 1-propanol et isopropanol obtenus par fermentation et le procédé ABE d'obtention de propylène et d'isobutanol à partir d'acétone.
- Les glycols avec le 1,3 propanediol à partir de glucose selon le procédé fermentaire de Dupont et le 1,2-propanediol à partir de pentoses et d'hexoses.
- Le butadiène *via* la production de 2,3 butanidiol par *Bacillus polymyxa* et *Klebsiella pneumoniae*.

La notion d'économie d'atomes est à introduire dans toutes les analyses : les conversions doivent en effet être conçues dans le but de maximiser, dans le produit final, l'incorporation des molécules par unité des matières utilisées au cours du procédé. Cet objectif conduit à minimiser la quantité de sous-produits de réaction et donc à réduire la pollution à la source plutôt qu'à produire des déchets qu'il faudrait traiter ou éliminer. Or l'efficacité d'un procédé est traditionnellement mesurée par le rendement chimique, sans tenir compte de la quantité de sous-produits formés. La chimie verte propose une évolution de ce concept en introduisant un nouvel indicateur de l'efficacité des procédés : l'utilisation

atomique<sup>32</sup>, également appelée économie atomique et qui est définie comme le rapport de la masse molaire du produit recherché sur la somme des masses molaires de tous les produits qui apparaissent dans l'équation stœchiométrique. Si les sous-produits de la réaction ne sont pas tous identifiés, alors la conservation de la matière permet de remplacer le dénominateur par la somme des masses molaires de tous les réactifs. Il est bien connu que l'utilisation atomique diminue avec la complexité des produits synthétisés, si bien que la chimie fine et l'industrie pharmaceutique génèrent en fin de compte des quantités de déchets comparables à celles générées par la chimie lourde pour des tonnages de produits inférieurs de plusieurs ordres de grandeur. Ces données montrent que l'optimisation des procédés en vue d'augmenter l'utilisation atomique est profitable dans tous les domaines de l'industrie chimique et devra être placée dans les perspectives d'une chimie verte du carbone renouvelable.

### Verrous et questions de recherche

- Positionner les produits issus de matières renouvelables comparativement à ceux issus du carbone fossile permettra des choix sociétaux raisonnés. L'économie d'atomes est l'un des critères à prendre en compte.
- La question de recherche qui en résulte est l'établissement de bases de données ouvertes sur des scénari complets répondant chacun à des besoins spécifiques de la société.

Les questions de recherche de ce chapitre seront explicitées plus largement dans les chapitres suivants.

#### 3.2.2.1. Aptitude à la déconstruction

Ce critère constitue le principal facteur critique à considérer et reste aujourd'hui à être mieux caractériser en fonction des procédés utilisés. Cette aptitude a fait l'objet de nombreuses études pour les bioraffineries de 1<sup>ère</sup> (meunerie) et 2<sup>ème</sup> générations (amidonnerie) qui ont permis de définir des cahiers des charges auxquels devaient répondre les matières premières entrant dans ces usines. Ces cahiers des charges incluant quelques indicateurs compositionnels sont régulièrement utilisés pour analyser les livraisons de matière première.

Ces cahiers des charges devraient encore se complexifier en fonction des produits et des marchés visés par les bioraffineries « de spécialités ». En effet, les produits issus de ces usines s(er)ont très diversifiés : molécules à propriétés spécifiques pour l'agroalimentaire, la pharmacie, la cosmétique, des polymères et résines pour les matériaux, des solvants, des émulsifiants, des fluxants, des lubrifiants, des additifs industriels, des produits pour l'alimentation animale,... Dans ce cas, les valorisations énergétiques ne viendraient qu'à la fin du processus d'extraction-purification pour assurer, si possible, l'autonomie énergétique de l'usine.

Cette aptitude à la déconstruction requiert une connaissance plus précise de l'organisation structurale et des facteurs de cohésion au sein des structures de la plante et entre polymères constitutifs. La principale difficulté provient de la complexité des parois cellulaires qui est beaucoup plus difficile à déconstruire que les organes de réserve des plantes. Les propriétés de cette paroi résultent de l'organisation et des interactions en son sein de trois polymères (cellulose, hémicelluloses et lignines). Les différents facteurs influents (génétiques, agronomiques et environnementaux) sur le détail de la cohésion pariétale restent encore aujourd'hui mal connus.

---

<sup>32</sup> Trost, B. M. 1991. The atom economy - a search for synthetic efficiency. *Science* 254(5037):1471-77.



### 3.2.2.2. Hétérogénéité et variabilité

L'aboutissement du concept de bioraffinerie suppose une valorisation complète de la plante entière. Dans cette acception, l'hétérogénéité compositionnelle des matières premières végétales peut être considérée comme un atout pour donner à la fois des produits à forte valeur ajoutée sur des segments à faible volume (chimie fine) ou bien des produits de masse à faible valeur ajoutée (carburants) en passant par des produits intermédiaires en termes de volume et de prix (polymères, tensioactifs, etc.), tout en produisant de l'énergie pour répondre aux besoins de production. C'est aussi le cas pour les algues. Une étude de faisabilité sur l'utilisation des algues marines pour la production de biocarburants semble indiquer que seule une approche de bioraffinage permettant de valoriser plusieurs produits (alginates, protéines, minéraux,...) simultanément est envisageable économiquement.

Par contre, la variabilité constitue un défaut intrinsèque des matières premières agricoles et aquatiques qui, en fonction de la variabilité génétique, des itinéraires agronomiques et des conditions agroclimatiques, peuvent entraîner des modifications sensibles d'aptitude à l'utilisation pour une même source de biomasse ou entre deux sources proches conduisant à des écarts importants de rendement (ou de qualité) des opérations unitaires de transformation.

### 3.2.3. Approche par correspondance fonctionnelle

L'autre approche est de partir d'une **correspondance fonctionnelle**. La principale limite cognitive est l'insuffisance des connaissances dans le domaine des relations structures moléculaires – propriétés physico-chimiques – propriétés d'usage pour les molécules d'intérêt.

#### 3.2.3.1. Les lignocelluloses

La ressource lignocellulosique peut être considérée de deux manières :

- Soit comme un réservoir de structures organisées, aux propriétés fonctionnelles avérées, que l'on souhaite utiliser dans l'état (cas du bois massif et fragmenté, du bambou, des fibres, par exemple).
- Soit comme un réservoir de polymères, oligomères et molécules, qui peuvent servir directement ou après modifications dans diverses applications de la chimie.

#### *La logique technologique ou la question de l'interaction entre constituants et du fractionnement*

Le fractionnement raisonné de la paroi végétale pour en tirer fibres, polymères (lignines, hémicelluloses, pectines et cellulose) et molécules à façon repose sur une meilleure connaissance de son organisation et des interactions entre les différents constituants.

Deux approches pour la transformation des lignocelluloses co-existent, avec chacune des pré-requis différents :

- Pour l'extraction de structures organisées, comme les fibres ou faisceaux de fibres, il faut connaître le comportement du liant interfibres lors des opérations de transformation (réactivité, comportement mécanique, etc.) pour ensuite élaborer des stratégies de contrôle de ce dernier. De même, une meilleure connaissance des mécanismes de la cohésion des parois permet d'envisager de trouver de nouvelles voies de fractionnement ciblées vers les points faibles, ou de cibler des modifications spécifiques par voie génétique dans la paroi pour faciliter ensuite les séparations (points faibles, cibles pour enzymes, etc.).
- Pour l'extraction de molécules, l'accessibilité aux solvants ou aux catalyseurs biologiques ou chimiques est essentielle. Dans ce cas, on doit autant considérer le comportement du catalyseur dans l'environnement complexe de la paroi que les structures qui gênent l'action de ces derniers. Là aussi,

l'objectif est de pouvoir disposer aisément de structures peu modifiées par rapport à celles *in muro*.

Dans les deux cas, l'idée de disposer de structures idéales *in situ*, facilitant à la fois l'extraction et portant déjà les fonctionnalités requises ensuite est récurrente. Les molécules cibles sont identiques pour les modifications *in muro*, (lignines, hémicelluloses, pectines) bien que les objectifs finaux de la transformation soient très différents (extraction *versus* élimination). La connaissance des verrous moléculaires et supramoléculaires sera un outil pour la sélection des plantes sur la base de la facilité et de la sélectivité des extractions envisagées. Sont aussi à considérer la variabilité spatio-temporelle et éco-physiologique des constituants pariétaux (effets de l'environnement, du stade de développement ou du tissu ou organe cible sélectionné), la génétique classique (cultivars), ou la modification génétique. Les céréales justifient une approche particulière. Les parois lignifiées de graminées présentent une organisation spécifique : les esters féruliques portés par les arabinoxylanes servent de site d'initiation de la lignification. Ainsi, les lignines de graminées sont liées aux arabinoxylanes par l'intermédiaire de ces ponts féruliques. Il est indispensable d'intégrer cette spécificité dans les stratégies de déconstruction enzymatique des parois de graminées et de rechercher des enzymes capables d'hydrolyser ces structures de pontages avec efficacité.

### Verrous de recherche

- Accessibilité des composés d'intérêt
  - Comment mesurer l'accessibilité aux enzymes, aux microorganismes et/ou aux réactifs chimiques d'un composé au sein de la biomasse ?
  - Liens entre caractérisation de la biomasse et accessibilité.
  - Comment améliorer l'accessibilité des composés au sein de la biomasse ?
- Déconstruction de la paroi et accessibilité des molécules cibles
  - Un des verrous de la déconstruction de la biomasse concerne les fibres (désassemblage) mais aussi les polymères tels que la cellulose. Pour rompre les nombreuses liaisons faibles présentes par exemple dans la cellulose cristalline, il faut recourir à un couplage de traitements physique et enzymatique. Comment améliorer les procédés pour ne recourir qu'à la catalyse enzymatique (conditions non conventionnelles) ?
    - Cette question peut bénéficier de travaux de « théorisation » d'ensembles dont la cohésion résulte d'un grand nombre de liaisons faibles (par rapport à la chimie classique qui s'intéresse majoritairement aux liaisons covalentes et à la chimie macromoléculaire qui s'intéresse surtout aux liaisons par enchevêtrements).
    - En vue d'extraire les composants des molécules (ou macromolécules) qui sont soit hydrosolubles, soit des lipides ou d'autres molécules de faible polarité, l'apport de l'ensemble des techniques de caractérisation du solide et des colloïdes est nécessaire pour connaître la matière première et les altérations induites par l'ensemble des traitements physiques, chimiques, enzymatiques, applicables, au cours du prétraitement et de l'extraction.
      - Dans les deux cas (désassemblage ou extraction), on pourra alors chercher à induire une évolution du végétal au niveau du génome, ce qui pose des questions de recherche dans le domaine de l'adaptation du végétal au procédé en fonction de critères technologiques.

### Les lignines

La problématique centrale est de savoir s'il existe des lignines idéales. Quelle que soit l'application, ces lignines idéales doivent être compatibles avec les performances agronomiques ou forestières des plantes d'intérêt. Pour chaque application envisagée, l'identification de « lignines idéales » est freinée par l'état encore limité des connaissances de ces polymères *in situ* (structure, organisation,

interactions). Le développement de méthodes d'analyse des lignines à haut débit permettant d'évaluer ces polymères *in situ* (au niveau des tissus et des strates pariétales) contribuera à lever ce verrou. Cette identification des lignines idéales peut reposer sur l'exploitation de la variabilité naturelle des lignines. Cette variabilité est sous-tendue par les 3 profils de lignification très distincts des gymnospermes, des angiospermes dicotylédones et des angiospermes monocotylédones (graminées) et est démultipliée par l'hétérogénéité spatio-temporelle de la lignification pour chacune de ces 3 origines. Le recours aux plantes mutantes ou transgéniques affectées dans leur lignification permet d'en repousser considérablement les limites et donc d'avancer plus efficacement dans cette démarche.

Chaque application envisagée nécessite des structures et organisations particulières des lignines :

- Pour le défilage physique (mécanique), biologique (enzymes de dégradation) et/ou chimique et pour les propriétés des fibres, les lignines idéales *in situ* devraient être réactives, au moins localement (accessibilité aux réactifs chimiques et/ou biologiques au niveau des zones de jonction des fibres). En fonction du procédé sélectionné, ce sont différents paramètres moléculaires, macromoléculaires et/ou supramoléculaires qui pourraient être privilégiés. Ainsi, un défilage mécanique facilité pourrait être associé à des lignines aux propriétés macromoléculaires particulières (faible Tg, faible degré de polymérisation - si tant est que ce paramètre ait un sens et soit accessible pour les lignines natives insolubles). Un défilage chimique amélioré pourrait correspondre à des paramètres facilitant la solubilisation par dépolymérisation ou par fonctionnalisation des lignines dans le milieu réactionnel (richesse en groupes phénoliques libres, richesse en liaisons inter-unités labiles,...).
- Pour les applications fibres, la localisation des lignines et leur réactivité à la surface est importante, notamment pour les phénomènes d'autoliage. Là aussi, la structure va influencer fortement sur les propriétés (Tg, oxydation, disponibilité pour couplages radicalaires, hydrophobicité locale, etc.). Ces caractéristiques sont de fait dépendantes de la manière dont les fibres sont sorties de la matrice bois. La transition vitreuse est un élément important à considérer pour la mise en place des fibres lors des procédés d'élaboration (capacité d'enchevêtrement de fibres devenues ductiles).
- Pour les applications reposant sur la conversion thermo-chimique ou biologique des lignocelluloses et des lignines industrielles en molécules d'intérêt, s'il est bien établi que le taux de lignines est le 1<sup>er</sup> paramètre qui gouverne l'aptitude des parois lignocellulosiques à la saccharification, l'impact de la structure des lignines est négligeable pour certains auteurs et à considérer pour d'autres.
- L'utilisation des lignines extraites relève d'une autre logique. Le polymère est alors soit une source de produits aromatiques ou carbonés plus ou moins oxygénés (cracking), soit une source de polymères utilisés dans l'état ou avec peu de modifications (ex : agents dispersants).

Ainsi, le cracking des lignines pose la question des réactions à contrôler pour arriver à des produits utiles à la chimie. Ces produits<sup>33</sup> sont multiples, en fonction de la matière première employée et de la sévérité du traitement.

Il y a potentiellement plusieurs types de modifications/dégradations possibles. :

- Dépolymériser les lignines en conservant les noyaux aromatiques d'intérêt.
- Garder certaines fonctionnalités sur les chaînes latérales aliphatiques (alcools, acides, aldéhydes).
- Ouvrir le noyau aromatique, par oxydation ou réduction et former des acides carboxyliques ou leurs esters.
- Contrôler le couplage de plusieurs entités pour former des pré-polymères structurés.
- Liquéfier la matière première sous forme d'huiles (bio-fuels, bio-oils...) et/ou de produits.

---

<sup>33</sup> Werpy, T., et Petersen, G.. 2004. Top Value-Added chemicals from Biomass, Vol II, Results of screening for potential candidates from biorefinery lignin (DOE, Oct. 2007)

Ces structures peuvent ensuite être retravaillées pour arriver à des molécules à usage amélioré (par exemple, par greffage de longues chaînes aliphatiques pour mimer un gazole ; par contrôle du degré d'oxygénation des molécules), ou lubrifiants/détergents (molécules bi-fonctionnelles). L'utilisation des lignines extraites dans l'état ou peu modifiées est réalisée par incorporation dans des matériaux biosourcés composites, comme simple charge ou pour leurs propriétés d'intérêt (agents dispersants, chélatants, hydrophobants,...). Actuellement, les lignines kraft sont essentiellement brûlées (récupération d'énergie et recyclage de réactifs) et ce sont les lignosulfonates qui sont l'objet d'applications actuelles pour leurs propriétés dispersantes. En raison de l'impact environnemental des produits soufrés et du développement de nouveaux procédés de défilage chimique sans soufre, cette situation évoluera. Une piste de recherche serait d'introduire une anionité (autre que des groupes sulfonates) dans ces lignines industrielles afin de les valoriser comme agents dispersants. A l'exception des lignosulfonates, les DP de la plupart des lignines industrielles sont relativement faibles. Cependant, leur degré parfois élevé de polydispersité constitue un frein ainsi que la présence d'impuretés en concentration variable (sucres extractibles et/ou composés inorganiques)<sup>34</sup>. Par certains aspects, la chimie envisageable sur ces produits ressemble à ce qui pourrait être proposé sur les molécules issues du cracking (*cf* ci-dessus).

Une perspective technologique serait d'augmenter la stabilité thermique des lignines extraites ou des produits issus de leur cracking, ce qui ouvrirait des applications de type bio-lubrifiants intéressantes pour des usages en mécanique, un domaine d'application proche des huiles.

Dans tous les cas abordés, l'origine des lignines est importante et le couple plante/procédé va affecter profondément la qualité des préparations et donc son potentiel de modification/utilisation.

Une autre perspective est la valorisation par combustion où les lignines auraient un faible impact sur le pouvoir calorifique, mais interviendraient dans la formation de goudrons indésirables. Indirectement, la corrélation entre teneur en silice des plantes, formation de cendres et taux de lignification est également posée (moins de lignines = plus de silice ?).

La variabilité d'ordre génétique est bien connue. Ainsi, des lignines constituées essentiellement d'unités G sont présentes chez les gymnospermes et peuvent être facilement obtenues chez les angiospermes par transformation génétique (blocage des voies conduisant aux unités S), sans dommage apparent pour la plante. Cependant, cette simplification structurale apparente peut entraîner ou non une amélioration. Ainsi, par rapport au bois de feuillu (lignines GS), le bois de conifère (lignines G) génère davantage de goudrons par combustion ou davantage de composés aromatiques indésirables dans les carburants liquides obtenus par pyrolyse-flash (bio-oils). La simplification apparente en termes d'unités s'accompagne d'un phénomène inverse en termes de liaisons inter-unités (fréquence accrue des liaisons résistantes). Une autre voie de simplification peut concerner l'organisation des lignines dans les parois : les lignines de bois présentes sous forme de larges domaines insolubles aux fortes capacités d'interactions avec les polysaccharides (capacités accrues dans le cas des lignines riches en unités S et en domaines linéaires) peuvent être « simplifiées » en petits domaines dispersés et alcali-lessivables, analogues à ce qui existe dans les parois de graminées et par la simple introduction d'unités « anormales » dont l'incorporation freine la croissance du polymère dans la paroi et/ou augmente son degré de branchement. Cette réorganisation drastique des lignines pariétales, accompagnée d'une aptitude accrue au fractionnement chimique (cuisson papetière) ou biologique (cellulolyse) est obtenue chez des plantes présentant une déficience en activité CAD (cinnamyl alcool déshydrogénase) ou CCR

---

<sup>34</sup> Gellerstedt, G. 2007. Lignin complexity : fundamental and applied issues. Dans *Séminaire - LIG2*. Reims (FRA).

(cinnamoyl-CoA réductase). Le choix des cibles génétiques est alors guidé par l'impact de cette déficience sur la croissance et le développement des plantes (impact négligeable dans le 1<sup>er</sup> cas et négatif dans le 2<sup>ème</sup>).

### **Les hémicelluloses et pectines**

Les structures complexes des hémicelluloses, formées d'hexoses ou de pentoses selon les plantes considérées, leur confèrent des propriétés intéressantes dans les applications en hydrogels et membranes perméables sélectives, épaississants et stabilisants. Des modifications chimiques par greffage permettent de moduler le caractère naturellement hydrophile de ces molécules, au même titre que cela est mis en oeuvre depuis des décennies pour la cellulose. La possibilité d'utiliser les structures intactes ou des sous-structures en C5 ou C6 multiplient les potentialités d'obtenir des molécules d'intérêt pour l'alimentaire et le non-alimentaire.

D'autres conversions par voies chimiques et/ou thermiques existent pour l'obtention de furfurals et autres alcools (xylitol, butane-diol,...). Les bioconversions permettent d'obtenir, par fermentation, divers produits à partir d'hémicelluloses : polyols, éthanol, acides organiques, etc. Ces productions dépendent donc plus des microorganismes aptes à effectuer ces conversions que de la molécule elle-même (ingénierie métabolique).

Sur le plan des structures idéales, l'allongement de chaînes (DP) ou le remplacement de C5 en C6 dans les plantes pour améliorer les rendements globaux des bioconversions en éthanol seraient des voies à envisager pour augmenter leur potentiel de valorisation.

## **Verrous et questions de recherche**

### **Les pectines**

- La valorisation des pectines repose sur leurs propriétés leur permettant de former des réseaux avec divers types de polysaccharides pour constituer des gels. Les relations structures-propriétés sont ici bien établies. En revanche la biosynthèse des pectines dans les plantes est un sujet à étudier. En effet, si les pectines sont des constituants majeurs dans la construction des parois primaires, elles sont très probablement aussi des sites d'initiation de la lignification. Les structures impliquées et les mécanismes en jeu sont inconnus. Cependant contrôler les pectines permettrait alors d'orienter certaines voies ou types de lignification, de contrôler la cohésion des structures pariétales et donc de construire une paroi adaptée à des transformations spécifiques.

### **Les celluloses**

- La cellulose est un polymère déjà largement étudié, modifié et utilisé sous diverses formes depuis de nombreuses décennies. Certaines pistes de recherche seront néanmoins porteuses par la suite. Ainsi, construire une cellulose idéale reviendrait à contrôler sa biosynthèse *in situ* pour les paramètres de structures et de propriétés suivants. L'état des connaissances actuelles sur la biosynthèse, les gènes et voies de régulation impliquées laissent entrevoir cette possibilité.

Il serait ainsi intéressant de contrôler :

- La cristallinité, et l'absence de défauts (micro et nano-fibrilles).
- L'orientation et l'agencement des micro-fibrilles dans la fibre cellulosique élémentaire (la paroi de la cellule végétale).
- Les interactions avec les autres constituants amorphes des parois (xylanes, glycanes).

Des travaux récemment publiés sur les fibres d'ortie montrent en effet que le vivant est capable de produire des fibres longues compétitives par rapport aux fibres synthétiques (2 fois la fibre de verre en rigidité spécifique et valeurs équivalentes de module de rupture spécifique)<sup>35</sup>.

Lorsque la cellulose est isolée, nonobstant le fait que les technologies d'extraction doivent être améliorées, adaptées et performantes pour conserver les structures et ne pas introduire de défauts, il faudrait:

- Contrôler les capacités d'interaction, de réticulation d'autres polymères synthétiques ou naturels pour réaliser des matériaux biosourcés par fonctionnalisation.
- Maîtriser les propriétés à l'échelle nanoscopique (production de bio-nanomatériaux à très haute performance).

### **Le bois matériau**

- Les caractéristiques du bois sont liées d'une part à l'organisation multi-échelle des constituants élémentaires que sont les fibres et d'autre part à l'architecture alvéolaire optimisée du matériau bois, conçues pour s'adapter aux conditions environnementales variées et aux agressions biologiques (insectes, champignons, etc.). En tant que matériau, le bois est remarquable par la conjonction de ses propriétés : forte rigidité spécifique, fort module de rupture spécifique en compression et en traction, très faible retrait longitudinal, capacité de régulation hygroscopique, faible conductivité thermique, faible effusivité thermique, rôle esthétique,... Il devient ainsi incontournable pour la conception de maisons à basse consommation énergétique.

- Ce matériau doit être étudié aussi comme un modèle dont on peut s'inspirer pour concevoir de nouveaux matériaux à structures hiérarchisées et en 3D. Cette voie biomimétique nécessite d'approfondir les connaissances de base sur l'organisation et les mécanismes du contrôle de l'élaboration des structures dans le plan ligneux (exemple de couches G dans les bois de tension, de l'angle de microfibrille). Cette démarche rejoint celle évoquée précédemment sur l'ingénierie des parois végétales (nécessité de modéliser et de valider sur plantes modèles).

- Ensuite les questions de cohésion intercellulaire et du comportement du matériau alvéolaire sous les sollicitations mécaniques en service sont importantes, notamment le comportement en sollicitations extrêmes (assemblages, fissuration). Il en est de même pour le contrôle (ou maîtrise) de l'homogénéité (ou de l'hétérogénéité des structures (surfaces, géométrie des fibres, répartition des tissus et des constituants,...) dans le plan ligneux. Notons que d'autres verrous, comme par exemple la stabilisation dimensionnelle par traitements chimique, enzymatique et/ou thermique, concernent un comportement qui émerge d'au minimum deux échelles imbriquées (paroi et agencement cellulaire).

- Il est clair que les études menées aux échelles sub-millimétriques, rejoignent en grande partie celles sur les fibres isolées, décrites ci-dessous. Les deux approches macro et micro sont intimement liées dans ce champ thématique. Il est en effet bien admis que le comportement du bois massif résulte de l'organisation résolument multi-échelle du matériau. Les nouveaux outils scientifiques sont aujourd'hui prêts pour relever ce défi d'une approche intégrée sur l'ensemble de ces échelles.

### **Les fibres végétales**

- Les fibres sont le principal constituant du bois matériau. *In situ*, c'est le comportement global des fibres en interactions diverses les unes avec les autres et sur les trois plans structuraux responsables des propriétés citées ci-dessus.

---

<sup>35</sup> Bodros, E., et Baley, C. 2008. Study of the tensile properties of stinging nettle fibres (*Urtica dioica*). *Material Letters* 62(14):2143-45.

- En revanche, lorsqu'elles sont isolées ou dissociées en paquets, les propriétés de groupe ne sont plus apparentes, et certaines caractéristiques, notamment mécaniques, sont altérées du fait des procédés de séparation et d'extraction utilisés. Il faut aussi rappeler que la torsion de la fibre devient un degré de liberté important sur fibre isolée, alors qu'elle peut généralement être ignorée pour un faisceau de fibres.

Ainsi, les différents niveaux à contrôler dans le bois pour produire des fibres avec des caractéristiques identiques à celles *in situ* (= la fibre idéale) seraient de :

- Diminuer la cohésion inter fibres et/ou augmenter la réactivité des liants inter fibres (dont les lignines) pour faciliter l'extraction sans dommage (ou en les minimisant). L'objectif serait de ne pas introduire ou de ne pas révéler de défauts préexistants dans les fibres, ce qui altère les propriétés mécaniques.

- Contrôler les surfaces en interaction *in situ*, en jouant sur les constitutions initiales dans la plante (lignines, pectines, hémicellulose) et surtout dans les zones fragiles où la séparation se fait.

- Ces aspects sont complémentaires et ne doivent pas masquer les actions possibles, déjà exposées sur les lignocelluloses, pour moduler les propriétés de la fibre *in situ* afin de tendre vers la fibre "idéale" en fonction de l'usage escompté: angle moyen de microfibrille, proportion des constituants de base, taux de cristallinité, nature des constituants de base, notamment lignines. Les propriétés cibles sont par exemple : la rigidité, la résilience, l'allongement à rupture, la Tg,...

- A partir du moment où la fibre est produite, les voies de modifications de surface ou de volume sont analogues à ce qui est décrit sur la chimie des polymères isolés (pectines, hémicelluloses, cellulose et lignines). Des efforts doivent être mobilisés pour cartographier des informations pertinentes en surface (réactivité de surface de fibres, composition de surface) ou en volume (morphologie à l'échelle sub-micrométrique, taux de cristallinité, angle de microfibrille, organisation macromoléculaire).

- Ces avancées expérimentales seront déterminantes pour accompagner les recherches sur le contrôle de la biosynthèse, pour alimenter les modèles à caractère prédictif et *in fine* pour les technologies composites et d'élaboration de nouveaux matériaux. En effet, au niveau des procédés, il s'agit de maîtriser ensuite les réassociations fibres/fibres ou fibres/polymères dans les matériaux (composites ou papetiers).

Ces questions sont génériques car applicables à toutes les échelles, des fibres nano aux fibres macro.

### 3.2.3.2. L'amidon

L'amidon est le polysaccharide de réserve majeur des plantes supérieures. Il constitue une fraction importante des biomasses agricoles telles que les céréales (30 à 80 % de la matière sèche) et les tubercules (60 à 90 % de la matière sèche). S'il représente la principale source d'énergie de l'alimentation humaine, il est également utilisé dans un grand nombre d'applications industrielles telles que la papeterie, l'agrochimie, l'industrie textile. La plupart de ces applications nécessitent des modifications de l'amidon natif par traitements enzymatiques ou chimiques.

L'amidon est constitué d'entités granulaires de diamètre compris entre 1 et 100  $\mu\text{m}$ . Ces grains résultent de l'agencement semi-cristallin de deux homopolymères de glucose, l'amylose et l'amylopectine. L'amylose est constituée de longues chaînes d'unités  $\alpha$ -(1,4)-glucane (500 à 6 000 unités glucose). L'amylopectine est une molécule ramifiée, caractérisée par des degrés de polymérisation très élevés ( $10^5$  à  $10^6$  unités glucose par molécule), où les unités glucosyles sont principalement reliées par des liaisons de type  $\alpha$ -(1,4) et où 5 à 6 % des unités glucosyles assurent les liaisons  $\alpha$ -(1,6), c'est à dire les branchements. Le ratio amylose / amylopectine, la taille des grains, leur morphologie sont sous contrôle génétique et donc fonction de leur origine botanique.

La compréhension des voies de biosynthèse de l'amidon est encore incomplète même si les données actuelles sur les différentes enzymes de biosynthèse de l'amidon sont abondantes. Une grande part de cette complexité provient du fait que les enzymes majoritairement responsables de la synthèse<sup>36</sup> et de la dégradation<sup>37</sup> des macromolécules constitutives du grain existent sous de multiples isoformes. Les travaux actuels ont permis de préciser les enzymes impliquées dans la formation de chacune des liaisons et de proposer des schémas intégrés de biosynthèse<sup>38,39,40,41</sup> Cependant, aucun modèle n'apparaît satisfaisant pour expliquer l'interaction des différentes enzymes pour la synthèse de l'amylose et de l'amylopectine, et leurs modes d'association conduisant au grain d'amidon<sup>42</sup>. Il est également important de souligner que cette forme de réserve de carbone, à la fois très condensée et métabolisable, n'a jamais pu être reproduite *in vitro*.

De nombreux travaux de transgénèse ont été réalisés, essentiellement chez la pomme de terre, en vue notamment de modifier le rendement et/ou la structure de l'amidon pour générer des structures et propriétés fonctionnelles intéressantes pour certaines applications industrielles. Deux approches ont été développées avec succès : l'expression hétérologue d'enzymes bactériennes<sup>43,44</sup> et la modulation directe d'activités enzymatiques de la plante<sup>45</sup>. Il a également été démontré la faisabilité de prémodifier l'amidon *in vivo*, par l'expression hétérologue d'enzymes utilisées dans certains process industriels, permettant ainsi de réduire les coûts et les impacts écologiques des étapes de modification de l'amidon<sup>46,47</sup>.

### Verrous et questions de recherche

Quatre difficultés majeures retardent néanmoins l'amélioration directe de l'amidon par voie génétique :

- La première tient à la complexité des voies anaboliques dont la compréhension n'est encore que partielle.

<sup>36</sup> Ball, S. G., and M. K. Morell. 2003. From bacterial glycogen to starch: Understanding the biogenesis of the plant starch granule. *Annual Review of Plant Biology* 54:207-33.

<sup>37</sup> Smith, A. M. 2001. The biosynthesis of starch granules. *Biomacromolecules* 2(2):335-41.

<sup>38</sup> Ball, S., H. P. Guan, M. James, A. Myers, P. Keeling, G. Mouille, A. Buleon, P. Colonna, and J. Preiss. 1996. From glycogen to amylopectin: A model for the biogenesis of the plant starch granule. *Cell* 86(3):349-52.

<sup>39</sup> Zeeman, S. C., T. Umemoto, W. L. Lue, P. Au-Yeung, C. Martin, A. M. Smith, and J. Chen. 1998. A mutant of *Arabidopsis* lacking a chloroplastic isoamylase accumulates both starch and phytylglycogen. *Plant Cell* 10(10):1699-711.

<sup>40</sup> Smith, A. M. 2001. The biosynthesis of starch granules. *Biomacromolecules* 2(2):335-41.

<sup>41</sup> James, M. G., K. Denyer, and A. M. Myers. 2003. Starch synthesis in the cereal endosperm. *Current Opinion in Plant Biology* 6(3):215-22.

<sup>42</sup> Planchot, V., S.G. Ring, A.J. MacDougall, M. Axelos, Y. Popineau, and P. Colonna. 2007. Functional Plant Genomics. Pp. 637-61 in *From Genomics to Self-Assembly*, edited by J.F. Morot-Gaudry, P. Lea, and J.F. Briat: Raju Primlani Pub. Editions Science Publishers.

<sup>43</sup> Stark, D. M., K. P. Timmerman, G. F. Barry, J. Preiss, and G. M. Kishore. 1992. Regulation of the amount of starch in plant-tissues by ADP glucose pyrophosphorylase. *Science* 258(5080):287-92.

<sup>44</sup> Shewmaker, C. K., C. D. Boyer, D. P. Wiesenborn, D. B. Thompson, M. R. Boersig, J. V. Oakes, and D. M. Stalker. 1994. Expression of *Escherichia-coli* glycogen-synthase in the tubers of transgenic potatoes (*Solanum-tuberosum*) results in a highly branched starch. *Plant Physiology* 104(4):1159-66.

<sup>45</sup> Visser, R. G. F., I. Somhorst, G. J. Kuipers, N. J. Ruys, W. J. Feenstra, and E. Jacobsen. 1991. Inhibition of the expression of the gene for granule-bound starch synthase in potato by antisense constructs. *Molecular and General Genetics MGG* 225(2):289-96.

<sup>46</sup> Oakes, J. V., C. K. Shewmaker, and D. M. Stalker. 1991. Production of cyclodextrins, a novel carbohydrate, in the tubers of transgenic potato plants. *Bio-Technology* 9(10):982-86.

<sup>47</sup> Pen, J., L. Molendijk, W. J. Quax, P. C. Sijmons, A. J. J. Vanoooyen, P. J. M. Vandenzelen, K. Rietveld, and A. Hoekema. 1992. Production of active *Bacillus-licheniformis* alpha-amylase in tobacco and its application in starch liquefaction. *Ibid.* 10(3):292-96.



- La deuxième est due à la manipulation de génomes complexes dans les céréales et les tubercules.
- La troisième résulte de l'hétérogénéité du stockage de l'amidon dans un organe de réserve, où des parties du tissu peuvent être en fin d'accumulation d'amidon alors que d'autres sont encore actives.
- La dernière réside dans la méconnaissance des mécanismes physico-chimiques impliqués dans la biosynthèse. L'un des verrous majeurs concerne l'articulation des mécanismes d'initiation de la synthèse des biopolymères, ainsi que des voies de polymérisation, avec les mécanismes et les cinétiques d'association locale des molécules d'amylose et d'amylopectine (séparation de phase, formation de doubles hélices, cristallisation). La biosynthèse de l'amidon n'a pas lieu selon un schéma où la synthèse de la molécule serait suivie par son agrégation avec d'autres pour former des cristallites dont l'association donnerait des grains. Aucune macromolécule soluble n'est récupérable en cours de biosynthèse, et les grains d'amidon en cours d'élaboration présentent les mêmes caractéristiques que les grains natifs, à la taille près.

En découlent plusieurs questions de recherche :

- Mieux comprendre les voies de biosynthèse de l'amidon, le déterminisme des caractères d'intérêt (rapport amylose-amylopectine, présence de groupements phosphates (caractère positif) et des lipides pour les céréales (caractère négatif)) et les facteurs de transcription qui régulent l'accumulation des différentes enzymes impliquées, leurs régulations respectives par les concentrations en sucres, le développement ou les facteurs environnementaux pour les moduler le plus spécifiquement possible, en limitant les perturbations du métabolisme général de la plante.
- Comprendre les relations structure – propriétés d'usage : pour une application donnée, hiérarchiser le poids fonctionnel du taux de branchement, du rapport amylose / amylopectine, du taux de phosphorylation ou de la taille des granules ?

A la convergence des chapitres amidon et protéines pour les céréales, se pose la question de la texture des grains. Au niveau de l'albumen, lors de la dessiccation, un effondrement des structures cellulaires conduit d'abord à la formation d'une matrice protéique, puis à une structure composite associant les grains d'amidon et la matrice protéique. Ces interactions amidon / matrice protéique dans les grains de céréales sont à la base de deux caractères technologiques des grains, la vitrosité et la dureté. Fonctionnellement reliés, ces deux caractères sont sous dépendance génétique pour la dureté et écophysiological pour la vitrosité. Toutefois la maîtrise au niveau de la production agricole reste aléatoire, ce qui complique les procédés de bioraffinerie, qui devront être plus ou moins drastiques en fonction de la texture du grain.

- Il est nécessaire qu'une étude de la compréhension de la formation de la texture des albumens soit entreprise, par analogie avec la formation des matériaux sous dessiccation, en associant les mécanismes physicochimiques et les mécanismes biologiques, avec l'expression de gènes impliqués dans le caractère dureté.
- l'hétérogénéité de la compacité de l'albumen, montrant des gradients radiaux et verticaux dans le grain de blé en particulier, conduit à donner un rôle important au sillon dans le grain de blé pour la conception et la conduite des procédés technologiques. La maîtrise de la profondeur de ce sillon, voire sa disparition, serait une rupture majeure pour les industries de fractionnement par voie sèche.

### 3.2.3.3. Les lipides

Les acides carboxyliques (acides gras libres) produits actuellement à l'échelle industrielle à partir de matières premières renouvelables ont des longueurs de chaînes bien définies (C18-C22 pour les produits d'origine tempérée ; C8-C18 pour les dérivés des huiles de palme, palmiste et coprah d'origine tropicale), à nombre pair d'atomes de carbone. En fait cette famille biochimique recouvre une diversité moléculaire peu connue (Tableau 9).

Tableau 9: diversité des structures chimiques présentes dans les lipides.

Classe	
Triglycérides avec des acides gras exotiques	Chaînes hydrocarbonées monofonctionnelles : ramifiées ou à nombre impair d'atomes de carbone, chaînes normales hors C16-C18 (courtes, moyennes, ou longues C22-C30), y compris isomères de position des insaturations (C=C)
	Chaînes contenant une deuxième fonction oxygénée, mono- ou poly-hydroxylées ou di-carboxyliques (notamment en position en position (C terminal)) ; méthoxylées, contenant un cycle furannique
Acyl glycérols	Glycérides partiels, phospholipides, galactoglycérides
Lipides complexes	Type ester avec un alcool <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cires simples (mono esters d'acides gras et d'alcools simples) type jojoba, tournesol, crambe, Carnauba <i>copernicia prunifera</i>, canne à sucre, herbacées, cf procédé</li> <li>• Cires complexes, esters de diols à longue chaîne de type acide mycolique, C33 sans activité recherchée dans le domaine pharmaceutique (antibiotiques),</li> <li>• Polymères réticulés ou non, type cutine, subérine ; à usage direct (cf liège, peau de pomme de terre) ou comme source de monomères, d'acides poly hydroxylés,</li> <li>• Glycolipides (étudiés en raison de leur rôle structural des membranes ; production envisageable par génie fermentaire).</li> </ul>
	Présence d'un hétéroatome <ul style="list-style-type: none"> <li>• Phosphorés : sphingolipides et esters (céramides végétaux)</li> <li>• Sulfonés (type glucolipides)</li> <li>• Sulfates et disulfates (ex champignons) ?</li> </ul>

En découlent une multitude d'applications, chacune pouvant être considérée comme une niche. Cependant ces volumes d'applications, mêmes réduits, doivent retenir notre attention pour trois raisons :

- Ce sont des applications à haute valeur ajoutée, à la différence des biocarburants par exemple.
- Les sources usuelles sont des co-produits de la bioraffinerie, mal valorisés comme les cires présentes dans les peaux de tomates.
- Les bioconversions peuvent permettre de créer des sources plus abondantes que celles seulement « récoltées » dans les organes végétaux habituels.

Le glycérol occupe un plan à part dans ce paysage. Les dérivés du glycérol sont multiples : propane diols (et esters dérivés), acide lactique, acide acrylique, épichlorhydrine, cétones, acétals, éthers (C4 – C8 en chaîne normale comme additifs carburants), dérivés chiraux ou hétéroatomes (cycles azotés). La construction d'une plateforme de démonstration dédiée à une nouvelle chimie du C3 est souhaitable.

Enfin les lipides entrent aussi dans des structures mixtes : les chaînes lipides-poly-isoprène qui sont des sources alternatives de caoutchouc, sont des associations courantes dans le règne végétal.

Les applications actuelles sont très riches, à la base de l'oléochimie :

- En intermédiaires de synthèse (en tant que bases oléochimiques nouvelles, hétéroatomiques), avec des sorties dans les polymères. Les isomères de position des doubles liaisons (C18 :1, C18 :2) donneront accès à des dérivés différents après une étape ultérieure de synthèse (mono et di-acides ou alcools à chaîne moyenne ou courte, après rupture par oxydation, ou condensation par addition de type Diels-Alder, méthathèse).

Et aussi dans :

- Les biocarburants, pour les acides courts, saturés ou mono-insaturés, ramifiés. Les chaînes ramifiées trouveront par exemple des applications dans le domaine du biodiesel (sous forme d'esters d'alcools courts), où elles amélioreront les caractéristiques à basse température, sans présenter les inconvénients des insaturations C=C, en termes de stabilité à l'oxydation.

Les principales solutions technologiques disponibles sont :

- le biodiesel par transestérification directe, à partir d'huiles végétales possédant un indice de cétane acceptable, une bonne tenue au froid et une bonne stabilité à l'oxydation. Les huiles répondant à ces critères sont celles qui présentent un fort pourcentage en acide oléique : le colza, le tournesol oléique et dans une moindre mesure le soja (22 % acide oléique).
- le biodiesel par hydrogénation, à partir du palmier, de l'arachide et de la caméline. Le kérosène est un cas particulier nécessitant des huiles riches en acides gras à chaîne moyenne (8 à 12 atomes de carbone).
- Les biolubrifiants sur base végétale ou mixte (petro) pour les fluides hydrauliques.
- Les tensioactifs dans toutes formulations y compris alimentaires.
- Les adjuvants de formulation phytosanitaire, excipient pharmaceutique, cosmétique.
- Les solvants pour phytosanitaires, procédés chimiques, nettoyage et protection (électronique).
- Les colles pour matériaux composites (remplacement colle urée-formol).
- Les composés « bio-actifs » : nutraceutique, préservation (anti-oxydants), phytosanitaire, préservation du bois (antifongiques).

La diversification des chaînes « grasses » accessibles permettrait de répondre à des besoins non satisfaits actuellement dans les domaines des intermédiaires chimiques et /ou de diversifier les sources d'approvisionnement. Ces acides gras seront recherchés sous la forme de triglycérides, forme facilement récupérable sous laquelle ils se trouvent synthétisés le plus souvent.

Les acides gras végétaux présentent un anabolisme qui commence à être décrypté. En effet, la synthèse des lipides chez les plantes oléagineuses fait intervenir trois compartiments cellulaires. Dans les chloroplastes, les acides gras ubiquitaires sont synthétisés par l'acide gras synthase à partir d'acétyl-CoA et de malonyl-ACP. Le C18:0 est en grande partie pris en charge par une 9 désaturase qui introduit une double liaison sur la chaîne carbonée conduisant à la formation d'oléoyl-ACP. La longueur de la chaîne carbonée des acides gras est contrôlée par l'Acyl-ACP thioestérase qui génère des acides gras libres. Ceux-ci sortent du chloroplaste pour être pris en charge par une acyl-CoA synthétase formant des acyl-CoAs qui constituent le pool d'acyl-CoAs. Ces acyl-CoAs sont les substrats de différentes enzymes membranaires localisées dans le réticulum endoplasmique qui vont, soit les intégrer dans les phospholipides (acyltransférases) où ils vont pouvoir subir des désaturations successives ou bien introduire des groupes fonctionnels, soit les allonger en acyl-CoAs à très longues chaînes (élongases). Il en résulte que la composition du pool d'acyl-CoAs est fortement modifiée et va déterminer la composition de l'huile de la graine. Ces différentes modifications possibles des acides gras ne sont pas présentes chez toutes les plantes et ceci explique que pour la plupart des huiles végétales, l'acide oléique (C18:1) soit l'acide gras majoritaire. *A contrario*, d'autres huiles végétales sont enrichies en un acide gras particulier comme l'acide ricinoléique (C18:0 12OH) chez le ricin. La combinaison de plusieurs de ces modifications est également possible et explique la grande variété des acides gras existant dans le règne végétal.

## Verrous et questions de recherche

L'ampleur des applications actuelles des lipides conduit à un ensemble de verrous, dont le principal est

la diversité moléculaire des mélanges d'acides gras. La connaissance des voies de biosynthèse des triacylglycérols a permis d'identifier des étapes importantes (enzymes) qui vont déterminer la nature des acides gras. Des modifications génétiques de la nature et de la composition en acides gras des triacylglycérols ont été réalisées, mais plusieurs étapes limitantes ont été identifiées. Il est donc nécessaire de continuer à explorer la biodiversité pour identifier de nouvelles sources de lipides non usuels et élucider les voies de synthèse d'acides gras particuliers.

Les questions de recherche qui en découlent portent soit sur la biosynthèse, soit sur les relations structure-activité :

- Etudier la biogénèse des lipides de réserve (acylglycérols) dans la cellule oléifère, sous différentes conditions, en vue de l'optimisation de la production ; conservation des oléosomes ; quelles limites attendues en termes de bioaccumulation ? (par exemple si riches en glycérides partiels).
- Identifier les mécanismes de régulation de la synthèse des acides gras et des lipides de réserve (nouveaux facteurs de transcription, promoteurs spécifiques) dans le but d'augmenter la synthèse et éventuellement l'accumulation dans d'autres organes que les graines (feuilles, plastoglobules).
- Identifier de nouvelles protéines impliquées dans des voies de biosynthèse d'acides gras spécifiques (hydroxylases, époxydases, KAS) ou pour des lipides spécifiques (acyltransférases) à partir des familles multigéniques existantes chez les plantes modèles et moins communes. Comparaison des voies de biosynthèse entre graines et fruits oléagineux.
- Identifier de nouvelles étapes de la synthèse cellulaire qui modulent ou limitent la synthèse de composés d'intérêt (goulots d'étranglements) et s'inspirer de la diversité biochimique pour améliorer-optimiser ces étapes.
- Comparer le potentiel de production entre espèces oléagineuses modèles (entre plantes et algues par exemple) pour une même série de molécules cibles (structures glycéridiques ou non glycéridiques).
- Identifier et élucider les voies de biosynthèse d'acides gras particuliers de molécules chirales utiles (conservation ou inversion de la chiralité), par exemple comme solvants (pour l'extraction sélective) ou matériaux « intelligents ».

#### 3.2.3.4. Les protéines

Seule est envisagée dans ce rapport la production de masse de protéines pour des usages industriels, ayant des sorties non-alimentaires, ce qui représente de forts tonnages annuels. Les plantes de grande culture apparaissent donc comme une cible privilégiée pour ce type de production.

Les protéines visées sont de préférence celles qui sont produites en quantité par les plantes et concentrées dans un organe, c'est-à-dire les protéines de réserve. Les grains et graines présentent l'avantage d'une stabilisation naturelle de la matière première due à la dessiccation de l'organe de biosynthèse et de stockage. Les feuilles en revanche offrent des possibilités de très forts rendements en protéines à l'hectare, mais sont plus difficiles à conserver après récolte. Les activités biologiques présentes dans ce matériel couplées à sa teneur en eau très élevée peuvent engendrer très tôt après la récolte des modifications chimiques et enzymatiques des protéines (oxydation, brunissement, hydrolyse,...), difficiles à contrôler et qui peuvent entraîner des variations majeures de leurs propriétés physicochimiques et fonctionnelles.

La production des enzymes pour les biotechnologies blanches est traitée dans le chapitre 3.2.6.2, d'autant que les microorganismes semblent plus adaptés pour cette production que les plantes de grande culture. Un très large spectre d'activités enzymatiques est d'ores et déjà produit industriellement par voie microbienne en exploitant la biodiversité de différentes collections de microorganismes. Dans le cas des plantes, la connaissance du rôle et de la spécificité des enzymes impliquées dans diverses

voies métaboliques pourrait toutefois permettre d'enrichir le spectre de ces activités mais aussi d'envisager la modification enzymatique *in situ* de molécules d'intérêt, au cours des processus de biosynthèse ou par des traitements post-récolte.

Les protéines de réserve produites majoritairement par les plantes de grande culture présentent une diversité de type selon l'espèce considérée avec deux classes : (i) colza, tournesol, pois, soja et riz produisent essentiellement des albumines et des globulines, (ii) blé et maïs produisent essentiellement des prolamines.

Il existe une production industrielle de protéines végétales (concentrés, isolés, tourteaux, gluten) dont une fraction est déjà utilisée ou utilisable pour des usages non-alimentaires (notamment cosmétiques), soit directement après extraction, soit après modification chimique ou enzymatique. Les domaines concernés sont les tensio-actifs<sup>48</sup> et les matériaux<sup>49</sup>.

En raison du développement de l'amidonnerie de blé en Europe, une attention doit être accordée au gluten. Certaines protéines de réserve des céréales (sous-unités de gluténines de haut poids moléculaire du blé) possèdent du fait de leurs structures à motifs répétés des propriétés proches des polymères, propriétés intéressantes pour les applications « matériaux ». Les hydrolysats de gluten sont utilisés pour faire des adhésifs, employés en cosmétique comme agents moussants, ajoutés à des détergents pour stabiliser les enzymes ou aux encres pour en réduire le temps de séchage. Enfin, ils peuvent être incorporés à la fabrication de matériaux (aération du béton, résistance au choc des céramiques) ou utilisés comme produits biodégradables dans le blanchiment du papier. La kafirine qui est la principale protéine de stockage dans les grains de sorgho (12 % du poids du grain) est un biopolymère aux propriétés intéressantes pour les emballages alimentaires biodégradables<sup>50</sup>.

Les potentialités des protéines de pois, plus particulièrement la fraction albumine, comme agents émulsifiants et moussants, déjà largement explorées dans le domaine alimentaire, peuvent également être exploitées dans le domaine des détergents et de la cosmétique. En outre, par rapport à d'autres protéines végétales, les protéines de pois présentent une très grande réactivité chimique : le greffage de chaînes aliphatiques, de groupements chargés et de dérivés glycosylés permet de modifier significativement les propriétés fonctionnelles des globulines (solubilité, propriétés gélifiantes, émulsifiantes et moussantes) ouvrant différents domaines d'applications comme celui des tensioactifs, des détergents, des adhésifs et des colles. Les protéines homologues du soja présentent le même spectre de fonctionnalités.

## Verrous et questions de recherche

En préliminaire, il convient de souligner que les usages non alimentaires des protéines végétales conduisent à négliger deux caractéristiques qui ont fondé les avancées qualitatives sur les protéines en alimentations humaine et animale : leur digestibilité et la balance des acides aminés. Les stratégies d'amélioration variétale à mettre en œuvre seront différentes.

- Le point commun à ces différentes familles de protéines est leur fort polymorphisme, renforcé par une variabilité génétique intra et inter espèces. Pour chaque espèce, chaque famille de protéines de réserve est constituée d'un nombre plus ou moins important d'isoformes (variabilité génétique et post-traductionnelle), présentes en proportions variables d'une variété à l'autre et en fonction des conditions

<sup>48</sup> Axelos, M. A. V., S. Bérot, I. Schmidt, and J. Guéguen. 2006. Propriétés tensioactives et détergentes de biopolymères amphiphiles. Pp. 271-304 in *La chimie verte*, edited by P. Colonna. Paris: Lavoisier.

<sup>49</sup> Guilbert, S., M.H. Morel, and B. Cuq. Ibid. Protéines matériaux. Pp. 179-201.

<sup>50</sup> Emmambux, M.N., Stading, M., Taylor, R.J.N. 2004. *J. Cereal Sci.*, 40(2):127-135.

de culture. Les protéines de réserve sont donc caractérisées par une grande hétérogénéité, ce qui peut constituer un handicap pour leur utilisation en chimie verte, en rendant plus difficile le contrôle de leur réactivité et de leurs propriétés physico-chimiques.

- Renforcement de l'expression des isoformes dont les performances technologiques sont les plus proches des nécessités d'usage.
- Optimisation des structures par mutagenèse dirigée pour atteindre le niveau de performance des molécules fossiles concurrentes, requis par les industries utilisatrices. Ces modifications peuvent passer par une adaptation de la séquence (modification du gène de structure) pour introduire ou optimiser une fonctionnalité technologique ou une réactivité et/ou par l'introduction *in planta* de modifications post-traductionnelles contrôlées et non conventionnelles (dérivation de groupements réactifs). Une autre option plus radicale consiste à produire *in planta* des polypeptides issus d'un design *de novo* fondé sur les propriétés d'usage visées<sup>51,52,53</sup>.

Les trois verrous majeurs sont :

- La complexité de leur composition et leur très grand polymorphisme au sein d'une même famille, ce qui a deux conséquences : (i) une limitation des rendements d'extractions avec le besoin de concevoir des technologies avec plusieurs étapes d'extractions successives, (ii) une limitation des performances d'usages, la présence de molécules moins performantes affectant fortement les propriétés globales du mélange de protéines.
- L'identification des propriétés physicochimiques attendues, en amont des propriétés d'usage. Pour le gluten, il est nécessaire de définir quelles doivent être ses propriétés pour satisfaire aux usages industriels hors panification : quelle teneur en protéines, quelle teneur en groupements sulfhydryls et degré d'oxydo-réduction, quels déterminants pour sa viscosité, en quoi ces propriétés sont-elles différentes de celles requises en panification ?
- La gamme réduite de propriétés physicochimiques à partir des protéines de réserve. L'expression de nouvelles protéines, issues de connaissances acquises dans d'autres organismes et pour d'autres fonctions, et de polypeptides, est une piste technologique déjà bien démontrée dans le cas de protéines thérapeutiques ou à destinations biomédicales<sup>54,55</sup> avec différentes plantes (maïs, blé, riz, orge, luzerne, tabac). Le concept peut être étendu à des protéines et polypeptides à finalité industrielle pour des usages de masse<sup>56,57</sup>, en intégrant des contraintes particulières à cette sortie, notamment les compositions et structures spécifiques, le rendement en protéines d'intérêt et leur récupération par des techniques simples, propres et peu coûteuses et respectant les co-produits. Dans cette optique la production de protéines ou polypeptides de type « fibrillaires » élastomériques, caractérisés par des structures répétitives et l'assemblage de modules fonctionnels (elastin-like, ELP, soie d'araignée, SPS, et autres) pourrait être un objectif pertinent du fait de leurs propriétés techniques et des possibilités de

---

<sup>51</sup> Sanford, K., and M. Kumar. 2005. New proteins in a materials world. *Current Opinion in Biotechnology* 16(4):416-21.

<sup>52</sup> Yang, J. J., L. A. Barr, S. R. Fahnestock, and Z. B. Liu. 2005. High yield recombinant silk-like protein production in transgenic plants through protein targeting. *Transgenic Research* 14(3):313-24.

<sup>53</sup> Kumar, M., K. J. Sanford, W. P. Cuevas, M. Du, K. D. Collier, and N. Chow. 2006. Designer protein-based performance materials. *Biomacromolecules* 7(9):2543-51.

<sup>54</sup> Ma, J. K. C., P. M. W. Drake, and P. Christou. 2003. The production of recombinant pharmaceutical proteins in plants. *Nature Reviews Genetics* 4(10):794-805.

<sup>55</sup> Lin, M., S. Rose-John, J. Grotzinger, U. Conrad, and J. Scheller. 2006. Functional expression of a biologically active fragment of soluble gp130 as an ELP-fusion protein in transgenic plants: purification via inverse transition cycling. *Biochemical Journal* 398:577-83.

<sup>56</sup> Scheller, J., K. H. Guhrs, F. Grosse, and U. Conrad. 2001. Production of spider silk proteins in tobacco and potato. *Nature Biotechnology* 19(6):573-77.

<sup>57</sup> Yang, J. J., L. A. Barr, S. R. Fahnestock, and Z. B. Liu. 2005. High yield recombinant silk-like protein production in transgenic plants through protein targeting. *Transgenic Research* 14(3):313-24.

modulation des structures et des propriétés offertes par le génie génétique<sup>58</sup>. Parce qu'elles présentent plusieurs analogies avec les prolamines naturellement présentes à concentrations plus ou moins élevées dans les graines des principales ressources européennes<sup>59</sup>, on peut supposer que leur biosynthèse et leur stockage dans ces plantes serait possible avec des rendements suffisants. Un raisonnement analogue pourrait s'appliquer aux albumines tensioactives.

En vue de faciliter leur récupération, on pourrait orienter le choix de l'espèce sur la base de sa composition en protéines de réserve sauvages qui permette d'exploiter une grande différence de propriétés physicochimiques des protéines sauvages et recombinantes qui pourraient être co-localisées dans les mêmes organes, les mêmes tissus ou les mêmes organites. Par exemple incorporer une séquence ELP dans un protéagineux (pois) faciliterait la récupération par simple différence de solubilité ou de comportement de coagulation thermique. A l'inverse on pourrait choisir d'exprimer ces protéines « fibrillaires » en complément des prolamines sauvages (voire en réprimant ces dernières) dans une céréale pour tirer profit d'une machinerie cellulaire apte à synthétiser et stocker des polypeptides répétitifs : ELP exprimées dans le blé, l'orge ou le maïs en interaction avec des gluténines, des hordéines et des zéines. Il faudrait alors valider la valeur d'usage de ces nouveaux complexes ou mettre au point des méthodes simples mais performantes de récupération sélective.

Les questions de recherche qui en découlent sont :

- Mécanismes d'élaboration des corpuscules protéiques, puis de la matrice protéique, avec une attention aux mécanismes physico-chimiques présents dans l'effondrement des structures.
- Modifications post-traductionnelles affectant les protéines de réserve.
- Méthodes de modifications de la séquence primaire des protéines de réserves, sur les critères : (1) présence et répartition des acides aminés sensibles le long de la chaîne protéique. (2) répartition des acides aminés hydrophobes (Ile, Val, Leu, Phe, Cys, Met, Ala, Try, Tyr) et hydrophiles. La question de la polymolécularité des protéines de réserve doit être examinée en regard de la viabilité des graines.
- Analyse combinatoire des phénotypes réalisables à partir des protéines de réserve.
- Développement de méthodes de modélisation et de prédiction des propriétés physico-chimiques à partir de la séquence primaire des protéines.

### 3.2.3.5. Oses et oligosaccharides

Le **glucose** et le **fructose** sont les seuls oses présents en quantités significatives dans les organes de réserves, à des concentrations faibles (< 0,5 % ms) sauf le grain de blé qui peut contenir jusqu'à 1,5 % de fructose.

Le **saccharose** (D-glucopyranosyl ( $\alpha$ 1  $\rightarrow$   $\beta$ 2) D-fructofuranoside) occupe une place centrale en raison de sa forte teneur dans la racine de betterave (jusqu'à 75 % ms racine) et la tige de canne à sucre (jusqu'à 50 % ms tige). Synthétisé dans les feuilles, le saccharose est stockée dans les vacuoles des tiges (canne) et de racines (betterave). Les avantages technologiques de cette molécule sont :

- Facilité d'extraction y compris jusqu'à la cristallisation,
- Composant majoritaire dans la canne et la betterave, transformant les jus de sucreries et les mélasses en solutions composés essentiellement d'un seul composant.
- Universalité de sa fermentiscibilité par les micro-organismes industriels<sup>60,61</sup>.

<sup>58</sup> Rodriguez-Cabello, J. C., J. Reguera, A. Girotti, M. Alonso, and A. M. Testera. 2005. Developing functionality in elastin-like polymers by increasing their molecular complexity: the power of the genetic engineering approach. *Progress in Polymer Science* 30(11):1119-45.

<sup>59</sup> Tatham, A. S., and P. R. Shewry. 2000. Elastomeric proteins: biological roles, structures and mechanisms. *Trends in Biochemical Sciences* 25(11):567-71.

<sup>60</sup> Blanc, P. et Goma G. 2006. Valorisations non alimentaires des productions agricoles par voie biologique. Dans *La Chimie Verte*. Ed. Paul Colonna. Lavoisier. 77-98.

- Existence d'un large corpus de connaissances pour la sucrochimie<sup>62</sup>

La limite technologique du saccharose réside dans son stockage dans des organes vivants (tige et racine) qui vont métaboliser le saccharose dans l'intervalle entre la récolte et l'extraction, induisant la saisonnalité de fonctionnement des sucreries. Il convient de souligner que le saccharose est aussi présent dans les céréales (0,5 – 1,5 % ms) et les légumineuses (1,5 – 5 % ms) avec des valeurs extrêmes jusqu'à 6,8 % pour le haricot et 4,5 % pour l'avoine.

Deux familles d'oligosides accompagnent le saccharose dans de nombreuses graines de mono- et dicotylédones :

- les  **$\alpha$ -galactosides**, construits à partir du saccharose, présents en particulier dans les légumineuses,
- raffinose
- (D-galactopyranosyl) ( $\alpha 1 \rightarrow 6$ ) (D-glucopyranosyl) ( $\alpha 1 \rightarrow \beta 2$ ) D-fructofuranoside)
- stachyose
- (D-galactopyranosyl) ( $\alpha 1 \rightarrow 6$ ) D-galactopyranosyl) ( $\alpha 1 \rightarrow 6$ ) (D-glucopyranosyl) ( $\alpha 1 \rightarrow \beta 2$ ) D-fructofuranoside)
- verbascose
- (D-galactopyranosyl) ( $\alpha 1 \rightarrow 6$ ) (D-galactopyranosyl) ( $\alpha 1 \rightarrow 6$ ) (D-galactopyranosyl) ( $\alpha 1 \rightarrow 6$ ) (D-glucopyranosyl) ( $\alpha 1 \rightarrow \beta 2$ ) D-fructofuranoside)

et les **fructosanes**, dont le composant le plus connu est l'inuline.

D-fructofuranosyl ( $\beta 2 \rightarrow 1$ ) D-fructofuranoside

L'inuline, présente chez les topinambours, a un degré de polymérisation de 30 à 80 unités.

Les  $\alpha$ -galactosides sont essentiellement le raffinose et ses homologues supérieurs le stachyose, le verbascose et l'ajugose. Ils sont présents en quantités importantes (7 % pour la féverole, 9,5 % pour le lupin) ainsi que les  $\alpha$ -galactosides du pinitol et du myo-inositol dans les graines de légumineuses. L'orge et le blé contiennent les deux séries,  $\alpha$ -galactosides et fructanes. L'avoine contient préférentiellement la série des  $\alpha$ -galactosides. Le seigle contient des fructanes de haute masse moléculaire à de fortes concentrations alors que l'orge et le blé ont surtout des tri- et tétrasaccharides. Les légumineuses contiennent uniquement la série des  $\alpha$ -galactosides avec des teneurs pouvant atteindre 13 % dans le soja et 15 % ms dans le pois.

Bien que théoriquement fermentiscibles, ces composés n'ont pas les mêmes atouts que le saccharose pour constituer des milieux de fermentation universels, car leur métabolisation nécessite plusieurs enzymes. Un second inconvénient est que les procédés aqueux de fractionnement dans les amidonneries de céréales comme de légumineuses (pois, haricot) ne conduisent pas à des solutions aussi concentrées que celles rencontrées dans les sucreries de saccharose ; leurs concentrations est une opération très coûteuse en énergie.

La conséquence est que la minimisation des teneurs en  $\alpha$ -galactosides et les fructosanes sont des enjeux pour ces légumineuses. Le métabolisme de ces composés n'est pas encore formellement établi. Actuellement ce sont surtout les fonctions biologiques de ces composés qui font l'objet de publications.

---

<sup>61</sup> Pourquoié, J., 2006. Bioéthanol : comparaison des sources amidon, saccharose et lignocellulose. Dans *La Chimie Verte*. Ed. Paul Colonna. Lavoisier. 395 – 417.

<sup>62</sup> Queneau, Y et Fitremann J. , 2006. Sucrochimie . Dans *La Chimie Verte*. Ed. Paul Colonna. Lavoisier. 239 – 270.



Tous ces composés à faible masse moléculaire sont souvent importants quantitativement dans les graines à germination rapide. Ces composés s'accumulent pendant la phase de dessiccation des graines. Le saccharose et les cyclitols libres (galacinositol, d-*chiro*-inositol, and *myo*-inositol ) jouent également un rôle dans la protection des semences contre les facteurs de stress qui peuvent intervenir au cours de la germination<sup>63,64</sup>.

D'autres facteurs comme l'infection microbienne ou la salinité du milieu font varier la teneur en saccharose des graines en cours de germination<sup>65,66,67</sup>.

Il convient de noter que les  $\alpha$ -galactosides et fructanes sont en revanche porteurs de propriétés nutritionnelles, puisqu'ils sont considérés comme des prébiotiques. Cette famille comprend des oligosaccharides et des polysaccharides à courtes chaînes constitués approximativement de deux à vingt unités osidiques. Ils échappent à la digestion dans l'intestin grêle et sont des substrats préférentiels pour l'hydrolyse et la fermentation par les bactéries intestinales (bifidobactéries et lactobacilles).

### Questions de recherche

- Anabolisme des  $\alpha$ -galactosides et fructanes
- Rôles biologiques de ces deux familles, pour appréhender de manière systémique les conséquences de la diminution des teneurs en  $\alpha$ -galactosides et fructanes sur la viabilité des graines.

#### 3.2.3.6. Le caoutchouc

Le caoutchouc naturel est un biopolymère isoprénique. Il est constitué de 320 à 35 000 molécules d'isoprène (5 atomes de carbone), reliées par des liaisons cis-1,4 (cis-1,4-polyisoprène). Cet assemblage est réalisé par la « rubber transferase », une cis-prényl transférase, qui catalyse l'addition séquentielle de molécules d'isopentényle diphosphate sur un précurseur allylique, le farnésyl diphosphate (FPP), un métabolite de la voie de l'acide mévalonique. Dans le cas de l'hévéa, la masse moléculaire moyenne du polymère synthétisé est de 1 200 kDa, comprenant environ 18 000 unités isopréniques. Le caoutchouc est synthétisé à la surface de particules en suspension dans le latex, solution colloïdale constituant le cytoplasme des laticifères et comprenant également d'autres composés (protéines, minéraux, sucres et lipides). Le caoutchouc naturel représente l'un des polymères les plus utilisés dans nos sociétés. Il entre dans la fabrication de plus de 40 000 produits, avec des applications dans des domaines aussi divers que le commerce, la défense, les transports et la médecine.

Malgré la disponibilité de produits dérivés du pétrole, le caoutchouc naturel a une haute valeur ajoutée, due à ses propriétés uniques, représentées par son élasticité, sa résilience, sa résistance à l'abrasion

<sup>63</sup> Bentsink L., Alonso-Blanco C., Vreugdenhill D., Tesnier K., Groot S.P.C., Koornneef M. 2000. Genetic analysis of seed-soluble oligosaccharides in relation to seeds storability of *Arabidopsis*. *Plant Physiol.*, 124: 1595–1604.

<sup>64</sup> Blackman S.A., Obendorf R.L., Leopold A.C. 1992. Maturation proteins and sugars in desiccation tolerance of developing soybean seeds. *Plant Physiol.*, 100: 225–230.

<sup>65</sup> Bailly C, Audigier C, Ladonne F, Wagner MH, Coste F, Corbineau F, Come D (2001) Changes in oligosaccharide content and antioxidant enzyme activities in developing bean seeds as related to acquisition of drying tolerance and seed quality. *J Exp Bot* 52:701–708

<sup>66</sup> Blackman SA, Obendorf RL, Leopold AC (1992) Maturation proteins and sugars in desiccation tolerance of developing soybean seeds. *Plant Physiol* 100:225–230

<sup>67</sup> Bewley JD (1997) Seed germination and dormancy. *Plant Cell* 9:1055–1066

et aux chocs ainsi que sa malléabilité à basse température. Bien que le caoutchouc ait été trouvé dans plus de 2 500 espèces de plantes, l'hévéa (*Hevea brasiliensis*, Muell. Arg) est actuellement presque la seule source commerciale de latex naturel capable de fournir des quantités importantes (30 – 50 % par volume de latex frais) de caoutchouc de haute qualité, c'est-à-dire de haut poids moléculaire. Cet arbre pousse essentiellement dans les zones tropicales et subtropicales de l'Asie (Malaisie, Thaïlande et Indonésie), qui fournissent plus de 90 % du caoutchouc naturel mondial.

### Verrous et questions de recherche

- Initiation de la biosynthèse *in vitro* du caoutchouc<sup>68</sup>.
- Analyse des protéines associées aux particules de gomme.
- Valorisation des co-produits des plantes produisant du caoutchouc.
- Développement de levures ou de bactéries transgéniques comme sources de polyisoprénoides pour des applications spécifiques.

### 3.2.3.7. Les métabolites secondaires ou microconstituants

Les métabolites secondaires sont très nombreux (180 000 molécules déjà décrites et environ 4 000 nouvelles molécules chaque année). Ils présentent une variété structurale extraordinaire. De plus une plante produit simultanément de multiples molécules chimiquement différentes ou apparentées (même famille chimique). Les métabolites secondaires ne sont pas également répartis dans les plantes. Ils sont typiquement produits dans un organe, tissu ou type cellulaire spécifique à des stades particuliers de développement (fleur, fruit, graine, feuille,..). Certains sont produits uniquement après une blessure ou une attaque par des bactéries ou des champignons. Ils sont souvent synthétisés dans une partie de la plante et stockés dans une autre.

Les molécules monomères sont généralement de petite taille (< 500). Elles peuvent être fortement oxydées et contenir de l'azote, parfois du soufre et des halogènes. Elles sont généralement chirales. Elles sont présentes en faible quantité dans la plante (rarement plus de 5 % et parfois à l'état de traces).

Les métabolites secondaires sont classés selon leurs voies de biosynthèse en trois catégories :

- Les terpénoïdes, avec plus de 25 000 produits identifiés qui représentent la classe la plus variée du point de vue de la structure de ses composés. Ils comprennent, en effet, des hémiterpènes (molécules en C<sub>5</sub>), des monoterpènes (C<sub>10</sub>), des sesquiterpènes (C<sub>15</sub>), des diterpènes (C<sub>20</sub>), des tétraterpènes (C<sub>40</sub>) et des polyterpènes (> C<sub>40</sub>), sans oublier les méroterpènes (comme le taxol) constitués de molécules formées à partir de plusieurs voies biosynthétiques.
- Les composés aromatiques (phénoliques).
- Les composés azotés ou alcaloïdes.

Les métabolismes primaires et secondaires du carbone sont couplés par différentes voies métaboliques (Figure 6).

### Figure 6: les couplages de métabolisme I et II

De ces propriétés et particularités découlent l'utilisation industrielle des métabolites secondaires comme

<sup>68</sup> Xie, W. S., C. M. McMahan, A. J. DeGraw, M. D. Distefano, K. Cornish, M. C. Whalen, and D. K. Shintani. 2008. Initiation of rubber biosynthesis: In vitro comparisons of benzophenone-modified diphosphate analogues in three rubber-producing species. *Phytochemistry* 69(14):2539-45.

sources :

- D'actifs biologiques (principes actifs de médicaments, de produits cosmétiques et de compléments alimentaires,.... anti-oxydants, antimicrobiens, anticancéreux, anti-inflammatoires,... dépigmentants,... mais aussi insecticides, fongicides, répulsifs,...).
- D'actifs fonctionnels (arômes, colorants, amérissants, astringents, parfums, produits moussants, émoullients, filtres solaires,...).
- De molécules de base pour la synthèse chimique notamment la synthèse asymétrique de molécules chirales.
- D'adjuvants, additifs et solvants divers.

A ce stade, il convient de souligner que les enjeux de valorisation<sup>69</sup> doivent aussi être décrits en termes de structuration de la chaîne de valeur (vente directe, marchés local, régional, international) avec des déclinaisons différentes selon la taille et la technicité des intervenants. En outre ces plantes dédiées à l'obtention de microconstituants ne sont pas des productions agricoles comme les autres, en raison du poids des réglementations<sup>70</sup>, comme celles relatives à la protection de la biodiversité, aux produits de santé, aux cosmétiques dont les parfums, et celles spécifiques aux phytosanitaires. Un verrou spécifique est celui de l'extraction et de la purification de ces molécules. C'est souvent un savoir-faire complexe, confidentiel, reposant sur le génie des procédés et adapté à chaque couple plante/extrait. Ces procédés pourraient être revus à l'aune des technologies plus récentes, capables de concilier les différents enjeux de la durabilité (Figure 7, source Marin).

#### Figure 7 : cycle de vie des technologies d'extraction et de purification.

Une attention particulière doit être accordée aux molécules présentant des propriétés anti-oxydantes. Tous les organismes vivant en aérobie produisent des radicaux libres, formes moléculaires réactives oxydantes oxygénées (ROS, *Reactive Oxygen Species*) ou oxygénées et azotées (RONS). Très puissants, ces radicaux libres jouent un rôle primordial dans les réactions de défense de l'organisme, en particulier contre les microbes et les virus. Cependant, leur accumulation dans les cellules peut devenir toxique pour celles-ci. Si les cellules disposent naturellement d'un système de détoxification contre ces formes réactives, à la fois des enzymes (superoxyde dismutase, catalase, glutathion perxydase,...) et des petites molécules (vitamines E et C,...), ce pouvoir antioxydant se révèle parfois insuffisant en cas de pollutions photochimiques, d'introduction dans les cellules de substances hautement réactives (nanoparticules) ou d'anomalies du système de protection (mutations génétiques, carences,...).

Les extraits végétaux sont particulièrement riches en pouvoir antioxydant et la bibliographie regorge d'exemples d'extraits de plantes bénéfiques pour la santé humaine<sup>71,72,73,74,75,76,77</sup>. Si les propriétés anti-

<sup>69</sup> ODEADO, ONIPPA (2008) Rapport général sur les perspectives de développement des filières des plantes aromatiques, à parfum, et médicinales en outre-mer.

<sup>70</sup> REACH, Directive 98/8/CE

<sup>71</sup> Cao, Y.H., and R.H. Cao. 1999. Angiogenesis inhibited by drinking tea. *Nature* 398(6726):381.

<sup>72</sup> Chakraborty, M., and A. Mitra. 2008. The antioxidant and antimicrobial properties of the methanolic extract from *Cocos nucifera* mesocarp. *Food Chemistry* 107(3):994-99.

<sup>73</sup> Kahkonen, M. P., A. I. Hopia, H. J. Vuorela, J. P. Rauha, K. Pihlaja, T. S. Kujala, and M. Heinonen. 1999. Antioxidant activity of plant extracts containing phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 47(10):3954-62.

<sup>74</sup> Miliauskas, G., P. R. Venskutonis, and T. A. van Beek. 2004. Screening of radical scavenging activity of some medicinal and aromatic plant extracts. *Food Chemistry* 85(2):231-37.

<sup>75</sup> Wojdylo, A., J. Oszmianski, and R. Czemerys. 2007. Antioxidant activity and phenolic compounds in 32 selected herbs. *Ibid.* 105(3):940-49.

<sup>76</sup> Barczy, J. F., H. Rey, Y. Caraglio, P. De Reffye, D. Barthelemy, Q. X. Dong, and T. Fourcaud. 2008. AmapSim: A structural whole-plant simulator based on botanical knowledge and designed to host external functional models. *Annals of Botany* 101(8):1125-38.

oxydantes sont actuellement recherchées en santé humaine, elles sont aussi beaucoup exploitées par l'industrie qui utilise les antioxydants en tant que conservateurs pour les aliments ou les cosmétiques. Enfin, le pouvoir antioxydant est également utile à la plante qui le produit, en l'aidant à se protéger des fortes intensités lumineuses, des radiations UV<sup>78,79</sup> et des stress biotiques ou abiotiques générateurs de ROS.

Peut-on penser que ce pouvoir antioxydant puisse servir de barrière chimique contre les fortes radiations lumineuses ou l'enrichissement en lumière UV, prédits dans le cadre des changements climatiques globaux ? Peut-on envisager d'utiliser ce pouvoir antioxydant naturel dans les traitements phytosanitaires ?

Certains extraits végétaux, et particulièrement ceux des fruits, sont particulièrement riches en pouvoir antioxydant qui est attribué à la présence de composés antioxydants tels que le  $\beta$ -carotène (provitamines A), l'acide ascorbique (vitamine C), le tocophérol (vitamine E), le lycopène, les xanthones et les polyphénols. Ces derniers composés font partie des 140 000 métabolites secondaires recensés chez les végétaux. Parfois fortement représentés, en nombre ou en concentration dans les végétaux, ils sont caractérisés chimiquement par au moins un noyau aromatique portant plusieurs fonctions hydroxyle -OH. La majorité des composés phénoliques est issue de la voie de biosynthèse des phénylpropanoïdes qui débute par la désamination d'un acide aminé, la phénylalanine. Pour simplifier leur classification, on distingue les flavonoïdes, très diversifiés et largement étudiés quant à leur pouvoir antioxydant, et les non-flavonoïdes. La voie de biosynthèse propre aux flavonoïdes débute après la synthèse du coumaroyl-CoA, métabolite intermédiaire de la voie de biosynthèse des lignines.

---

<sup>77</sup> Yoo, K. M., C. H. Lee, H. Lee, B. Moon, and C. Y. Lee. 2008. Relative antioxidant and cytoprotective activities of common herbs. *Food Chemistry* 106(3):929-36.

<sup>78</sup> Grace, S.C., and B.A. Logan. 2000. Energy dissipation and radical scavenging by the plant phenylpropanoid pathway. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 355(1402):1499-510.

<sup>79</sup> Tattini, M., D. Remorini, P. Pinelli, G. Agati, E. Saracini, M. L. Traversi, and R. Massai. 2006. Morpho-anatomical, physiological and biochemical adjustments in response to root zone salinity stress and high solar radiation in two Mediterranean evergreen shrubs, *Myrtus communis* and *Pistacia lentiscus*. *New Phytologist* 170(4):779-94.

## Phenylpropanoid Metabolic Pathway

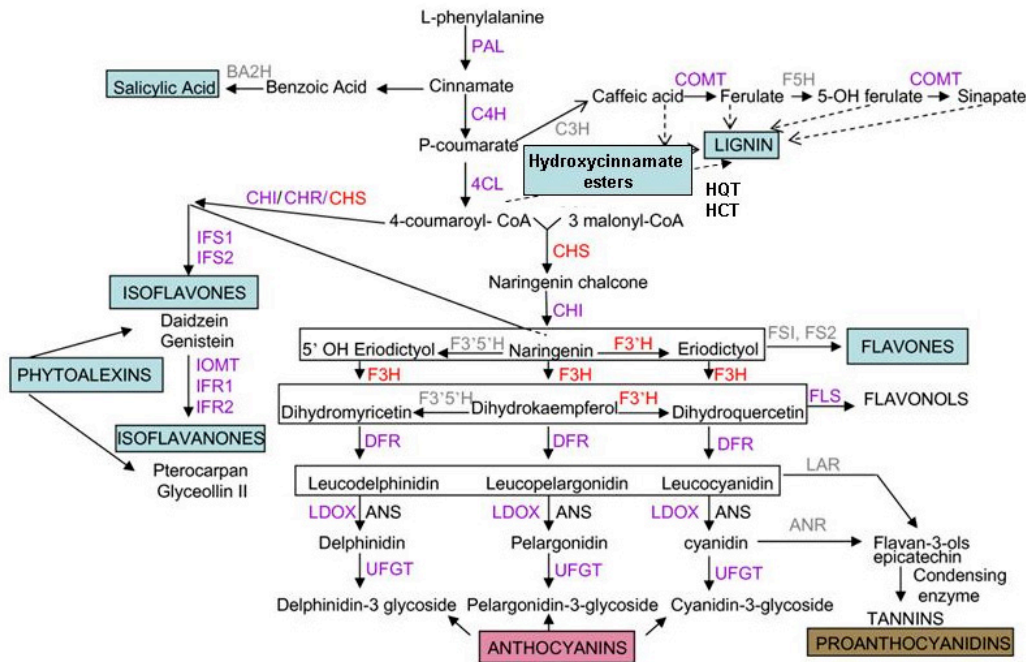


Figure 8 : métabolisme des composés phénylpropanoïdes

Pratiquement toutes les classes de flavonoïdes présentent des composés à activités antioxydantes, que ce soit les flavones ou isoflavones, les tanins (dans le cacao, le café, le thé, le raisin,...) ou les anthocyanes (notamment dans les fruits rouges). Parmi les composés non-flavonoïdes, on recense les acides phénoliques (dans les céréales, les fruits et les légumes) et leurs esters. Ces derniers composés, et plus particulièrement les esters d'acides hydroxycinnamiques, sont des intermédiaires dans la voie de biosynthèse des lignines<sup>80,81</sup>. Leur pouvoir antioxydant est corrélé au nombre d'estérifications présentes sur l'acide hydroxycinnamique (de 1 à 3). L'ester le plus accumulé est l'ester d'acide caféique avec l'acide quinique (acide 5-caféoylquinique, 5-CQA). C'est d'ailleurs dans le genre *Coffea* (famille des Rubiacées) que l'on rencontre la plus forte diversité de formes d'esters d'acides hydroxycinnamiques, ou acides chlorogéniques, avec des composés majeurs : les 3 isomères de l'acide caféoylquinique (CQA), de l'acide féruloylquinique (FQA) et de l'acide dicaféoylquinique (DiCQA). Les Solanacées, telles que le tabac ou la tomate, sont également des plantes accumulatrices d'esters de quinate. Chez ces plantes accumulatrices, la biosynthèse de lignine se fait également au travers de la biosynthèse d'esters de shikimate<sup>82</sup>. Par contre, chez *Arabidopsis*, la biosynthèse de lignine passe obligatoirement et uniquement par la synthèse d'esters du shikimate. Le choix des espèces modèles et

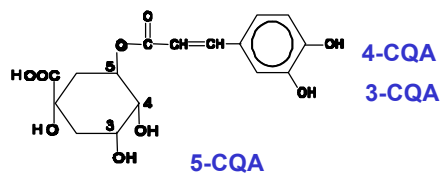
<sup>80</sup> Schoch, G., S. Goepfert, M. Morant, A. Hehn, D. Meyer, P. Ullmann, and D. Werck-Reichhart. 2001. CYP98A3 from *Arabidopsis thaliana* is a 3'-hydroxylase of phenolic esters, a missing link in the phenylpropanoid pathway. *Journal of Biological Chemistry* 276(39):36566-74.

<sup>81</sup> Mahesh, V., R. Million-Rousseau, P. Ullmann, N. Chabrilange, J. Bustamane, L. Mondlot, M. Morant, M. Noirot, S. Hamon, A. De Kochko, D. Werck-Reichhart, and C. Campa. 2007. Functional characterization of two p-coumaroyl ester 3'-hydroxylase genes from coffee tree: evidence of a candidate for chlorogenic acid biosynthesis. *Plant Molecular Biology* 64(1-2):145-59.

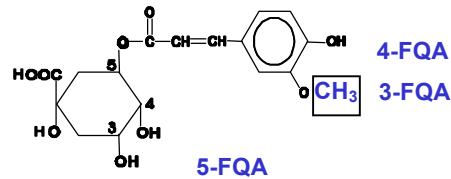
<sup>82</sup> Lepelley, M., G. Cheminade, N. Tremillon, A. Simkin, V. Caillet, and J. McCarthy. 2007. Chlorogenic acid synthesis in coffee: An analysis of CGA content and real-time RT-PCR expression of HCT, HQT, C3H1, and CCoAOMT1 genes during grain development in *C. canephora*. *Plant Science* 172(5):978-96.

d'application est de ce fait un point critique en expérimentation.

#### Les acides caféoylquiniques (CQA)



#### Les acides féruloylquiniques (FQA)



#### Les acides dicaféoylquiniques

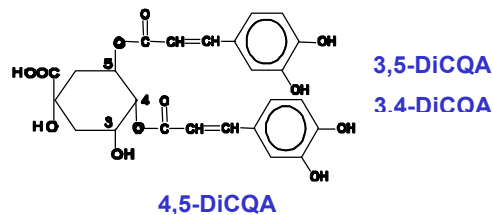


Figure 9 : manque la légende

L'intérêt de ces esters repose également sur le fait qu'ils se situent sur la voie de biosynthèse de la lignine. Leur accumulation dans les tissus de certaines plantes correspond-elle à une mise en réserve de précurseurs de ce biopolymère ? Peut-on intervenir sur la composition de la lignine (sous-unités) des végétaux en modulant la régulation de la biosynthèse et l'accumulation de ces esters ? Inversement, une connaissance plus approfondie de la voie de biosynthèse des phénylpropanoïdes, et plus particulièrement des lignines, permettra-t-elle de maîtriser les niveaux d'accumulation de ces composés, afin d'intervenir sur la résistance des plantes aux agressions de tous ordres ou sur la qualité de leur lignine ? Ensuite, si l'on se réfère au schéma général actuellement proposé de biosynthèse des polyphénols, la synthèse de flavonoïdes et celle de certains monomères de la lignine sont concurrentielles pour la disponibilité en coumaroyl-CoA. Existe-t-il une compétition entre ces deux voies ? Les plantes orientent-elles leur métabolisme vers l'une ou l'autre ? Existe-t-il des organes, tissus, cellules, ou même organelles spécialisés dans la synthèse et/ou l'accumulation de l'une ou l'autre des familles de composés ? Au niveau de la voie de biosynthèse des précurseurs de lignine, peut-on mettre en évidence, comme précédemment observé dans la voie des flavonoïdes, une co-régulation des gènes ? Quels sont les facteurs qui régulent la synthèse des lignines et de leurs précurseurs ? Peut-on retrouver des facteurs de transcription communs aux deux voies ?

Enfin, on sait que la synthèse des métabolites secondaires est fortement liée aux pressions de sélection subies par les plantes au cours de leur évolution et que ces composés sont les témoins des capacités adaptatives des plantes aux facteurs environnementaux. L'apparition de la synthèse de lignine au cours de l'évolution, il y a quelques 300 millions d'années, a permis aux plantes d'acquiescer un port érigé et de sortir du milieu liquide. **On peut se demander si c'est dans cette voie métabolique que seront synthétisés les composés les plus aptes à aider les plantes à s'adapter aux nouvelles conditions climatiques annoncées dans le cadre des changements climatiques.** Un élément de réponse pourrait être apporté en comparant les composés et les gènes impliqués dans la voie de la lignification entre des espèces végétales très anciennes, comme *Amborella* (ancêtre des Angiospermes, toujours vivante et apparue il y a plus de 100 millions d'années) et des espèces « récentes » choisies parmi les Angiospermes et les Gymnospermes.

Un verrou majeur réside dans la maîtrise des teneurs, à la base de la faible reproductibilité de travaux

scientifiques. La régulation des métabolismes secondaires par l'environnement est en fait développée essentiellement dans la vigne. Les différentes théories (ratio C/N, équilibre croissance/différenciation, « défense optimale ») n'ont pas rencontré de validations satisfaisantes pour donner des règles culturales robustes.

### Verrous et questions de recherche

Trois verrous majeurs apparaissent dans ce domaine :

- Dans le cadre d'une approche fonctionnelle, la première question qui se pose est d'ordre méthodologique : comment identifier dans un pool de biomolécules, celles qui sont susceptibles d'avoir les caractéristiques recherchées ?
- L'extension de méthodes automatisant les tests fonctionnels à haut débit de type « structure / fonction » pour établir les molécules les plus idoines à présenter les propriétés d'usage recherchées. C'est cette approche qui sera plus particulièrement à développer.
- La recommandation est d'intégrer la vague de développement analytique de la métabolomique (spectromètre de masse à transformée de Fourier (FT-ICR) couplé à des chromatographes en phase liquide) pour phénotyper les plantes à usage agronomique en vue d'explicitier leurs capacités à synthétiser des composés secondaires, puis de développer des tests fonctionnels à haut débit.

A ce stade, la disponibilité d'une phytothèque ouverte est apparue, pour accélérer les collaborations entre botanistes et phytochimistes en dépassant l'approche par plante au profit d'une approche par voie métabolique. L'accès aux identifications devient plus facile avec des bases de données publiques. Une coopération internationale qui consisterait, comme pour le séquençage de l'ADN, à répartir les familles de métabolites entre de nombreux laboratoires, à charge pour eux d'en identifier les membres, serait d'un grand secours pour progresser.

- L'identification des voies métaboliques, avec la différenciation métabolique dans les tissus où la voie est active, des mécanismes de signalisation qui activent les voies de biosynthèse. Un élément favorable dans une démarche d'amélioration est que beaucoup de microconstituants dérivent d'une voie de biosynthèse commune au départ, celle des phénylpropanoïdes dont le substrat initial est la phénylalanine.
- Développer la chémotaxonomie, en couplant transcriptomique et métabolomique.
- La maîtrise quantitative de la production végétale dans une perspective de durabilité : comment augmenter la teneur en actifs de certaines plantes alors que de nombreux métabolites secondaires sont toxiques pour la plante hôte ? Comment modifier des plantes pour un contenu plus sélectif dans un métabolite secondaire ciblé ou pour une extraction plus aisée des constituants recherchés (organe d'accumulation, épaisseur et nature de certaines parois cellulaires,...) ? Quels sont les mécanismes (rythme et cycles de production de certains métabolites secondaires, stress et elicitation) pour mieux récolter, stocker et fractionner les organes végétaux récoltés ?
- Augmenter les concentrations en microconstituants en détournant le métabolisme basal *via* des technologies ciblées associant modification génétique du plaste et accumulation dans les vacuoles.
- La maîtrise qualitative et quantitative de l'extraction : revisiter les procédés d'extraction avec des technologies modernes (contacteurs à membranes) en accord ou en précédant les évolutions de réglementation, pour des extractions plus sélectives, moins dégradantes, plus économiques et plus respectueuses de l'environnement.

### 3.2.4. Place des biotechnologies blanches

A l'exception de la lignine, seulement observée dans les plantes, tous les autres composés discutés précédemment sont présents tant dans les plantes que les microorganismes. Le débat mérite donc d'être élargi depuis les plantes à l'ensemble des organismes autotrophes, c'est à dire capables de

transformer la lumière en matières organiques, dans des conditions où des éléments nutritifs sont apportés en quantités suffisantes. Cette prise en compte est rendue nécessaire par l'émergence rapide de la technologie des microalgues qui entre en compétition avec les plantes pour l'occupation du sol, le besoin d'intrants.

Au delà des organismes autotrophes, des microorganismes dédiés, éventuellement modifiés génétiquement, peuvent apporter une autre solution technologique qui repose sur une alimentation à partir de nutriments d'origine végétale. Cette orientation revient à combiner deux usines cellulaires, la plante et le microorganisme, le second se développant en hétérotrophie sur la base des productions de la plante.

La problématique globale de la biomasse pour les bioénergies et la chimie se trouve élargie par deux questionnements :

- L'alimentation du microorganisme hétérotrophe pour satisfaire ses besoins dans la perspective de la production d'une molécule cible.
- La récupération des métabolites d'intérêt, soit par l'éclatement des cellules et un fractionnement physico-chimique (la voie classique), soit la récupération d'un métabolite excrété, qui est récupéré indépendamment de la vie du batch de culture en cours. La seconde particularité n'entre pas dans le champ de cet ARP. Toutefois il convient de souligner que le co-produit de fermentation, lorsqu'il est consommable par les animaux, peut représenter une source azotée et une source énergétique significatives à prendre en compte dans la durabilité des systèmes alimentaires.

Les deux branches des biotechnologies blanches sont alors mobilisables.

### 3.2.4.1. Génie enzymatique

L'origine biologique des constituants explique que des enzymes adaptées à chacun d'entre eux soient disponibles dans les êtres vivants. La palette des molécules issues du vivant peut ainsi être élargie par le recours aux biotechnologies blanches.

Tableau 10 : principales enzymes disponibles industriellement pour transformer des molécules de la biomasse.

Susbtrat	Enzyme	Effet
saccharose	<ul style="list-style-type: none"> <li>• invertase</li> <li>• transglucosidase</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrolyse en fructose et glucose</li> <li>• polymérisation en dextrans</li> </ul>
amidon	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alpha-amylase</li> <li>• pullulanase</li> <li>• glucoamylase, beta-amylase</li> <li>• isomérase</li> <li>• glucose oxydase</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dépolymérisation vers les oligosides</li> <li>• coupure sélective des liaisons <math>\alpha(1,6)</math></li> <li>• transformation en maltose, glucose</li> <li>• isomérisation en fructose</li> <li>• production de glucono-1,5-lactone</li> </ul>
lipide	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lipase, cutinase</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrolyse avec libération des acides gras et du glycérol avec des capacités stéréo, régio et typo sélectives (position et nature des acides gras)</li> <li>• estérification en l'absence d'eau</li> <li>• transestérification</li> </ul>
protéine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• protéase endo: trypsine, chymotrypsine, pepsine, papaine, élastase,</li> <li>• protéase exo : aminopeptidase, carboxypeptidase A</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrolyse en peptides en mode endo</li> <li>• hydrolyse en mode exo</li> </ul>



hémicellulose	<ul style="list-style-type: none"> <li>• xylane endo-1,3-xylosidase</li> <li>• 1,4-<math>\beta</math>-xylosidase</li> <li>• <math>\alpha</math>-L-arabinofuranosidase</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrolase</li> <li>• hydrolase</li> </ul>
cellulose	<ul style="list-style-type: none"> <li>• endo-1,4-D <math>\beta</math>-glucanase;</li> <li>• 1,4-<math>\beta</math>-glucosidase (EC 3.2.1.74),</li> <li>• exo-1,4-<math>\beta</math>-glucosidase;</li> <li>• exo-cellobiohydrolase</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrolyse de la cellulose semicristalline en grands fragments et en cellobiose</li> <li>• hydrolyse du cellobiose</li> <li>• hydrolyse des grands fragments en cellobiose</li> </ul>
pectine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• polygalacturonase</li> <li>• pectineestérase</li> <li>• pectine lyase</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrolyse des grandes chaînes au hasard</li> <li>• désestérification des substituants méthyl</li> <li>• dépolymérisation en petites chaînes sans désestérification préalable nécessaire</li> </ul>
lignine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• laccases, lignines-peroxydases et manganèse-peroxydases</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• oxydation des chaînes de lignines par un mécanisme endo</li> </ul>
phytate	<ul style="list-style-type: none"> <li>• phytase (myo-inositol hexakisphosphate phosphohydrolase)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrolyse des phytates par libération du phosphate</li> </ul>

La plupart de ces enzymes ont pour effet la dépolymérisation. Peu d'entre elles sont susceptibles d'élargir le spectre des molécules issues de la biomasse.

En fait cette présentation, qui aurait été identique au niveau des spécificités de catalyse il y a vingt ans, gomme une profonde évolution qualitative des outils enzymatiques. Depuis l'émergence dans les années 90 des techniques d'évolution moléculaire dirigée qui miment *in vitro* et en accéléré les principes Darwinien d'évolution des protéines, les nouvelles méthodologies d'ingénierie offrent aujourd'hui des opportunités inégalées de création à façon de nouvelles enzymes. Les techniques purement combinatoires d'ingénierie, reposant sur un processus itératif de génération de diversité (création de bibliothèques de mutants) couplé à un tri par sélection ou criblage, sont suffisamment génériques pour pouvoir être appliquées à tous types d'enzymes. Elles ont conduit à l'obtention de catalyseurs très efficaces, stables à la température ou en milieu organique, de profil pH modifié et/ou de sélectivité renforcée. Le développement de cribles spécifiques, robustes, fiables et à haut débit, utilisant des automates ou des méthodes appropriées (cytométrie en flux, microfluidique) permet incontestablement (i) de repousser les limites du criblage en autorisant le tri de plusieurs millions de variants à chaque tour d'évolution et (ii) d'accroître la probabilité d'isolement des enzymes d'intérêt.

La tendance actuelle s'oriente néanmoins vers la construction intelligente de bibliothèques de plus petites tailles. Ces dernières sont généralement focalisées sur le site actif de la protéine. Leur construction peut être guidée par l'analyse bioinformatique des structures primaire, secondaire et tertiaire, enrichie par les techniques prédictives de modélisation moléculaire et d'analyse statistique des résultats d'évolution. Ces différentes méthodologies tirent partie des progrès de la biologie computationnelle (modélisation moléculaire / analyse statistique / bioinformatique) pour réconcilier le rationnel et le combinatoire et permettre de programmer la construction efficace de catalyseurs dotés de nouvelles fonctions. Au-delà de ces progrès majeurs, le criblage fonctionnel à haut débit des banques issues de métagénomiques, accélère encore la découverte de nouvelles enzymes provenant de biotopes originaux (systèmes digestifs humains, de ruminants, de termites,...) et l'isolement de nouveaux opérons associant de manière originale différentes activités enzymatiques dans une action concertée.

Ces approches sont incroyablement efficaces pour créer à façon ou découvrir de nouveaux catalyseurs. De multiples exemples récemment publiés témoignent de leur intérêt et de leur puissance pour le changement de spécificité, de sélectivité et la création de nouvelles activités catalytiques pour les bioindustries. Elles sont aussi suffisamment génériques pour pouvoir être appliquées à tous types

d'enzymes (oxydo-réductases, transférases, hydrolases) impliquées dans la dégradation spécifique ou la biosynthèse des protéines, lipides ou glucides.

Alors qu'elles sont en plein essor au niveau mondial, ces approches sont encore peu développées en France et doivent être encouragées car elles sont des auxiliaires indispensables pour la valorisation optimale des lipides, protéines, ou sucres d'origine végétale. Intégrer dans des voies métaboliques, ces enzymes générées à façon peuvent de plus permettre de créer de nouvelles séquences métaboliques. Cette orientation marque la convergence entre le génie enzymatique et le génie métabolique mais aussi le génie du microorganisme et du procédé (génie microbiologique). C'est probablement l'une des voies les plus prometteuses pour le développement de procédés innovants.

### **Verrous et questions de recherche**

Le paysage mérite d'être revisité à l'aune d'une part des verrous structuraux qui commencent à être identifiés dans les mécanismes de la bioraffinerie, et d'autre part des attentes d'une diversité chimique pour alimenter les réactions d'hémisynthèse.

- Créer une diversité des réactions catalysées, avec un accent sur les oxydo-réductases et les transférases.
- Elargir le spectre des conditions opératoires de mise en œuvre des enzymes, dont leur insertion dans des voies métaboliques internes à des microorganismes (fermentations).
- Le meilleur biocatalyseur n'a de sens que s'il est mis en œuvre dans des conditions optimales en bioréacteur, sous contraintes technico-économiques. Substrats et produits peuvent exercer, soit des inhibitions, soit des effets effecteurs qu'il convient d'identifier par l'analyse macrocinétique et thermodynamique. Il convient en outre de déterminer les « goulets d'étranglement » du système de production, qui peuvent être de nature abiotique ou biotique. Cela implique une approche multidisciplinaire et une expérimentation sur pilotes rigoureusement instrumentés et contrôlés. Cette étape préindustrielle est aussi importante que les précédentes et de plus, elle permet de générer de nouvelles connaissances et/ou de valider celles obtenues aux niveaux intracellulaires.
- Le bioréacteur pilote constitue à la fois un outil de pré-développement industriel et un outil d'études fondamentales.

#### **3.2.4.2. les bioconversions**

Dans un procédé microbien, un microorganisme a besoin de trois types de substrats :

- L'un fournit l'énergie (substrat énergétique) pour d'une part les biosynthèses et d'autre part la « maintenance », *ie* l'ensemble des processus nécessaires à la survie du microorganisme : maintien de la pression osmotique, énergie de « respiration », défense contre les agresseurs éventuels qu'ils soient biotiques ou abiotiques. Cela renforce le poids des sources énergétiques de sucres (betterave à sucre, canne à sucre) et d'amidon (céréales, tubercules) dans ces procédés, comme sources végétales performantes.
- L'autre est de type substrat de constitution, exigé de par la composition des microorganismes, constitué de carbone, oxygène, hydrogène, soufre, azote, phosphore, éléments minéraux, suivant une composition constante en culture « balancée », mais variable en conditions de stress (accumulation de substances de réserve).
- Certains microorganismes présentent des auxotrophies, nécessitant l'ajout de précurseurs dans le milieu de culture : acides aminés, lipides, vitamines. Ces additifs sont des compléments nutritionnels dont il convient d'optimiser l'apport, dans une logique de « génie nutritionnel » largement argumentée et étayée par la connaissance de la physiologie du microorganisme et de son métabolisme.

Pour améliorer la durabilité, on doit veiller à ce que la plante serve d'apport le plus autonome possible à

l'ensemble de ces trois types de substrats. Cette analyse est une exigence dans le concept de bioraffinerie pour accroître l'autonomie matière et minimiser les intrants et leurs coûts.

Outre ces substrats nécessaires au maintien et à la croissance des microorganismes, les produits auxiliaires de bioconversion (PAB) favorisent la bioproduction des molécules recherchées. Parmi ces PAB, on peut distinguer les compléments nutritionnels et les compléments de protection des bioconversions. Les premiers sont par exemple des oligoéléments, des donneurs de méthyles (bétaine de la mélasse de betterave), le glycérol. Les seconds sont des protecteurs lipidiques, des séquestrants et/ou biodisponibilisants d'oligoéléments en relation avec les règles de physicochimie des sels en solution (acide citrique), des osmo-protectants (glycérol, bétaine) des huiles végétales « coulées » en production d'antibiotiques (effecteurs aussi de transfert de masse), des surfactants et anti-mousses.

Le génie métabolique microbien est un outil fondamental pour l'utilisation de la biomasse<sup>83,84</sup>. Une approche systémique conduit à des souches modifiées sur de nombreux gènes impliqués dans l'ensemble du métabolisme. Cette conception conduit les spécialistes à réaliser un véritable design microbiologique industriel qui s'appuie sur les résultats des études préliminaires du métabolisme de la plante, par exemple. Ainsi, certaines souches de levures possèdent jusqu'à douze gènes codant pour des enzymes ajoutées pour reproduire une voie métabolique entière. Des modifications de ce type renforcent l'idée d'approche systémique afin de diminuer les réactions des microorganismes vis-à-vis de ces transgènes. Les outils de mutagenèse et d'évolution dirigées permettent d'avoir une meilleure maîtrise des étapes amont.

Aujourd'hui, peu de microorganismes produisent des métabolites d'intérêt avec des rendements optimaux dans des conditions de production industrielle, sans modifications génétiques pour améliorer le taux de bioconversion. Le développement de souches hyper-productrices, obtenues initialement par des stratégies de mutagenèse aléatoire suivie par des cribles de sélection, a progressivement cédé la place aux stratégies plus rationnelles d'ingénierie métabolique, fondées sur une connaissance croissante des fonctionnalités des réseaux métaboliques et l'aptitude à moduler finement l'expression des gènes. Depuis la fin des années 90, les techniques de rupture en biologie à haut débit ont émergées que ce soit pour l'analyse des génomes, des protéomes, des métabolomes et des réseaux métaboliques ; à cela s'est ajouté la vague des physiomes, de la bioinformatique pour traiter la surproduction de données expérimentales et proposer une modélisation intégrative. Ces approches globales ont donné accès à l'ensemble du potentiel métabolique des microorganismes et ont notamment mis en valeur des conséquences indirectes d'une modification du génome, suite à des stratégies ciblées de génie génétique. Cette boîte à outil très riche en potentiel devrait alimenter les connaissances systémiques des procédés biotechnologiques mais nécessite une plus grande prise en compte de la complexité de mise en œuvre à l'échelle industrielle et donc des contraintes directes sur l'expression des potentialités métaboliques.

La conception et la validation de systèmes de productions durables s'appuie sur des démarches d'analyse intégrative des biocatalyseurs (enzymes, cellules, organismes) permettant d'exploiter, de modifier et d'optimiser leurs potentialités (génomiques, métaboliques, etc.). Les démarches de biotechnologies actuelles devraient s'appuyer sur des stratégies qui intègrent les différentes données « omiques » (transcriptomique, protéomique, métabolomique, fluxomique) dans des modèles explicatifs du comportement qui présentent un intérêt prédictif par rapport à l'optimisation d'un système en fonction de la finalité (biotechnologies prédictives). Evidemment, vu la sensibilité et donc la spécificité des

---

<sup>83</sup> Stephanopoulos, G. 2007. Challenges in engineering microbes for biofuels production. *Science* 315(5813):801-04.

<sup>84</sup> Nevoigt, E. 2008. Progress in metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 72(3):379-412.

phénotypes dans les procédés, ces approches devraient être appliquées avec le plus grand soin et dans les conditions de mise en œuvre gardant leur pertinence industrielle, au risque de voir identifier des artefacts n'ayant pas d'impact réel pour la bioconversion en question.

On différenciera 2 approches complémentaires du génie métabolique, l'approche rationnelle et l'approche combinatoire.

#### **3.2.4.2.1. Approche rationnelle du génie métabolique**

Le génie métabolique, introduit dans les années 1980 par Stephanopoulos et Sinskey, repose sur une approche rationnelle basée sur la définition d'une stratégie de modification génétique des biocatalyseurs à partir de la connaissance des réseaux métaboliques. Elle a vu un développement important, ces dernières années, des outils de modélisation métabolique, de génie génétique et de l'analyse phénotypique et génotypique (grâce notamment à l'essor des technologies post-génomiques). Néanmoins, l'obtention de souches génétiquement modifiées s'accompagne généralement d'une perte de robustesse de la souche. Le challenge de ces prochaines années consiste à acquérir et intégrer les connaissances nécessaires pour développer des stratégies d'ingénierie métabolique amenant à l'obtention de souches optimisées et robustes au sein des procédés intensifs. Ces stratégies d'ingénierie métabolique devront prendre en compte les spécificités des procédés intensifs où l'obtention de titres élevés et la présence possible de molécules inhibitrices, de compléments nutritionnels, et de compléments de protection (apportés dans les milieux de culture utilisés dans l'industrie) génèrent un environnement extrême (notion de stress cellulaire).

##### ***Modélisation métabolique : vers une modélisation prédictive***

Les avancées dans ce domaine se sont portées particulièrement sur le développement de modèles de connaissances de type calcul des flux métaboliques et de modèles phénoménologiques. L'intégration de ces deux types de modélisation reste néanmoins encore assez peu développée mais est primordiale pour une meilleure prédiction *in silico* du comportement des mutants à générer par génie métabolique. L'essor des technologies post-génomiques permet l'obtention d'une masse importante de données métaboliques, transcriptomiques et protéomiques, complémentaires des données cinétiques macroscopiques. L'acquisition et l'intégration de ces données obtenues dans des conditions réalistes mimant l'extrémophilie rencontrée dans les procédés intensifs (titres élevés, environnement générant des stress physico-chimiques) devraient permettre le développement de modèles de régulation plus performants, pour prédire le comportement dynamique des biocatalyseurs. Une modélisation prédictive pourra dans ce cas être envisagée en intégrant dans des modèles dynamiques, les réseaux métaboliques et leur régulation et les bases phénoménologiques du comportement cellulaire (inhibition et toxicité de croissance et de production).

##### ***Outils génétiques***

La boîte à outil disponible pour la modification des microorganismes s'est fortement développée ces dernières années. La maîtrise et la stabilité des constructions génétiques ont été significativement renforcées, notamment par la mise au point des systèmes d'intégration des constructions génétiques directement dans le chromosome, évitant ainsi les problèmes d'instabilité inhérents aux approches fondées sur les plasmides. En parallèle, les approches d'ingénierie des promoteurs et la modification de l'usage des codons dans les gènes hétérologues ont fortement fait avancer notre capacité à effectuer les changements d'expression subtiles et en adéquation avec les prédictions d'optimisation des voies métaboliques. Si ces outils sont fonctionnels pour les souches microbiennes modèles, il reste un développement important pour les rendre applicables à un plus grand nombre de microorganismes. On

rencontre fréquemment dans les souches industrielles, des complexités importantes, nécessitant encore des travaux considérables pour les rendre plus accessibles aux stratégies d'amélioration génétique : on pourrait citer par exemple les barrières de restriction régulièrement rencontrées chez les bactéries traitées par de multiples étapes de mutagenèse, ou encore les difficultés de modifier les souches de microorganismes eucaryotes polyploïdes.

### **Analyse des phénotypes et génotypes**

Le développement d'approches systémiques en biotechnologies s'appuie de plus en plus fortement sur les technologies « *omiques* ». La mise en place et le développement de plate-formes technologiques regroupant les outils et les compétences associées à ces approches ont constitué ces dernières années un facteur essentiel du développement de la biotechnologie intégrative, et doivent encore être renforcés dans les années à venir. Dans le contexte du génie métabolique, les approches d'analyse fonctionnelle du métabolisme (métabolomique, fluxomique) occupent une place privilégiée pour appuyer le développement de nouvelles souches, mesurer l'efficacité métabolique réelle des organismes, sélectionner les systèmes de production (ou les pratiques culturales) les plus adaptés à chaque finalité, ou encore explorer la diversité naturelle. Les approches de flux métaboliques permettent notamment de déterminer comment se répartissent les flux de carbone et d'énergie au sein des systèmes vivants et ainsi mesurer l'économie du carbone (et de l'énergie) à l'échelle cellulaire (ou de l'organisme). Ces approches encore émergentes doivent encore se développer, au plan national comme international. L'intégration de l'ensemble des niveaux d'analyse moléculaire dans des modèles explicatifs du comportement de conversion constitue un autre enjeu dans la perspective de développer des outils prédictifs (biotechnologie prédictive). De même, un défi important pour les prochaines années réside dans l'utilisation de ces outils pour des conditions réalistes de process industriels. Cela implique l'intégration du génie métabolique avec le génie microbiologique, ainsi que le développement d'outils de modélisation multi-échelle intégrant le système biologique et son environnement.

### **Déconstruction drastique en « syngaz » ( $H_2$ , $CO$ , $CO_2$ )**

La déconstruction enzymatique et microbienne de la biomasse lignocellulosique est un processus lent qui sous-tend de « monomériser » la matière végétale « en douceur ». Compte tenu des investigations menées en parallèle par la filière thermique (voie sèche), une convergence est apparue entre les filières de la voie sèche et de la voie humide, par l'utilisation des syngaz comme substrats de fermentation. La production par voie microbienne se substitue alors à la synthèse par le procédé Fischer Tropsch. Une synergie semble opérationnelle entre les deux filières ; si tel n'est pas le cas, elle devra être renforcée car l'avenir semble être aux « mix » de substrats. Le méthanol pourrait devenir un substrat « vert » pour les biotechnologies blanches, ce qui nous ramènerait aux années 75-90. Cette voie est exploitée pour la production de biocarburants et elle paraît prometteuse (400 litres de biocarburants par tonne de bois sec, selon la société Coskata). Le rendement théorique, calculé sur la base de la teneur en glucose, est de 68,5 %<sup>85</sup>. L'optimisation de cette voie implique de restaurer une microbiologie des composés en C1, de maîtriser la compréhension de l'assimilation microbienne du dioxyde de carbone, du monoxyde de carbone et de l'hydrogène, en tant que substrats.

Dans le cadre de la lutte contre les GES, ces recherches ont un double impact *a minima* : (i) le blocage des réactions de méthanisation, (ii) le traitement des effluents industriels gazeux. On notera l'excellent article de Henrich *et al.*<sup>86</sup> décrivant l'économie de la production des « biosynfuels *via* biosyncrude

---

<sup>85</sup> Huhnke, R., R. Lewis, and R. Tanner. 2007. Indirect or direct fermentation of biomass to fuel alcohol. in *Canadian Intellectual Property Office*, edited by University of Oklahoma. USS.

<sup>86</sup> Henrich, E., N. Dahmen, and E. Dinjus. 2009. Cost estimate for biosynfuel production via biosyncrude gasification. *Biofuels Bioproducts & Biorefining* 3(1):28-41.

gazeification ».

Les microorganismes aptes à se développer sur les constituants du syngaz ou d'autres substrats mono-carbonés facilement constitués par condensation du syngaz (méthanol, méthane, etc.) existent et ont même été largement étudiés dans le passé. Il en résulte une connaissance assez large sur les voies d'assimilation de ces substrats même si les applications en biotechnologies ont été pour la plupart orientées vers l'optimisation des rendements de croissance. Les voies d'assimilation des substrats carbonés par des microorganismes méthylophiles ou autotrophes sont connues et leur interfaçage avec d'autres voies métaboliques établi, permettant une analyse rationnelle des potentialités métaboliques, pour une bioconversion donnée. On trouve aussi bien des bactéries aérobies qu'anaérobies, aptes à assimiler ces substrats, avec des métabolismes spécifiques. Le nombre de microorganismes concernés reste un faible pourcentage de la biodiversité, mais cela constitue un avantage dans les procédés, limitant ainsi fortement les risques de contamination par d'autres microorganismes.

### 3.2.4.2.2. Approche combinatoire : génie métabolique inverse

Une approche complémentaire du génie métabolique réside en une approche combinatoire qui mise sur les potentialités naturelles des biocatalyseurs à évoluer sous contraintes naturelles et/ou dirigées (modifications génétiques ou physico-chimiques aléatoires, facteurs de transcription artificiels, ingénierie de la transcription, ingénierie des ribosomes, génome shuffling). L'efficacité de cette approche repose sur la pertinence des systèmes de criblage à haut débit et des systèmes de culture poussant le microorganisme à évoluer de manière désirée. Cette approche devrait bénéficier à l'avenir des avancées atteintes par les technologies « omiques » pour analyser et localiser de manière fine les modifications génétiques obtenues, responsables du nouveau phénotype. L'intégration de ces technologies devrait permettre de gagner en efficacité en rationalisant ce type d'approche, notamment par l'établissement de modèles structurés.

#### Verrous et questions de recherche

- Le passage d'une approche en boîte noire efficace dans les premiers temps des biotechnologies bute maintenant sur le nombre élevé de variables d'entrée et les interactions non linéaires entre les mécanismes. En découle un besoin de compréhension et de modélisation de l'ensemble des interactions dans un ensemble de niveaux de phénomènes, depuis le niveau moléculaire jusqu'au niveau macroscopique (flux de matière et de chaleur) avec les échelles temporelles correspondantes. Le génie biochimique doit intégrer les cinétiques de la biocatalyse avec tous les aspects du génie des procédés (réacteurs downstream, capteurs, etc.), de l'informatique et de l'automatisme. Le génie biochimique doit se démarquer d'une tendance lourde du génie des procédés (en particulier en France) qui considère les réacteurs comme des « boîtes noires » et ne prend pas véritablement en compte le comportement et les propriétés des réactions de transformation et des catalyseurs. Cette approche arrive à ses limites pour les réactions chimiques mais la situation est encore pire pour la mise en œuvre technologique des fonctions du vivant. Le génie biochimique est donc intrinsèquement multidisciplinaire dans ses stratégies et dans la construction de ses équipes<sup>87,88</sup>
- Développer la modélisation prédictive des procédés biotechnologiques, vérifiée en extrêmophilie (conditions industrielles).
- Développer des stratégies d'ingénierie métabolique pour obtenir des souches optimisées en conditions industrielles (procédés intensifs).

<sup>87</sup> Kitano, H. 2002. Systems biology: A brief overview. *Science* 295(5560):1662-64.

<sup>88</sup> Friboulet, A., and D. Thomas. 2005. Systems biology - an interdisciplinary approach. *Biosensors & Bioelectronics* 20(12):2404-07.

- Développer des outils d'amélioration génétique adaptés aux souches industrielles, souvent plus difficiles à manipuler génétiquement que les microorganismes modèles.

Des développements technologiques en biologie à haut débit et en bioinformatique permettent d'amplifier la recherche technologique :

- Explorer la diversité naturelle en identifiant de nouvelles voies métaboliques d'intérêt chez les biocatalyseurs, combiner différentes voies métaboliques d'origines diverses et offrir de nouvelles enzymes, de nouvelles molécules, ou de nouveaux systèmes de production. Le potentiel ouvert par l'exploration métagénomique de la biodiversité jouera probablement un rôle important dans cette approche, en élargissant la recherche des nouvelles voies métaboliques aux microorganismes non-cultivables (80-90% des microorganismes dans certaines niches).
- Développer la biologie synthétique, qui, par analogie aux méthodes de rétrosynthèse utilisées en chimie organique, vise la formulation de nouvelles voies métaboliques pour la production de nouvelles molécules d'intérêt, dites non naturelles. Il est considéré ici la biotransformation de groupes fonctionnels plutôt que la structure entière de la réaction. Il est alors nécessaire d'aller puiser au sein de la biodiversité naturelle, les catalyseurs à faible spécificité et de les assembler pour assurer ces voies métaboliques *de novo*. Les deux derniers brevets de « Synthetic Genomics » (WO2009 048971A1 et WO 2009 03 027A2) donnent une idée du potentiel de la biologie synthétique ainsi que la publication de Craig Venter *et al* (2009)<sup>89</sup>. La dernière revue de H. Alper et G. Stephanopoulos<sup>90</sup> pose le problème de l'import de potentiels biosynthétiques artificiels *versus* l'amélioration du potentiel microbien par ingénierie de leurs fonctions.

La valorisation des pentoses est un enjeu majeur pour le futur développement des bioraffineries car ces glucides constituent jusqu'à 30% p/p de la matière lignocellulosique. Cependant, le domaine spécifique de la valorisation des pentoses est peu développé. Dans un grand nombre de cas, les pentoses peuvent se substituer au glucose pour la synthèse de produits, tel que l'éthanol. Néanmoins, les outils de bioconversion tels que les levures, adaptés à la transformation des pentoses sont moins développés que leurs homologues pour les hexoses.

- Développer un génie métabolique des pentoses.

L'alimentation de bioréacteurs par des produits de gazéification nécessite une excellente maîtrise des concepts de transfert gaz-liquide mais aussi la maîtrise du mélange au niveau industriel (toxicité à faible concentration). Pour le méthanol, ces problèmes ont été résolus dans les années 70, avec une technologie performante mise en place par l'Imperial Chemical Industries et d'autres. Si les voies métaboliques spécifiques offrent des avantages pour certains types de molécules, les démonstrations sont peu nombreuses, hormis celles réalisées par le Gaz Technology Institute (GTI) de Chicago et la société Coskata.

- Améliorer les performances de la bioconversion par une meilleure maîtrise des transferts gaz-liquide et du mélange, en effectuant notamment des analyses macro-cinétiques et thermodynamiques.

Les molécules décrites précédemment peuvent être produites dans la plante ou dans les bioréacteurs utilisant des microorganismes ou des enzymes. Dans tous les cas de figures, la plante et le bioréacteur présentent une complémentarité et le curseur peut se déplacer entre les deux extrêmes en fonction des molécules et des fonctions visées. Le futur du domaine dépendra de la répartition des tâches entre le champ et l'usine, et ces tâches peuvent évoluer. Le génie biochimique doit s'adapter à ces évolutions permanentes en s'intégrant de manière souple à l'évolution des stratégies depuis la semence, les

<sup>89</sup> Lartigue C. et al., 2009. Creating bacterial strains from genomes that have been cloned and engineered in yeast. *Science* 325(5949): 1693-1696.

<sup>90</sup> Alper, H., and G. Stephanopoulos. 2009. Engineering for biofuels: exploiting innate microbial capacity or importing biosynthetic potential ? *Nature Reviews Microbiology* 7(10):715-23.

itinéraires agronomiques, la transformation industrielle, jusqu'au marché. Le bioréacteur est à la fois un objet de production et un objet d'études fondamentales : successions d'états physiologiques, optimisation des milieux, évolution dirigée, flux et voies métaboliques probables aux sens thermodynamique et macroscopique (application des principes de Lavoisier).

- Développer une capacité de modélisation et de simulation pour disposer d'une vision systémique des procédés et de leurs imbrications, jusqu'à l'usine cellulaire (modélisation descendante).

### 3.2.5. Production d'hydrogène

Aujourd'hui utilisé dans le raffinage, la chimie ou l'industrie, l'hydrogène est souvent présenté comme un vecteur énergétique d'avenir pour le secteur des transports. Mais, possédant des caractéristiques physiques relativement mal adaptées à cet usage et n'existant pas sous forme pure, l'hydrogène présente, pour l'heure, un bilan encore contrasté. Pouvant offrir de bonnes performances environnementales, les filières hydrogène restent handicapées par des coûts trop élevés pour un développement de masse.

De nos jours, l'hydrogène est produit pour près de 96 % à partir d'énergie fossile (48 % de gaz naturel, 30 % de pétrole et 18 % du charbon) et le gaz naturel est, de loin, la matière première la plus utilisée. Le reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau constitue le procédé le plus économique, malgré le coût d'investissement en capital, comparativement à l'électrolyse. Une grande partie de l'hydrogène est aujourd'hui produit dans les raffineries comme un coproduit du reformage catalytique, étape indispensable dans la formulation des essences (indice d'octane).

Les microorganismes photosynthétiques, microalgues et cyanobactéries, peuvent être utilisés pour la production d'hydrogène, soit indirectement par fermentation de la biomasse accumulée (non lignocellulosique, facilement fermentescible, et potentiellement produite avec de forts rendements surfaciques), soit directement *via* leurs propres processus métaboliques<sup>91</sup>. Certaines microalgues et cyanobactéries sont en effet capables de produire de l'hydrogène à partir d'énergie solaire en utilisant au bout du compte l'eau comme donneur d'électrons et de protons. Au cours de ce processus, les transporteurs d'électrons réduits par l'appareil photosynthétique interagissent soit avec une hydrogénase, enzyme capable de réduire les protons et produire de l'hydrogène moléculaire<sup>92</sup>, soit avec une nitrogénase, enzyme réduisant l'azote atmosphérique *via* une réaction qui s'accompagne d'un dégagement d'hydrogène<sup>93</sup>.

Cependant, les enzymes productrices d'hydrogène étant rapidement inhibées par l'oxygène, la photoproduction d'hydrogène est un phénomène transitoire<sup>94</sup>. Pour contourner cette limitation, il est possible de tirer partie de la flexibilité métabolique des algues en alternant des phases aérobies de constitution de réserves carbonées, pendant lesquelles le photosystème II est actif, et des phases anaérobies de production d'hydrogène, pendant lesquelles le photosystème II doit rester inactif, soit

---

<sup>91</sup> Benemann, J. 1996. Hydrogen biotechnology: Progress and prospects. *Nature Biotechnology* 14(9):1101-03.

<sup>92</sup> Ghirardi, M. L., M. C. Posewitz, P. C. Maness, A. Dubini, J. P. Yu, and M. Seibert. 2007. Hydrogenases and hydrogen photoproduction in oxygenic photosynthetic organisms. *Annual Review of Plant Biology* 58:71-91.

<sup>93</sup> Masukawa, H., M. Mochimaru, and H. Sakurai. 2002. Hydrogenases and photobiological hydrogen production utilizing nitrogenase system in cyanobacteria. *International Journal of Hydrogen Energy* 27(11-12):1471-74.

<sup>94</sup> Ghirardi, M. L., R. K. Togasaki, and M. Seibert. 1997. Oxygen sensitivity of algal H<sub>2</sub>-production. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 67(1-2):182-82.



sous l'action de perturbations physiologiques telles qu'une carence en soufre<sup>95</sup>, soit *via* le contrôle d'interrupteurs génétiques<sup>96</sup> ou d'inhibiteurs chimiques. Cette séparation temporelle permet d'éviter l'exposition des hydrogénases à l'oxygène. Au cours des phases anaérobies, le pouvoir réducteur issu de la dégradation des réserves carbonées est dirigé vers l'hydrogénase *via* des voies de transfert d'électrons réduisant la chaîne photosynthétique en aval du photosystème II à la lumière. Ces dernières ne s'accompagnant pas d'un dégagement d'O<sub>2</sub>, acheminent les électrons issus du catabolisme vers le photosystème I et permettent une photobioproduction durable d'hydrogène<sup>97</sup>. Ce mécanisme est notamment étudié par plusieurs groupes à travers le monde chez la microalgue verte *Chlamydomonas reinhardtii*.

Une autre manière simple d'inactiver le photosystème II consiste à se placer à l'obscurité. Le procédé consiste alors à accumuler des réserves pendant les périodes photosynthétiques et à en assurer une fermentation anaérobie à l'obscurité pour la production d'hydrogène (stratégie notamment développée sur la cyanobactérie *Arthrospira maxima* par le projet américain BioSolarH2). Ceci peut être réalisé soit en tirant parti là encore de la flexibilité métabolique des algues et de leurs voies fermentaires endogènes<sup>98</sup>, soit en utilisant la biomasse algale comme substrat pour des bactéries hétérotrophes susceptibles d'effectuer cette conversion fermentaire (qui peut éventuellement être couplée à une fermentation méthanogène).

La séparation des processus photosynthétiques et de production d'hydrogène peut également être d'ordre spatial : c'est ce qui est mis en œuvre dans des cyanobactéries filamenteuses fixatrices d'azote (genres *Anabaena*, *Nostoc*, etc.) qui différencient des cellules (hétérocystes) dépourvues de photosystème II, peu perméables à l'O<sub>2</sub>, où opère la nitrogénase (enzyme également sensible à l'O<sub>2</sub>), alimentées en pouvoir réducteur par les cellules végétatives. Plusieurs études ont été réalisées afin de « détourner » l'activité des hétérocystes pour accroître leur potentiel de production d'H<sub>2</sub><sup>99</sup>.

Une dernière voie de recherche consiste à travailler sur la résistance à l'O<sub>2</sub> de l'enzyme pour laquelle il existe une variabilité naturelle, et partant de là, des possibilités d'amélioration par ingénierie enzymatique. Cela implique de mieux appréhender les relations structure-fonction de l'hydrogénase, comprendre les bases de sa réactivité à l'O<sub>2</sub>, et maîtriser la synthèse et la maturation.

## Verrous et questions de recherche

Le développement de recherches sur la régulation des voies métaboliques productrices d'H<sub>2</sub> et les transferts d'électrons associés apparaissent comme des étapes clés pour la compréhension et l'optimisation de ces processus.

- Pour le cas particulier de l'ingénierie des hydrogénases (ou des nitrogénases), que ce soit pour

<sup>95</sup> Melis, A., L. P. Zhang, M. Forestier, M. L. Ghirardi, and M. Seibert. 2000. Sustained photobiological hydrogen gas production upon reversible inactivation of oxygen evolution in the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Physiology* 122(1):127-35.

<sup>96</sup> Surzycki, R., L. Cournac, G. Peltier, and J. D. Rochaix. 2007. Potential for hydrogen production with inducible chloroplast gene expression in *Chlamydomonas*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(44):17548-53.

<sup>97</sup> Desplats, C., F. Mus, S. Cuine, E. Billon, L. Cournac, and G. Peltier. 2009. Characterization of Nda2, a Plastoquinone-reducing Type II NAD(P)H Dehydrogenase in *Chlamydomonas* Chloroplasts. *Journal of Biological Chemistry* 284(7):4148-57.

<sup>98</sup> Benemann, J. R. 1997. Feasibility analysis of photobiological hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy* 22(10-11):979-87.

<sup>99</sup> Lindblad, P., K. Christenson, P. Lindberg, A. Fedorov, F. Pinto, and A. Tsygankov. 2002. Photoproduction of H<sub>2</sub> by wildtype *Anabaena* PCC 7120 and a hydrogen uptake deficient mutant: from laboratory experiments to outdoor culture. *Ibid.* 27(11-12):1271-81.

améliorer leur tolérance à l'O<sub>2</sub>, leurs performances en matière de production, ou leurs interactions avec les substrats disponibles dans la cellule, deux axes de recherche sont envisageables et devraient être explorés en parallèle. Le premier repose sur l'analyse des relations structure-fonction des enzymes et la mutagenèse dirigée, le deuxième sur des approches de modification aléatoire des séquences (mutagenèse « classique »/sélection, gene shuffling, évolution dirigée, etc.).

- Le développement de souches optimisées pour la production d'hydrogène doit aller de pair avec celui de systèmes de cultures dédiés (photobioréacteurs, procédés) adaptés aux caractéristiques des microorganismes mis en œuvre et aux disponibilités des ressources. Par exemple, dans le cas de la mise en œuvre d'un système biphasique, la phase de production de réserves peut être couplée à un dispositif de récupération de CO<sub>2</sub> (à partir d'une usine thermique par exemple) ou opérer dans des conditions où le CO<sub>2</sub> est à teneur atmosphérique : il est probable que ces deux cas de figures requièrent des organismes aux caractéristiques très différentes.

### 3.3. Conclusions

Cette description des ressources végétales a évoqué largement l'organisation native des biomasses végétales selon différentes échelles, ce qui est simultanément une source de propriétés (bois par exemple) et un verrou pour la bioraffinerie.

Figure 10 : les niveaux d'échelle sur les fibres et le grain de blé

Cette analyse montre qu'aucune structure moléculaire ne correspond dans le monde végétal directement à celles issues du carbone fossile. Des solutions d'équivalence fonctionnelle existent, surtout lorsque des opérations ultérieures de transformation, en biotechnologies ou en hémisynthèse, viennent conforter la diversité des solutions végétales.

Des cahiers des charges élaborés peuvent être établis pour chacune des propriétés d'usage, avec des lacunes dans les relations structure-propriétés physico-chimiques qui freinent l'identification de solutions technologiques. L'acquisition d'un corpus de connaissances sur les spécifications des biomolécules, avec le même degré d'exigence de qualification vis à vis des biomolécules que des molécules issues du carbone fossile en termes de caractéristiques chimiques voire de propriétés fonctionnelles est un besoin. L'optimisation de la biomasse, tant au niveau de sa composition moléculaire, de l'organisation supramoléculaire, que de la localisation tissulaire des biomolécules, pour répondre aux usages est certainement le principal verrou technologique. La réduction de l'hétérogénéité intra-spécifique et intra-génotypique est une attente forte.

Simultanément à l'identification de solutions technologiques, des réglementations fondées sur des procédures de normalisation fiables devront être mises en place, puisque le consommateur jugera d'abord par les performances techniques.

La satisfaction des attentes des industriels utilisateurs de produits dérivés de la biomasse nécessitera de sécuriser les approvisionnements: quantité, qualité, saisonnalité, pérennité, logistique, aller vers des productions aux caractéristiques adaptées à la transformation et à l'usage.

## 4. Exploration de la diversité des solutions végétales

L'objectif de ce chapitre est de dégager les principales questions de recherche à explorer vis-à-vis des espèces végétales capables de produire les structures moléculaires d'intérêt qui ont été décrites

précédemment. Afin d'éviter une énumération longue et inévitablement incomplète des espèces à identifier, l'attention s'est focalisée sur quelques plantes potentiellement intéressantes. Les contraintes économiques et sociologiques n'ont délibérément pas été considérées à ce stade de manière à ne négliger aucune proposition de recherche originale : il est important de ne pas limiter trop rapidement le champ de réflexion, les solutions de rupture découlant généralement d'une approche sortant des normes. Les volumes de productions et d'usages de la biomasse sont disponibles dans différentes bases de données (FAO, Agrimer) et seront repris dans le chapitre Prospective.

#### 4.1. Identification des végétaux où ces structures sont présentes

##### 4.1.1. Considérations générales

Un grand nombre de solutions, c'est-à-dire de triplets « espèces – systèmes de production – procédés de transformation », sont envisageables pour répondre aux besoins identifiés dans le premier sous-atelier. Le deuxième sous-atelier a exploré cette diversité compositionnelle des végétaux, dans leurs différents organes, en considérant trois grandes classes de situation non exclusives les unes des autres, selon que l'on cherchera à (i) optimiser la production d'espèces déjà cultivées, (ii) explorer et valoriser la diversité naturelle des espèces peu ou pas encore domestiquées et (iii) élaborer des stratégies de modification des espèces par génie génétique.

Traiter de l'utilisation d'une ressource végétale implique que les usages des co-produits soient considérés tant en alimentation animale qu'humaine, cette dernière imposant des considérations techniques, culturelles et politiques spécifiques. L'alimentation animale est une voie de valorisation pour différentes filières où la teneur en lignocellulose est le premier critère de classification. Certains co-produits existent déjà (DDGS, tourteaux gras par exemple) et d'autres apparaîtront certainement avec le développement de nouvelles technologies de transformation de la biomasse. Dans la mesure où toutes les parties récoltées doivent trouver un usage, la recherche des complémentarités et des compatibilités entre usages en alimentations humaine et animale, énergétiques et en chimie verte est nécessaire afin d'anticiper la gestion des stocks. Les stratégies de bioraffinerie sont de ce fait transversales à chacune de ces trois grandes classes de végétaux, conduisant à une tâche propre. Une démarche simplificatrice peut être adoptée à partir des caractéristiques des organes considérés : (i) alimentarité sur une base compositionnelle, (ii) aptitude au stockage (organes frais vs. organes secs), (iii) encapsulation tissulaire (organe complexe) ou extracellulaire (lignine, cutine).

Passer de la famille biochimique à la plante impose de considérer aussi l'organe d'intérêt. Les végétaux renferment une très grande diversité biochimique : diversité au sein de chaque plante, entre plantes d'une même espèce et entre espèces. Toutefois une classification simple peut être mise en place avec trois familles :

Tableau 11 : classification biochimique des plantes

Famille biochimique	Plantes strictement lignocellulosiques	Plantes à réserve glucidique	Plantes à réserve lipidique
lignocellulose	ylviculture (peuplier, saule, pin, eucalyptus, robinier,...), Miscanthus, macro-algues	tiges de canne à sucre, tiges et enveloppes des grains	tiges et enveloppes des graines
amidon		grains de céréales (blé, maïs, orge, riz, sorgho), graines de protéagineux	
saccharose		racine de betterave, tiges	

		de canne à sucre	
oligosaccharides		graines de légumineuses	
lipides			graines d'oléagineux (colza, tournesol, palmier à huile, soja, ricin, coton), micro-algues
protéines		grains de céréales (gluten de blé, de maïs)	graines d'oléagineux (tourteaux), micro-algues

#### 4.1.2. Spécificités qualitatives

Deux familles biochimiques, les polysaccharides et les lipides méritent une attention particulière en raison du poids des industries d'aval. Les applications de l'amidon se développent essentiellement à partir du glucose, ce qui restreint les attentes sur le grain d'amidon au sens strict.

##### 4.1.2.1. Particularités des sources de lignocellulose

La fraction lignocellulosique représente la première cible dans tout végétal à ce stade, avec le rôle central de la fibre. Il convient d'abord de distinguer deux différents types de fibres en fonction des domaines d'application. Les fibres « tout venant » sont extraites par divers procédés plus ou moins drastiques et produisent des structures fibreuses altérées ou fortement modifiées, souvent aux propriétés mécaniques moyennes, mais suffisantes. Les fibres « longues », à usage spécifique textile ou à renfort pour composite, sont extraites de plantes dédiées en préservant au maximum leur intégrité et/ou leurs associations en faisceaux de fibres de grande longueur (jusqu'à la taille des tiges, dans le cas du lin, par exemple). Leurs propriétés mécaniques et de surface (réactivité, tribologie) étant préservées, leur valeur n'en est que meilleure.

- Dans le premier cas, on valorise la plante entière et l'on s'intéresse particulièrement au maïs fibre, au sorgho et à la canne à sucre. L'avantage du maïs réside dans la connaissance approfondie des ressources génétiques disponibles. Les limites sont en revanche le cycle de production (plante annuelle) qu'il conviendrait d'allonger et, dans une moindre mesure, la présence de matière minérale, dont la silice qui a un impact négatif sur les procédés de transformation.
- Dans le second cas, les plantes dédiées pour la production de fibres à forte valeur ajoutée sont utilisées, notamment le lin, le chanvre et la ramie. Dans tous les cas, les productions sont destinées à des marchés de niche de quelques milliers ou dizaines de milliers de tonnes sur des produits à forte valeur ajoutée, ce qui n'est pas comparable avec le tonnage de fibres de bois utilisées par la papeterie (plusieurs millions de tonnes). De longues fibres de cellulose sans défaut sont généralement recherchées. Il est admis que ces fibres sont à produire dans des plantes déjà riches en cellulose où les interactions avec les autres constituants de la paroi sont faibles, d'où l'intérêt de la ramie par exemple.

Pour la valorisation des lignines en tant que combustibles, co-produits des industries du papier et du bois d'œuvre, l'objectif est de réduire la quantité de lignine, une stratégie classiquement évoquée pour des usages industriels, tels que la production de pâte à papier ou de bioéthanol<sup>100,101</sup>. Cette réduction implique soit une sélection de plantes peu lignifiées (par exemple, sélection classique de clones d'Eucalyptus possédant peu de lignine au Brésil), soit une utilisation de plantes dans lesquelles la voie de biosynthèse des lignines est réduite ou bloquée, le plus souvent au niveau de leurs précurseurs, les monolignols : mutants naturels, mutants-EMS, ADN-T, stratégies OGM Antisens, RNAi, ... De nombreux travaux visant cet objectif sont engagés aux Etats-Unis et en Europe (programmes européens passés

<sup>100</sup> Ralph, John, Gösta Brunow, and Wout Boerjan. 2007. Lignins. *Encyclopedia of Life Sciences*.

<sup>101</sup> Li, X., J. K. Weng, and C. Chapple. 2008. Improvement of biomass through lignin modification. *Plant Journal* 54(4):569-81.

(OPLIGE, TIMBER) ou en cours (RENEWALL, ENERGYPOPLAR, DISCO, AQUATERRE) entre autres). Les végétaux d'intérêt pour ce premier usage des lignines sont le maïs, la luzerne, le sorgho, le Miscanthus, la canne à sucre, le peuplier, le saule.

Les chimistes souhaitent disposer des oligomères de lignols, ou oligolignols, qui sont des composés aromatiques simples, élémentaires, peu ramifiés et peu substitués, destinés à faire des polymères à façon. Ils souhaitent de plus les extraire et les purifier facilement, ces étapes étant fortement limitantes aujourd'hui pour les applications. Ces composés aromatiques pourraient alors être utilisés dans la synthèse de matériaux thermodurcissables et l'élaboration de matrices pour composites, en remplacement des substances à base de phénols pouvant poser des problèmes de toxicologie, de santé humaine et aussi des problèmes environnementaux si l'on considère les étapes de synthèse chimique. Des plantes synthétisant ces composés de base de la chimie des lignines et les accumulant pourraient ainsi être créées, des plantes hyper-accumulatrices d'unités élémentaires pas ou peu polymérisées.

Un autre cas, qui représente une approche nouvelle, serait de produire des molécules de type lignines d'intérêt<sup>102</sup>. Celles-ci peuvent être :

- Des lignines de structure linéaire, pour leurs propriétés mécaniques, des lignines riches en aldéhydes ou en acides, en fonction éther (avec le moins d'OH possible) permettant l'augmentation de l'extractibilité, et d'envisager en conséquence de nombreux usages en chimie verte... Ceci implique aussi de pouvoir les extraire sans les modifier.
- Des oligolignols (2 à 5 monomères) pour réaliser des résines de type phénol-formol (remplacement du cycle benzénique), oligomères qu'il est nécessaire d'adresser dans des compartiments subcellulaires de type vacuoles ou de produire dans le cytoplasme (donc sans polymérisation dans la paroi végétale) afin de faciliter leur extraction.

De telles plantes pourraient être cultivées sur des sols impropres à la culture de plantes alimentaires. Les plantes C4 pérennes pourraient être d'excellents candidats pour ce type de production. Il serait également envisageable de faire produire ces oligolignols élémentaires par des organismes unicellulaires comme les microalgues.

Dans les fractions anatomiques riches en lignocellulose sont présents des **tanins**. Les tanins sont des composés phénoliques complexes présents dans les feuilles, les fruits, l'écorce, le bois, les racines ou les galles de nombreuses plantes. Ce sont des polymères hydrosolubles, de masse molaire et de constitution chimique variables. Ils peuvent transformer les peaux en cuir et présentent en outre de nombreuses autres applications commerciales. Technologiquement, le nécessaire remplacement du brome encore couramment utilisé pour tanner les cuirs pourrait ouvrir la voie des tanins. Il faudrait avant tout étudier l'intérêt de cette production, car il existe déjà de nombreuses sources peu coûteuses de produits utilisables pour le tannage (déchets de scierie, de vendanges, etc.).

#### 4.1.2.2. Particularités des sources de lipides

Les grandes voies de biosynthèse de plusieurs centaines d'acides gras sont connues. Par transgénèse, il est théoriquement envisageable de réaliser à la carte la synthèse de n'importe quel acide gras (à longue ou courte chaîne, saturé ou non, branché ou pas). Cependant, le rendement de synthèse de ces composés sur mesure dans les plantes d'intérêt est souvent extrêmement faible. Là encore, nos connaissances sur la complexité des mécanismes de synthèse *in planta* sont très limitées.

---

<sup>102</sup> Lora, J. H., and W. G. Glasser. 2002. Recent industrial applications of lignin: A sustainable alternative to nonrenewable materials. *Journal of Polymers and the Environment* 10(1-2):39-48.

Les huiles s'accumulent sous la forme de triglycérides, principalement dans les graines (colza, tournesol, soja) et les fruits (palmier, cocotier, olivier). Les triglycérides sont synthétisés à partir d'un squelette glycérol et d'acides gras qui sont aussi des constituants essentiels des membranes biologiques. L'une des difficultés actuelles est que l'on ne sait pas très bien distinguer entre l'incorporation des acides gras dans des lipides membranaires et des lipides de réserve. L'étude du génome d'*Arabidopsis* a révélé l'existence de familles multigéniques pour de très nombreuses étapes de la biosynthèse des lipides, certaines étant ubiquitaires et d'autres plus ou moins spécialisées. L'extension de ces recherches au colza montre un degré supplémentaire de complexité et de spécialisation et il est probable qu'il en est de même chez les autres espèces oléagineuses. On ne sait pas non plus ce qui gouverne l'incorporation d'acides gras spécifiques à chacune des 3 positions du squelette glycérol limitant l'obtention de triglycérides homogènes : ainsi on ne dépasse pas 50 à 60 % d'acide érucique dans les colzas éruciques alors que des espèces sauvages comme le limnanthe peuvent faire de la triérucine (100 %). De façon générale, à l'exception de quelques espèces sauvages, il est difficile de produire des acides gras à forte teneur en acide gras inhabituels. Il y a donc un effort important de recherche à réaliser sur le métabolisme lipidique si l'on veut espérer un jour en comprendre et en exploiter la complexité et la diversité. On ne sait pas non plus comment se fait la partition du carbone entre les lipides et les protéines de réserve et il serait sans doute intéressant d'augmenter la proportion de lipides aux dépens des protéines de réserve, tout en conservant des graines viables et à bonne capacité germinative. Les facteurs de transcription impliqués dans la production des enzymes de biosynthèse des acides gras et des triglycérides sont encore quasiment inconnus.

Les usages des lipides sont dominés quantitativement par le marché du biodiesel. La technologie de trans-estérification pour le biodiesel s'effectue à partir d'huiles végétales possédant un indice de cétane acceptable, une bonne tenue au froid et une bonne stabilité à l'oxydation. Les huiles répondant à ces critères sont celles qui présentent un fort pourcentage en acide oléique. Les plantes de grande culture produisant ce type d'huile dans les régions tempérées sont le colza, le tournesol oléique et dans une moindre mesure le soja (22 % acide oléique)<sup>103</sup>. Ces plantes étant cultivées principalement pour des besoins alimentaires, cela va entraîner une compétition au niveau de la disponibilité des surfaces cultivables dans les pays tempérés. Comme sources alternatives, le *Jatropha*, après sélection pour éliminer les phorbols (qui présentent un problème de toxicité) est un bon candidat, de par la forte teneur en huile de ses graines (entre 30 et 40 %) et sa résistance à un environnement difficile<sup>104</sup>.

Avec la technologie de trans-estérification, le palmier, l'arachide et la caméline sont des sources importantes. Les huiles provenant de ces cultures devront préalablement être hydrogénées. La production de kérosène nécessite des huiles riches en acides gras à chaîne moyenne (8 à 12 atomes de carbone) dont l'hydrogénation générerait des alcanes pouvant être directement utilisés comme carburant pour les avions. Il n'existe pas d'huile correspondant à ces critères provenant de plantes de grande culture. La famille des *Cuphea* s'avère être un bon candidat.

Dans les applications en lubrifiants, les végétaux produisant des cériques (esters d'alcool et d'acides gras) comme le Jojoba *Simmondsia chinensis*<sup>105</sup> et la famille des euphorbes sont des sources d'intérêt pour des biolubrifiants plus spécifiques, supportant des températures élevées. De même le colza

---

<sup>103</sup> Durrett, T. P., C. Benning, and J. Ohlrogge. 2008. Plant triacylglycerols as feedstocks for the production of biofuels. *Plant Journal* 54(4):593-607.

<sup>104</sup> Berchmans, Hanny Johanés, and Shizuko Hirata. 2008. Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. *Bioresource Technology* 99(6):1716-21.

<sup>105</sup> Miwa, T.K. 1971. Jojoba oil wax esters and derived fatty acids and alcohols: gas chromatographic analyses. *Journal of the American Oil Chemists Society* 48(6):259-64.

ancestral (et les crucifères) dont l'acide érucique (C22:1) est l'acide gras majoritaire de l'huile peut constituer une source alternative à des lubrifiants d'origine fossile, à condition que le taux d'acide érucique puisse être augmenté (> 66 %) ce qui n'a pas pu être obtenu jusqu'alors ni par sélection ni par génie génétique. Parmi d'autres crucifères candidats à fournir du C22:1, on retiendra le *Crambe Abyssinica*<sup>106</sup> qui présente une teneur de 58 % en acide érucique. Sa domestication a connu un succès certain aux USA dans l'Etat de Dakota.

Des acides gras méthylés dont la chaîne est partiellement cyclisée (cyclopropane/cyclopropène, furane) présentent un intérêt industriel, mais ces composés ne sont produits naturellement qu'en très faible quantité par des plantes (litchi, *Steculia*, *Exocarpus*, etc.) dont la culture et l'exploitation ne sont pas réellement envisageables. Ces plantes pourraient toutefois constituer une ressource génétique pour la génération d'OGMs.

Dans les applications en tensioactifs, des esters de l'acide laurique (C12:0) sont généralement employés. Les huiles de coco (fruit du cocotier, *Cocos nucifera*) et de palmiste (huile de l'amande de la drupe de palmier à huile, *Elaeis guineensis* Jacq.) restent à ce jour la meilleure ressource. Les *Cuphea* sont également intéressants dans ce cadre, avec les restrictions déjà mentionnées : leurs propriétés agronomiques restent à évaluer.

Dans la série des chaînes longues, les crucifères sont de bons candidats pour l'obtention des tensioactifs cationiques à partir de l'acide érucique et de l'acide béhénique. Les graines d'oléoprotéagineux peuvent contenir jusqu'à 10 % en masse de protéines émulsifiantes (oléosines), dont l'usage est limité par l'absence de procédé d'extraction efficace.

Pour les synthons, les acides gras recherchés (mono- et di-acides) doivent contenir des groupes fonctionnels réactifs : hydroxydes, époxydes, insaturations, etc.<sup>107,108</sup>. On les trouve parmi certaines espèces domestiquées comme le ricin *Ricinus communis* (C18:1 -OH), le lin (C18:3), le colza *Brassica napus* avec l'acide érucique (C22:1) majoritaire, ou encore la coriandre *Coriandrum sativum* (C18:OH). Les graines de *Vernonia* et d'*Euphorbia lagascae* (60-75 %) sont des sources d'acide vernolique (C18-epoxy). Les acides furaniques sont présents dans des proportions intéressantes chez les graminées où ils peuvent représenter environ 240 µg/g de la matière sèche. Par ailleurs, la cutine et la subérine présentes chez la plupart des plantes sont des polyesters naturels. Cette biomasse potentielle pourrait constituer une source d'acides poly-hydroxylés et d'acides gras dicarboxyliques<sup>109</sup>. Une source intéressante pour ces derniers pourrait être l'écorce de chêne liège qui contient des acides dicarboxyliques à longues chaînes (> C16).

#### 4.1.2.3. Particularités des ressources algales

Certaines microalgues, dites oléagineuses, accumulent des quantités importantes de lipides de réserve (30-55 %). Le développement d'une biologie intégrative des systèmes sur des algues modèles pour comprendre les mécanismes de régulation aboutissant au processus de mise en réserve, d'identifier les mécanismes de régulation impliqués dans la répartition entre les différents types de réserve

---

<sup>106</sup> Carlsson, A. S. 2009. "Plant oils as feedstock alternatives to petroleum - A short survey of potential oil crop platforms. *Biochimie* 91(6):665-70.

<sup>107</sup> Hou, C.T., T.M. Kuo, and A.C. Lanser. 2002. Value-added products through bioprocessing : nexoxy fatty acids. *Inform* 13:307-16.

<sup>108</sup> Singh, S. P., X. R. Zhou, Q. Liu, S. Stymne, and A. G. Green. 2005. Metabolic engineering of new fatty acids in plants. *Current Opinion in Plant Biology* 8(2):197-203.

<sup>109</sup> Jetter, R., and L. Kunst. 2008. Plant surface lipid biosynthetic pathways and their utility for metabolic engineering of waxes and hydrocarbon biofuels. *Plant Journal* 54(4):670-83.

(polysaccharides/triglycérides) et les mécanismes de régulation contrôlant la longueur et le degré d'insaturation des chaînes d'acides gras serait moins compliquée *a priori* que chez les plantes supérieures. Actuellement l'utilisation des macroalgues est essentiellement alimentaire. Environ 6 millions de tonnes sont collectées et directement consommées. 1 million de tonnes est utilisé afin d'en extraire des hydrocolloïdes (alginates, agars et carraghénanes), molécules utilisées pour leurs propriétés gélifiantes et texturantes dans les industries agroalimentaires et cosmétiques.

Trois grandes classes de molécules ont été identifiées pouvant présenter un intérêt : les polysaccharides, les « lignine-like » et les métabolites secondaires.

Les **polysaccharides** des macroalgues sont composés de motifs de répétition dont la composition et la distribution vont varier d'une algue à une autre<sup>110</sup>. La variabilité structurale des polysaccharides est associée, comme pour les polysaccharides terrestres, à la diversité botanique. Alors que les polysaccharides terrestres sont généralement neutres (exceptions : pectines, GAG), les polysaccharides marins sont généralement anioniques (fonction uronique, sulfates). Sur la base des connaissances actuelles, la diversité chimique des polysaccharides algaux est illustrée par les structures de polysaccharides déjà identifiées. Par exemple, on rencontre chez les algues brunes les **alginates** mais également des **fucanes sulfatés** dont les structures sont très peu comprises. Chez les algues rouges, à l'exception des **agars** et des **carraghénanes**, peu d'études concernent les autres polysaccharides (xylanes, mannanes sulfatés ?). Les polysaccharides d'algues vertes ont des structures très complexes mais très peu étudiées<sup>111</sup>.

Les enzymes de biosynthèse et de biodégradation de ces polysaccharides représentent en général de nouvelles familles d'enzymes qui n'ont pas d'équivalent dans les lignées végétales terrestres<sup>112</sup>. Par conséquent, il existe un énorme potentiel d'activités enzymatiques encore inexploré. La découverte de telles fonctions supposera de mettre en place des outils de criblage et d'analyse sophistiqués. Ce constat pour les polysaccharides s'applique évidemment aux autres molécules d'intérêt.

Les algues ont développé au cours de l'évolution des métabolismes **des halogénures** : ces organismes ont la capacité de fixer et d'accumuler de fortes concentrations d'iode dont la fonction serait la défense contre les pathogènes. Les métabolites secondaires des algues ont également la caractéristique d'être fréquemment **halogénés**. A la fois, la caractérisation de nouvelles molécules et surtout d'enzymes capables d'halogéner spécifiquement des précurseurs chimiques, offrent des perspectives de chimie-enzymatique en milieu aqueux intéressantes.

Une récente publication<sup>113</sup> relate la présence de **lignine** dans des algues rouges. Bien qu'en très faible quantité, cette lignine est composée des 3 types de précurseurs (H, G et G). Cette découverte est en opposition avec le dogme liant la spécificité de la lignine aux plantes supérieures terrestres. Toutefois, des composés phénoliques de faible masse moléculaire sont présents dans les algues. Le séquençage en cours de 2 algues (une brune : ***Ectocarpus siliculosus*** et une rouge : ***Chondrus crispus***) devrait

---

<sup>110</sup> Kloareg, B., and R. S. Quatrano. 1988. Structure of the cell-walls of marine-algae and ecophysiological functions of the matrix polysaccharides. *Oceanography and Marine Biology* 26:259-315.

<sup>111</sup> Lahaye, M., and A. Robic. 2007. Structure and functional properties of Ulvan, a polysaccharide from green seaweeds. *Biomacromolecules* 8(6):1765-74.

<sup>112</sup> Cantarel, B. L., P. M. Coutinho, C. Rancurel, T. Bernard, V. Lombard, and B. Henrissat. 2009. The Carbohydrate-Active EnZymes database (CAZy): an expert resource for Glycogenomics. *Nucleic Acids Research* 37:D233-D38.

<sup>113</sup> Martone, P. T., J. M. Estevez, F. C. Lu, K. Ruel, M. W. Denny, C. Somerville, and J. Ralph. 2009. Discovery of Lignin in Seaweed Reveals Convergent Evolution of Cell-Wall Architecture. *Current Biology* 19(2):169-75.



permettre d'identifier les gènes responsables de cette biosynthèse et de déterminer les étapes manquantes. A partir de ces connaissances, il serait intéressant d'étudier la possibilité de transférer les étapes manquantes afin de faire synthétiser des oligo-lignols d'intérêt dans des algues si le rendement est satisfaisant.

#### 4.1.2.4. Identification des solutions végétales

Les plantes d'intérêt peuvent se trouver dans deux situations :

- Ces plantes sont des plantes de grandes cultures déjà adaptées à des écosystèmes donnés et maîtrisés qui peuvent être améliorées génétiquement. Il est alors nécessaire de définir la chaîne métabolique à renforcer dans une plante cultivable qui serait capable de produire en qualité et en quantité les molécules souhaitées.
- Ces plantes contiennent des molécules d'intérêt, mais nécessitent la création de systèmes de cultures dédiés, avec certainement une intervention de l'amélioration des plantes. C'est le cas de la domestication des plantes « exotiques » par exemple.

Les niveaux de connaissances et de savoir-faire sont très différents selon l'ancienneté des solutions végétales. Les verrous qui ont été identifiés sont donc différents, ainsi que les questions de recherche qui en découlent. En conséquence, les analyses sont présentées selon une typologie suivante : (i) espèces déjà exploitées et (ii) espèces inexploitées ou à exploiter à un niveau non significatif. Toutefois le même plan est suivi pour chacun de ces chapitres avec une analyse SWOT, le récapitulatif des verrous à lever et les questions de recherche.

## 4.2. Optimisation des espèces déjà exploitées

Utiliser des espèces végétales déjà domestiquées présente des avantages évidents : ces espèces sont mieux connues et ont souvent déjà été sélectionnées pour favoriser des rendements élevés. Or, considérant d'une part l'importance des besoins futurs et d'autre part la concurrence sans cesse accrue sur les ressources foncières, l'atout que représente un rendement élevé est indéniable. Cependant, de nombreuses améliorations doivent encore être mises en œuvre pour adapter ces espèces à leurs nouveaux usages.

### 4.2.1. Considérations générales

Les principales espèces évoquées sont les suivantes : maïs, blé, riz, sorgho, orge, canne à sucre, Miscanthus, bambou, pomme de terre, manioc, betterave, luzerne, tabac, pois, féverole, lin, chanvre, colza, soja, tournesol, coton, arachide, ricin, palmier à huile, peuplier, eucalyptus, pin, saule, robinier, vigne, noyer, olivier, cacaoyer, hévéa, casuarina. Cette liste n'est pas exhaustive et il est clair que toutes ces espèces ne présentent pas le même degré d'intérêt, certaines correspondant à des productions de niche tandis que d'autres ont un impact économique et environnemental considérable.

#### Verrous et questions de recherche

Quels que soient les produits finaux recherchés, un certain nombre de questions de recherche génériques et récurrentes se dégagent :

- Toutes les améliorations visent à augmenter les rendements et la qualité de la production pour un niveau d'intrants donné. Le souhait de l'industrie transformatrice est bien sûr d'avoir un matériel de départ le plus homogène possible et de composition stable dans le temps. La façon dont chaque espèce oriente ses flux de carbone fixés à la suite de la photosynthèse plutôt vers la synthèse de lipides, de carbohydrates ou de protéines est encore largement inconnue. Il est probable que

l'équipement de la cellule en facteurs de transcription spécifiques encore non identifiés joue un rôle majeur, de même que les régulations métaboliques par les flux de molécules élémentaires (sucres, acyl CoA et acides gras, acides aminés,...).

- Les nouvelles variétés devront être adaptées à leur environnement et adaptables aux changements prévisibles d'environnement. Elles devront être économes en eau, en engrais et en produits phytosanitaires, et globalement plus respectueuses de l'environnement. Le stress hydrique est à mettre au premier rang des préoccupations. La consommation d'eau est incontournable pour produire de la biomasse. Le rendement est fonction de la consommation en eau. Améliorer l'efficacité de l'eau est très difficile. A l'échelle physiologique, c'est principalement le métabolisme C3/C4 qui explique les différences d'efficacité de l'eau entre les plantes. Les plantes en C4 ont une meilleure efficacité de conversion de l'eau et de l'énergie solaire que les plantes en C3. Le bilan énergétique des plantes en C4 est supérieur à celui des plantes en C3, et en moyenne 2,75 g/MJ de rayonnement est absorbé contre 2 g/MJ. Le métabolisme en C4 est donc avantageux, ce qui justifie la relance des programmes de recherche sur les possibilités de transformation de plantes C3 en C4 (notamment le riz). Avec l'obtention des séquences des génomes du riz, du sorgho, du maïs, et bientôt du blé, il devient possible de comparer des génomes de plantes C3 et C4, mais cette comparaison ne fait que commencer.

- Quelle que soit l'espèce considérée et le produit recherché, il sera nécessaire d'en établir les bilans énergétiques et écologiques les plus complets possibles. Ce type de données est encore trop rare et trop partiel pour permettre des prises de décision objectives.

- Que l'on recherche des productions de masse ou de niche, il faudra se préoccuper d'obtenir des variétés résistantes aux maladies, aux parasites et aux aléas pédo-climatiques, de préférence avec un bon rendement photosynthétique.

- Le caractère que l'on cherche à améliorer devra être bien défini et se prêter à la sélection. Le plus souvent, il est indispensable que les déterminants du caractère que l'on veut améliorer soient connus à différents niveaux d'intégration : écologique, physiologique, biochimique, génétique et moléculaire.

- La base de l'amélioration des plantes est l'exploitation de la variabilité naturelle existante au sein des collections : si une telle variabilité est faible ou n'existe pas, il y a peu de chance que l'on puisse améliorer quoi que ce soit par sélection classique. Dans ce cas, le recours à la mutagenèse et au génie génétique devra être envisagé. La diversité génétique est un atout qui permet d'adapter la plante à son contexte environnemental (conditions pédo-climatiques, résistance aux maladies, etc.) et/ou à son contexte d'utilisation (maïs waxy ayant des propriétés particulières, blé dur vs blé tendre, etc.). Les conduites de culture, bien maîtrisées et adaptées au matériel génétique et au milieu contribuent à l'adaptation du produit à son contexte d'utilisation.

- L'analyse des génomes des plantes va encore s'accélérer dans les années à venir avec le séquençage plus ou moins complet de la plupart des génomes d'espèces cultivées. Ces recherches procurent également des gènes de fonctions connues et bien caractérisées qu'il va devenir possible d'utiliser en transgénèse. C'est l'endroit où la prise en compte des demandes qualitatives (lipides, amidon, lignocellulose, protéines) pourra enfin s'exprimer, les cribles actuels étant très frustes. Un point crucial sera de corrélérer les variations de ces gènes aux variations phénotypiques. Les **phénotypes et génotypes à haut débit** vont donc constituer des enjeux majeurs de recherche.

- Le rôle des déterminismes épigénétiques dans le développement et l'adaptation à l'environnement commence à émerger comme un facteur essentiel et devra donc être pris en considération.

- L'agronomie et l'amélioration des plantes demeurent des métiers à part entière et il est particulièrement inquiétant d'envisager de multiples projets d'amélioration dans un contexte où les moyens consacrés par les organismes publics de recherche à l'amélioration des plantes *sensu stricto* sont en constante diminution, et que les besoins vont s'accroître considérablement en surajoutant des préoccupations industrielles et environnementales aux seules préoccupations alimentaires. Cette situation est d'autant plus alarmante que les sociétés privées de sélection végétale connaissent des

difficultés et se raréfient en France et que l'enseignement, dans ce domaine, est souvent inexistant ou réduit.

- L'introduction de toute nouvelle culture a un impact sur l'environnement et l'écosystème agricole, avec des questions de pratiques culturales, d'émergence de nouveaux pathogènes, de compétition pour les nutriments, de compétition entre des objectifs alimentaires ou industriels, ou encore de séparation des filières et de rentabilité économique qui sont autant de questions sociétales dont il faut peser avantages et inconvénients.

Au vu de toutes ces exigences, une première recommandation, d'ordre général, consiste donc à soutenir les recherches fondamentales dans tous les aspects de la biologie végétale et de maintenir un secteur fort de recherche et développement appliqué à l'agronomie et l'amélioration des plantes. Cela doit aller de pair avec la formation de nouvelles générations d'agronomes et de sélectionneurs capable d'embrasser l'ensemble des problèmes.

Les recherches devront porter en particulier sur :

- La façon dont les plantes s'adaptent à l'environnement abiotique et biotique (pathogènes).
- Les différents déterminants des caractères que l'on souhaite améliorer (rendement en biomasse et aptitudes technologiques, architecture, type de molécule recherchée, voie de biosynthèse des constituants, modalités de la production, etc.) à différents niveaux d'intégration.
- L'analyse des génomes de plantes, qui ne fait que commencer, et ses applications aux plantes cultivées dans tous ses aspects.
- La variabilité naturelle des caractères que l'on veut améliorer tant au niveau moléculaire que phénotypique.
- La réduction de la complexité moléculaire. L'hétérogénéité à l'intérieur d'un sous-ensemble d'une plante (3 types de lignines, 2 molécules d'amidon, x protéines dans une sous-couche d'aleurone, etc.) est un facteur de complexité vis à vis des utilisations industrielles de ce sous-ensemble que la génétique devrait s'efforcer de réduire.
- La possibilité d'extraire des molécules pouvant devenir sources de synthons.
- La réalisation de bilans énergétiques et écologiques de l'ensemble des filières avec des méthodologies rigoureuses.

Nos cultures ont jusqu'à présent été optimisées essentiellement dans la perspective d'améliorer leurs rendements et plus rarement leurs qualités. Cependant, il est de plus en plus clair que d'autres pratiques culturales peuvent largement contribuer à une agriculture plus durable : réduction des labours, du désherbage, irrigation maîtrisée et apport d'intrants raisonné, rotation des cultures, mélange des variétés voire des espèces sont des facteurs qui peuvent contribuer à améliorer la situation en limitant les pertes d'eau, l'érosion des sols, les pollutions ou encore les conditions phytosanitaires. L'introduction de nouvelles cultures, OGM ou non, doit s'accompagner de l'élaboration de normes d'éloignement des autres cultures, d'études d'impact sur la flore et la faune (pathogènes inclus), sur la structure et l'évolution du sol,...

On peut également envisager d'utiliser pour certaines cultures, notamment celles en vue de la production de biomasse, des terres plus pauvres permettant ainsi de valoriser des zones marginales. Pour ces terres, il conviendra de sélectionner des génotypes plus robustes et plus rustiques, ce qui implique de réaliser aussi des expériences de phénotypage sur ce type de terrain. On pourra peut être alors substituer des génotypes sans doute moins productifs, mais capables de valoriser ces zones marginales. Le rôle des organismes symbiotes (bactéries et mycorhizes) doit également être évalué dans ces conditions.

Cependant, il convient de garder en tête la courbe hyperbolique du rendement en fonction de la surface

nécessaire pour alimenter une usine : moins le rendement est élevé, plus les surfaces nécessaires pour faire tourner l'usine augmentent fortement. En réalité on ne connaît guère à ce jour de système qui serait économiquement rentable avec de faibles rendements. Les couvertures végétales de ces zones sont soit très maigres, soit constituées de plantes âgées à la productivité mince. Naturellement, sur un même terrain infertile, toutes les espèces ne se valent pas et il est possible d'observer des variations. Ainsi, les moins mauvaises apparaissent parfois comme des solutions générales : le switch grass paraît être typiquement de celles là.

#### 4.2.2. Les céréales

Historiquement les céréales sont cultivées essentiellement pour la production de grains destinés aux alimentations humaine et animale. D'autres cultures, telles la canne à sucre ou certains sorghos sont cultivées pour la production de sucres qui s'accumulent dans les tiges, ou encore pour la production de fourrage (maïs ensilage, espèces de prairies). L'utilisation des céréales pour des usages alimentaires pose des questions de compétition avec les productions non alimentaires si l'on veut faire des cultures dédiées. Toutefois ces différentes utilisations ne sont pas exclusives. Pour une même plante, l'amidon et les protéines des grains peuvent être utilisés pour les alimentations, les sucres solubles peuvent être utilisés pour des bioconversions, les résidus des tiges et les feuilles utilisés pour les bioconversions, les matériaux, l'alimentation animale. Ces plantes posent clairement l'importance de raisonner globalement les choix d'affectation des sols et d'usages de la biomasse, en réponse aux différents besoins des sociétés.

L'état de structuration des filières se présente dans des situations très diverses entre chacune des espèces et au niveau international, avec des disparités plus spécifiquement au niveau de l'industrie semencière (production, commercialisation, distribution) et au niveau des différents efforts de recherche. Dans les pays développés et émergents (Amérique du Nord, Europe, Australie, Brésil, Inde) des filières bien identifiées existent avec des sociétés semencières, des groupements de producteurs et des industriels bien organisés. Dans les autres pays, l'industrie semencière peut être inexistante et les agriculteurs autoproduisent leurs semences. Il est donc clair que dans ces régions un des verrous aux gains envisageables par le progrès génétique est la mise en place de systèmes semenciers décentralisés plus efficaces permettant la diffusion des génotypes améliorés.

On dispose d'importantes ressources génétiques et moléculaires pour les céréales de grandes cultures (blé, maïs, orge, riz, sorgho) ainsi que d'un acquis physiologique et agronomique considérable ; des consortia internationaux existent déjà ou sont en cours de montage. Le riz constitue actuellement, par l'ampleur des ressources disponibles, le meilleur modèle pour les céréales et la référence pour la génomique comparative. Il présente néanmoins des différences fondamentales avec d'autres céréales qui font que d'autres modèles seront nécessaires. C'est une plante en C3, dont la tolérance à la sécheresse et l'architecture, par exemple, sont très différentes de celles du blé ou du maïs. A cet égard, le maïs est actuellement le modèle indiscutable pour les plantes en C4. Les travaux en cours sur le riz et le maïs permettent d'anticiper ce qui va se passer sur le blé et les céréales à paille dans les prochaines années. Les outils moléculaires sont beaucoup plus limités sur les autres céréales d'importance, comme la canne à sucre, les céréales énergétiques comme *Miscanthus*, le Switch grass (*Panicum virgatum*) ou les bambous.

Une « céréale biomasse » à vocation première alimentaire mais dont une place plus grande serait faite aux nouvelles utilisations : outre la transformation de l'amidon, les coproduits et les pailles sont utilisés grâce à l'avènement progressif de la chimie de la lignocellulose, qui rend possible la transformation de la plante entière pour de nouveaux usages. Cette vision est probablement celle qui serait la plus rapide pour faire aboutir le concept de bioraffinerie. Dans cette vision de développement progressif, dès lors

que de nouvelles applications et de nouveaux procédés permettront de produire des volumes significatifs, la nature des cultures et leur production pourront à leur tour évoluer. Cependant, il faudra veiller à éviter un développement trop important des surfaces cultivées en céréales ou en colza, qui pourrait aggraver les problèmes parasitaires de ces cultures (et donc l'usage de pesticides), et homogénéiser les mosaïques paysagères au détriment de la biodiversité.

## Verrous et questions de recherche

Plusieurs verrous technologiques sont identifiables généralement pour les céréales :

- Le compromis à trouver pour la lignocellulose entre la réduction des quantités et structures des lignines et acides hydroxycinnamiques qui gênent la déconstruction des polysaccharides de la paroi secondaire, et donc ainsi minimiser les impacts environnementaux et énergétiques des prétraitements physico-chimiques. Il faut probablement envisager d'identifier les critères d'efficacité type de biomasse x modalités de prétraitement. Une revue bibliographique récente synthétise des valeurs consensuelles de la composition de diverses cultures énergétiques<sup>114</sup>, mais cela ne prend pas en compte la variabilité intra-spécifique, qui fera la base des progrès à venir.
- La disponibilité d'idéotypes de plantes pour des usages donnés si le choix est d'avoir des cultures dédiés plutôt que mixtes (ce qui suppose la disponibilité des surfaces agricoles correspondantes). On peut envisager de mettre au point des céréales et/ou des graminées dans lesquelles on favorise la production de biomasse avec la modification de la durée semis – floraison, avec des floraisons tardives en jouant sur les gènes contrôlant la floraison, la photopériode ou le tallage.
- La disponibilité d'une source de biomasse pérenne, avec les risques corrélatifs d'installer pathogènes et ravageurs, et donc de ce qui fait qu'une espèce est pérenne ou annuelle. On peut envisager de mettre au point des variétés pérennes ayant perdu l'aptitude à la reproduction sexuée et qui pourraient se propager par bouturage ou rhizome. La biologie des rhizomes est mal connue et devrait faire l'objet de recherches avec des espèces de référence comme le bambou ou *Miscanthus*.

Les questions de recherche qui en découlent sont :

En priorité 1 :

- Structure et organisation des parois, lignification, relations acides hydroxycinnamiques et glucides pariétaux en vue de la déconstruction de ces parois.
- Spécificités des lignocelluloses de graminées (mode d'assemblage des polymères pariétaux, *via* les ponts féruliques et stratégie de leur fractionnement biologique).
- Régulation du tissu lignifié, patterning et contrôle de la mise en place et de l'accumulation des polymères pariétaux phénoliques et glucidiques, incluant une approche facteurs de transcription.
- Relations entre structure des parois et tolérance aux stress biotiques (déficit hydrique, chaleur) et abiotiques.

En priorité 2 :

- Déterminisme de l'architecture aérienne et de son rôle dans la production de biomasse.
- Relation entre date de mise à fleur et capacité à accumuler de la biomasse.
- Déterminisme de la formation des rhizomes, caractère annuel/pérenne.
- Optimisation de la composition de la biomasse.
- Process d'extraction et de transformation de la matière première, prétraitements.
- Pratiques culturales et durabilité des cultures bioénergétiques.

<sup>114</sup> Karp, A., and I. Shield. 2008. Bioenergy from plants and the sustainable yield challenge. *New Phytologist* 179(1):15-32.

En priorité 3 :

- Mécanismes de distribution des sucres entre sucres solubles et polymères (amidon et parois). Partition du carbone entre sucres, amino acides et acides gras.
- QTL de teneur en amidon et qualité de l'amidon, variabilité naturelle, dégradation de l'amidon.

Deux espèces ont fait l'objet d'une analyse particulière, le blé et le sorgho.

**4 questions de recherche exprimées à l'issue de l'analyse SWOT sur le blé (tableau 12) sont identifiables :**

- Déterminisme de la morphologie du sillon du grain de blé.
- Evaluation comparée du bilan énergétique et environnemental de différentes sources de biomasse pour une valorisation énergétique (intérêt du blé en tant que ressource énergétique ?).
- Améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote (il s'agit de réduire les besoins en intrants azotés du blé pour minimiser l'impact d'une augmentation du coût énergétique sur cette culture, tout en bénéficiant des opportunités liées à la montée des préoccupations environnementales) pour maintenir la compétitivité en conditions plus restreintes d'intrants, fertilisants et phytosanitaires.
- Retour sur la sélection variétale et les coefficients de récolte (ratio grains/biomasse), notamment pour optimiser la complémentarité des usages entre le grain (valorisation alimentaire) et les pailles (valorisation énergétique) : réduire la concurrence entre usages alimentaires et non alimentaires en développant la complémentarité des usages et en se basant sur une force qui est la longue expérience de la culture et de la sélection variétale du blé.
- Recherche sur les résistances aux bio-agresseurs pour maintenir de bons niveaux de rendements malgré la moindre disponibilité des produits phytosanitaires, tout en bénéficiant de transferts possibles de résultats de recherche relatifs aux autres graminées.

D'origine tropicale (Afrique), le **sorgho** (*Sorghum bicolor* (L) Moench) est une plante en C4 (à forte efficacité photosynthétique) qui appartient à la famille des graminées. Cette espèce présente une forte variabilité génétique, ce qui a permis la sélection de sorghos pour des utilisations variées (voir point 4). Ainsi, les sorghos cultivés pour le grain sont classés dans la sous-espèce bicolor, les sorghos fourragers dans les sous-espèces arundinaceum, drumondii, halepense et alatum. Toutefois, la séparation entre les différents types de sorghos est délicate à opérer car tous les intermédiaires existent entre les sorghos fibre et sucrés, de même que des sorghos sucrés sont aussi des sorghos grain (AGRICE 1998).

Le sorgho cultivé pour le grain présente une grande diversité morphologique et on distingue cinq races principales selon les caractéristiques de la panicule et de l'épillet : les bicolor (où l'on y trouve les sorghos à balai, des sorghos papetiers et des sorghos fourragers), les guinea, les durra, les kafir (intéressants pour leur précocité) et les caudatum (CIRAD-GRET-MEI 2006).

L'obtention de variétés hybrides est possible et cette option est développée par les sélectionneurs des zones tempérées et dans les exploitations mécanisées d'Amérique latine (CIRAD 1995). Dans les pays du Sud, le CIRAD cherche à valoriser la diversité génétique du sorgho et à favoriser la recherche participative (CIRAD-GRET-MEI 2006).

**Les questions de recherche spécifiques pour le sorgho après analyse SWOT (tableau 13) sont identifiables :**

- Optimisation de la durabilité des systèmes de culture « sorgho énergie » : réalisation de bilans en fonction des itinéraires techniques (rotation, cultures multiples,...), identification des itinéraires les plus favorables...
- Optimisation des méthodologies de caractérisation de la biomasse : composition, structure et dégradabilité des parois cellulaires.

- Compréhension des allocations de ressources dans la plante (sucres solubles vs polysaccharides pariétaux, panicule vs tige vs feuilles vs racines) et de leurs modulations en fonction des contraintes environnementales.
- Identification des gènes contrôlant la variabilité des caractères énergétiques (hauteur, diamètre, tallage, compositions et structures des parois cellulaires,...).
- Identification des gènes contrôlant la variabilité de la tolérance au froid pour des utilisations du sorgho en Europe du Nord.
- Identification de génotypes adaptés aux conditions locales (disponibilité en eau, nutriments, cycle de vie et type de produits ciblés : Food-Feed-Fuel ou Food-Fuel ou Feed-Fuel ou Fuel uniquement).

Tableau 12 : analyse SWOT appliquée à l'utilisation du blé pour des usages en chimie verte et bioénergies

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques du Blé	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longue expérience de la culture du blé (Bonne connaissance des impacts environnementaux, sélection variétale avancée, filière organisée)</li> <li>• Culture d'hiver (sol couvert, besoin et disponibilité en eau sont en phase)</li> <li>• Plante polyvalente, pouvant répondre à des besoins en alimentations, chimie verte et bioénergie (Usage du grain pour l'alimentation et la production de bioéthanol, usage de l'amidon pour la production de divers produits bio-sourcés, valorisation énergétique des sons et pailles, valorisation de la cellulose dans les matériaux)</li> <li>• Transformation par des technologies de bioraffinerie disponibles (1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> G)</li> <li>• Grande facilité de transformations de l'amidon en glucose et produits dérivés</li> <li>• Disponibilité de variétés résistantes aux maladies</li> <li>• Disponibilité de ressources génétiques adaptées à des conditions environnementales très variées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Métabolisme en C3 (bilan énergétique moindre que celui d'une C4)</li> <li>• Fractionnement amidon-gluten (adhésion de la matrice protéique et granularité de l'amidon)</li> <li>• Forte teneur des pailles en matières minérales (dont silice)</li> <li>• Fort besoin en intrants (cultures intensives)</li> <li>• Morphologie du grain de blé (présence d'un sillon)</li> <li>• Sensibilité aux fusarioses pouvant rendre des lots de blé impropres à la consommation (effets annuels)</li> <li>• Coût de production (impacte fortement le coût des produits bio-sourcés/ produits pétro-basés)</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte demande en biocarburants</li> <li>• Demande en polymères amphiphiles et autres produits bio-sourcés, aux dépens de l'approche en teneurs moyennes en acides aminés</li> <li>• Forte activité de recherche sur les graminées : transfert de connaissances possible</li> <li>• Préoccupations environnementales</li> <li>• Soutien des politiques publiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concurrence avec les usages alimentaires (à relativiser selon le % de blé servant en alimentation) tant au niveau des surfaces agricoles que de la biomasse</li> <li>• Concurrence avec les autres usages du sol : concurrence des autres filières de production de biomasse</li> <li>• Coût de l'énergie</li> <li>• Accès aux ressources en eau ?</li> <li>• Erosion des sols / valorisation de la plante entière</li> <li>• Diminution de la disponibilité/diversité des traitements phytosanitaires</li> <li>• Délocalisation des productions végétales de masse (faible valeur ajoutée)</li> </ul>

Tableau 13 : analyse SWOT du Sorgho pour des usages en chimie verte et bioénergies.

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques du Sorgho	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Graminée en C4, avec un potentiel de rendement élevé en biomasse et une composition biochimique adaptée aux différentes stratégies de production de bioénergie (conversion de l'amidon du grain vs utilisation des sucres solubles de la tige vs utilisation de la biomasse lignocellulosique)</li> <li>• Plante modèle pour les graminées en C4 (proximité phylogénétique d'autres plantes fortement accumulatrices de biomasse : Canne à Sucre, Miscanthus,...)</li> <li>• Plante rustique nécessitant peu d'intrants</li> <li>• Très bonne tolérance au stress hydrique et efficacité d'utilisation de l'eau élevée (plante en C4)</li> <li>• Une zone de culture potentielle très large</li> <li>• Large collection de ressources génétiques disponibles avec une large gamme de diversité phénotypique</li> <li>• Génome séquencé et ressources moléculaires disponibles (collection de mutants)</li> <li>• Fort potentiel d'amélioration génétique<sup>115</sup></li> <li>• Possibilité de pérennisation</li> <li>• Plante multi-usages dont les différents organes peuvent être exploités dans différents objectifs</li> <li>• Espèce adaptée aux différentes stratégies de production de biofuel (conversion amidon, sucres solubles, biomasse lignocellulosique)</li> <li>• Une dynamique mondiale autour de cette plante (USA, Inde, Europe, Australie, Brésil)</li> <li>• Une interprofession existe en France</li> <li>• Bonne connaissance du sorgho au niveau agronomique (pathogènes, itinéraires culturels,...)</li> <li>• Faible coût de production</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilité au froid pour une culture au Nord de l'Europe</li> <li>• Pas de génotypes développés spécifiquement pour les biocarburants pour l'instant (mais des génotypes biomasse sont en cours de sélection au GEVES et des projets européens sont en cours (Sweetfuel))</li> <li>• Espèce annuelle : empreinte environnementale plus importante que les espèces pérennes</li> <li>• Les facteurs génétiques contrôlant la variabilité des caractères d'intérêt génétique restent à affiner</li> <li>• Itinéraires techniques restent à optimiser (rotations,...) pour une culture dédiée à la bioénergie</li> <li>• Nécessité d'optimisation des aspects de transport et de stockage (si nécessaire)</li> <li>• OGM non souhaitables dans les zones où <i>Sorghum halepense</i> (Johnson grass) est présente</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte demande en bioénergies, chimie du carbone renouvelable.</li> <li>• Proximité du Maïs qui fait office de plante modèles en ce qui concerne les parois des cellules végétales</li> <li>• Limitations des ressources en eau (le sorgho est une plante très tolérante au déficit hydrique)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concurrence avec les usages alimentaires (à relativiser selon le % de blé servant en alimentation) tant au niveau des surfaces agricoles que de la biomasse</li> <li>• Problèmes de logistiques : récolte, transport, stockage</li> </ul>

### **Le Triticale**

Le triticale (*xTriticosecale Wittmack*) est un hybride d'origine européenne appartenant à la famille des graminées. Il est obtenu par croisement du blé (*Triticum* sp.) et du seigle (*Secale* sp.) dans l'objectif initial de combiner la qualité du blé et la rusticité du seigle. Le catalogue variétal européen fait aujourd'hui état de 381 variétés autogames disponibles, dont 68 sont inscrites en France (GNIS, 2009). Toutefois, les progrès réalisés pour améliorer les rendements et les performances agronomiques (triticale de printemps demi-naines mises au point par le CIMMYT, variétés productives élaborées en Pologne au milieu des

<sup>115</sup> Reif J.C. et al. 2005. Wheat genetic diversity trends using domestication and breeding. *Theoretical and Applied Genetics* 110(5):859-864.



années 80) ont pu engendrer un rétrécissement de la base génétique des variétés de triticale<sup>116</sup>. Pour surmonter ce problème, un certain nombre de programmes ont été menés : (i) un programme de création et utilisation de triticale a été conduit par l'INRA et le GIE triticale (regroupant les cinq sélectionneurs privés de triticale) à la fin des années 90 pour augmenter la diversité génétique du triticale<sup>117</sup>, (ii) à l'international, des programmes de cytogénétique et de diversification sont développés par le CIMMYT mais aussi à l'Université de Hohenheim (Allemagne) et de Sydney (Australie) et dans les stations de Krasnodar (Russie) et de Radzikow (Pologne)<sup>118</sup> (iii) plus récemment, une évaluation de la diversité génétique du triticale assistée par marqueurs a été réalisée<sup>119</sup>

### 4.2.3. Les oléagineux

Les oléagineux sont cultivés principalement pour produire des huiles destinées aux consommations humaine et animale, les tourteaux renforçant l'alimentation animale. La production actuelle d'huile est assurée par essentiellement 8 espèces. Par ordre d'importance, on trouve le palmier à huile, le soja, le colza, le tournesol, et à un moindre degré le cotonnier, l'arachide et le cocotier. Il y a des différences compositionnelles importantes : par exemple l'huile de coco et l'huile de palmiste sont riches en acide laurique (acide gras à chaîne moyenne C12) utilisé en cosmétique, savonnerie et pour fabriquer les margarines.

#### **Le colza**

Le colza (*Brassica napus* L.) est une espèce de la famille des crucifères cultivée de longue date pour son huile, qui constitue 50 à 60 % de la matière sèche totale des graines. La sélection déjà ancienne arrive à un certain niveau de maturité. Il s'agit d'une plante préférentiellement autogame (de l'ordre de 80 % d'autogamie). Ses caractéristiques génétiques sont relativement bien connues, et ont bénéficié des travaux de génétique moléculaire menés sur l'espèce modèle *Arabidopsis thaliana*.

En Europe, ce sont principalement les cultivars de type hiver qui sont utilisés. Le potentiel des variétés ayant fortement progressé ces dernières années, des rendements de l'ordre de 55 à 60 q/ha sont atteints en parcelles agricoles. Les moyennes nationales françaises restent plus modestes, de l'ordre de 33 q/ha en moyenne, et ont varié de 27 à 36,6 q/ha sur la dernière décennie. La culture de variétés de printemps a été quasiment abandonnée en France et reste peu développée en Europe. Au Canada, la culture est basée sur des cultivars de printemps.

La sélection génétique du colza en France remonte aux origines de l'INRA en 1946. Elle a connu plusieurs étapes et succès majeurs :

- création des variétés à faibles teneurs en acide érucique.
- création des variétés dites « double 0 », à faibles teneurs en acide érucique (huile) et en glucosinolates (composé antinutritionnel présent dans les tourteaux).
- création de variétés composites (années 1990) puis hybrides (années 2000).

Les efforts de sélection se sont par ailleurs attachés avec succès à l'obtention de variétés plus tolérantes aux maladies (cyindrosporiose dans les années 80-90, puis phoma dans les années 1990-2000).

---

<sup>116</sup> Ammar, K., Mergoum, M., Sajaram, S. 2004. Triticale improvement and production, FAO, Rome, 1-9

<sup>117</sup> Bouguennec, A. et al. 2004. Triticale improvement and production, FAO, Rome, 109-114

<sup>118</sup> Tyrka, M.; Bednarek, P. T.; Kilian, A.; et al. 2011. Genetic map of triticale compiling DaT, SSR and AFLP markers. *Genome* 54: 391-401.

<sup>119</sup> Kuleung, C., Baenziger, P.S., Kachman, S.D. et al. 2006. Evaluation the genetic diversity of triticale with wheat and rye SSR markers. *Crop Science* 46(4):1692-1700.

Le colza étant une plante relativement malléable par la sélection, sa composition en acides gras a déjà fait l'objet de plusieurs modifications (zéro ou riches en acide érucique, bas linoléiques, oléiques,...). La voie des biotechnologies et des organismes génétiquement modifiés ouvrirait de larges perspectives de ce point de vue.

Pour obtenir des variétés à haut rendement, les recherches coordonnées des scientifiques de l'INRA et des sélectionneurs se concentrent depuis quelques années sur la production d'hybrides. Les hybrides de colza représentaient en 2006 30 % du marché des semences certifiées, la plus grande partie de ce marché (70 %) étant issue des lignées. En Allemagne au contraire, les hybrides représentaient en 2006 plus de 60 % des semences utilisées. Les hybrides mis sur le marché depuis 2004-2005 possèdent des rendements de plus en plus compétitifs par rapport aux lignées.

Pour permettre la production industrielle de variétés hybrides, les chercheurs de l'INRA ont développé dans les années 90 des lignées mâle stériles. Pour y parvenir, ils ont décortiqué le mécanisme d'une stérilité mâle particulière existant naturellement chez certaines plantes de radis sauvage. Le gène responsable de cette stérilité est contenu dans le cytoplasme et non dans le noyau des cellules, d'où son nom de stérilité mâle cytoplasmique (SMC). Par fusion de protoplastes, les chercheurs de l'INRA ont obtenu des colzas ayant des chromosomes de colza et un cytoplasme mixte colza/radis contenant le gène originaire du radis conférant la stérilité mâle. Ce type de colza est à la base de la majorité des hybrides actuels cultivés en France et d'un des brevets les plus exploités de l'INRA (brevet Ogu-INRA, , 1990). Pour obtenir un hybride fertile, il faut croiser une lignée maternelle mâle stérile (colza ayant dans son cytoplasme le gène de radis de la SMC) et une lignée paternelle restauratrice (colza fournissant le pollen, et ayant dans son génome le gène restaurateur de radis). On obtient ainsi un hybride fertile, dit « restauré ». L'obtention d'une lignée restauratrice de fertilité possédant des qualités agronomiques telle qu'une teneur en glucosinolates réduite, a fait aussi l'objet d'un dépôt de brevet.

### Caractéristiques des produits, co-produits, sous-produits

L'extraction de l'huile fournit simultanément un sous-produit riche en protéines, le tourteau, utilisé en alimentation animale. Le process de trituration fournit 40 à 42 % d'huile et 56 % de tourteau.

#### - L'huile

L'huile de colza est l'huile alimentaire la plus riche en acides gras essentiels (à la fois familles des oméga 3 et des oméga 6), dont l'intérêt nutritionnel est reconnu.

### Composition en acides gras (%) de différentes huiles de colza et tournesol

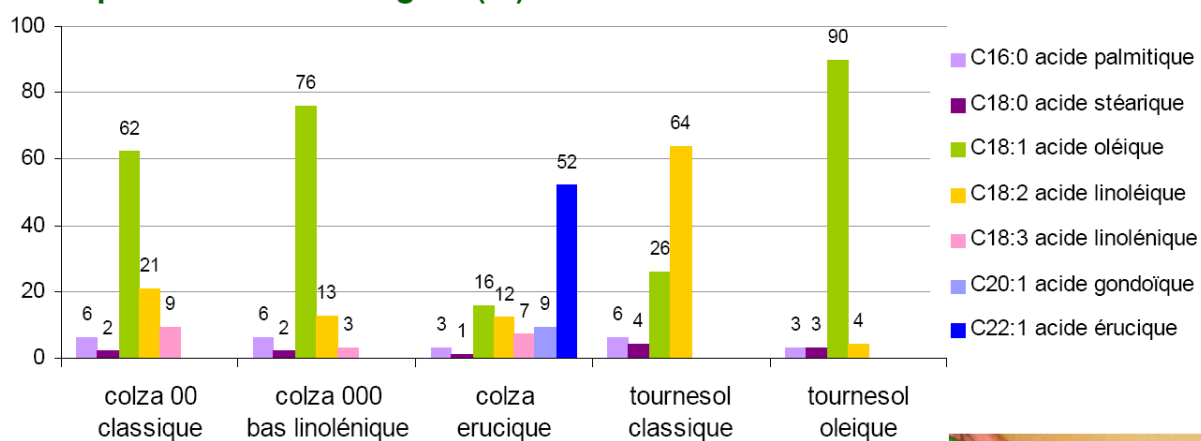


Figure 11 : Compositions en acides gras de différentes huiles (Source CETIOM)

Les huiles de colza classique sont utilisées pour la cuisine ou l'assaisonnement (très bonne qualité nutritionnelle) mais non recommandées pour la friture (odeur désagréable), entrent dans la composition des huiles recombinaées pour leur apport en oméga 3 (acide linoléique). Les utilisations industrielles concernent les lubrifiants, solvants, agrochimie, cosmétiques et biodiesel (Diester).

Les huiles de colza bas linoléique haut oléique (Colza 000) sont utilisées en Alimentation humaine : le taux d'acide linoléique est abaissé à 3 %, ces huiles peuvent être chauffées sans risque. Le rapport oméga 6 / oméga 3 est proche de 5, norme recommandée par les nutritionnistes. Principal débouché : la restauration hors foyer

Les huiles de colza érucique sont interdites à la consommation humaine et réservées à l'industrie cosmétique et à l'agrochimie : elles sont utilisées pour les détergents (savons, anti-mousses, adoucissants textiles), les lubrifiants (chaîne de tronçonneuse), les solvants, polymères et peintures.

- Le tourteau

62 % des tourteaux de colza sont utilisés pour l'alimentation des ruminants.

Les utilisations pour les autres espèces animales sont freinées du fait des caractéristiques de ces tourteaux : leur valeur énergétique pour l'alimentation en porcs et volailles, ainsi que leur teneur résiduelle en glucosinolates. (Evrard 2005)

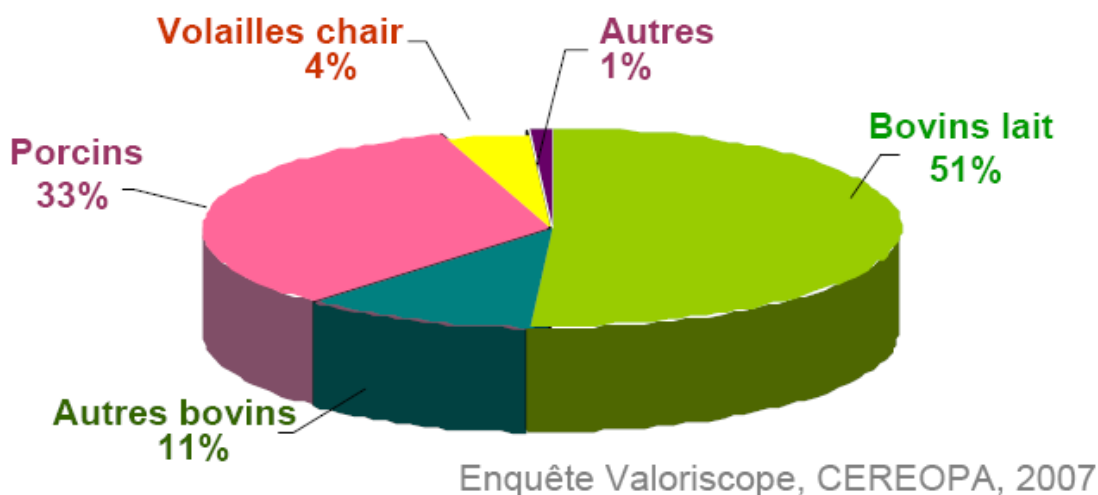


Figure 12 : Utilisation des tourteaux de colza

Tableau 14 : Caractéristiques des tourteaux de colza (source : INRA 1994)

Caractéristiques des Tourteaux de colza	Tourteau entier	Tourteau dépelliculé	gain
MAT (% brut)	35,2	40,5	+ 15 %
CB (% brut)	11,7	5,8	- 50 %
EB (kcal/kg)	4150	4120	
UFL (par kg)	0,92	1,10	+ 10 %
ED porcs (kcal/kg)	2850	3520	+ 24 %

EM poulets (kcal/kg)	1580	1850	+ 17 %
----------------------	------	------	--------

La valorisation des protéines du colza a fait l'objet d'études – notamment dans le cadre du programme européen ENHANCE (2000-2004) qui montraient des caractéristiques tensioactives intéressantes dans les domaines des agents moussants et des colles<sup>120, 121</sup>.

D'un point de vue agronomique, le colza introduit dans des rotations « colza / blé/ orge » augmente le risque lié aux adventices sur les céréales.

### Verrous et questions de recherche

Il est souhaitable d'allonger les rotations en introduisant des cultures de printemps. Les travaux de sélection réalisés sur le colza ou le tournesol à des fins alimentaires se sont attachés à éliminer les acides gras à très longues chaînes tel l'acide érucique, indésirable pour la consommation. Les autres recherches sur ces espèces consistent à améliorer le rendement, notamment par la production d'hybrides, à éliminer ou diminuer des substances indésirables comme les glucosinolates ou l'acide chlorogénique qui ont des propriétés anti-appétentes lorsqu'elles sont présentes dans les tourteaux et à améliorer la résistance aux maladies en particulier les champignons. Des QTL de teneur en huile sont recherchés, mais les études sur les flux de précurseurs (acétate, glycérol) sont sans doute trop négligées.

Les variétés de colza « classiques » ont la teneur requise en acide oléique (65-70 %) pour la production de diester. Le handicap majeur du colza pour la production de biodiesel est la part importante prise par la fumure (N, P, K) qui représente les 2/3 du coût énergétique de la production. Il est donc important de faire porter les efforts de recherche sur l'efficacité d'utilisation de l'azote. Un autre aspect important dans le bilan énergétique est constitué par la trituration: des stratégies de modification des enveloppes des graines et de modification de la taille des globules lipidiques (oléosomes) sont envisageables. Le colza produit un tourteau moins cher que le soja mais riche en tanins, ce qui pose un problème de valorisation dans la nutrition animale pour les monogastriques. Cependant des améliorations de la qualité du tourteau ne semblent pas prioritaires pour la filière qui considère que sa qualité nutritive ne sera pas compétitive avec celle du soja.

On dispose d'atouts pour aborder cette recherche avec une bonne collection de variétés contrastées pour la production d'huile, la proximité du colza et d'*Arabidopsis* permettant d'exploiter les ressources de la génomique, des ressources moléculaires importantes sur le colza et crucifères voisines (chou, moutarde), des brouillons de génome pour *B. rapa*, *B. oleracea* et bientôt pour *B. napus* sont en cours de réalisation à l'initiative du Canada, des USA, de la Corée du sud, de l'Angleterre et de la Chine avec une participation française à construire.

### Le tournesol

<sup>120</sup>Larré, C., Popineau, Y., Sanchez-Vioque, R., Bérot, S., Guéguen, J., Mulder, W. 2003. Chemical or enzymatic hydrolysis : two ways to improve foaming properties of rapeseed isolates. Proceedings of the 11. international rapeseed congress. Toward enhanced value of cruciferous oilseed crops by optimal production and use of the high quality seed components. Copenhagen (DNK) : Royal Veterinary and Agricultural University 2003. 521-523

<sup>121</sup> Devouge, V. ; Rogniaux, H., Nesi, N., *et al.* 2007. Differential proteomic analysis of four near-isogenic Brassica napus varieties bred for their erucic acid and glucosinolate contents. *Journal of Proteome Research* 6 (4) :1342-1353.

La culture du tournesol a un rendement par hectare significativement inférieur à celui du colza, mais la culture n'est pas inféodée aux mêmes espaces ni aux mêmes pratiques culturales : espèce du Sud de l'Europe, cultivée en été, peu gourmande en intrants (eau, fumure, pesticides et fongicides), le tournesol représente au moins un complément indispensable au colza, dans la palette d'espèces cultivées en Europe à des fins alimentaires ou énergétiques. Du fait de la grande diversité d'adaptation des écotypes sauvages d'*Helianthus annuus* dont les types cultivés sont issus, il est espéré que le transfert d'allèles, en provenance de ces sources, permette aux futurs cultivars une meilleure résistance aux différents stress abiotiques auxquels la culture est soumise, et par là, une meilleure régularité de productivité.

### **Verrous et questions de recherche**

Les progrès en productivité ont été limités au cours des années passées, mais des intervenants de la filière considèrent qu'un poids trop important a été accordé à la résistance aux maladies au sein des instances d'inscription, au détriment de possibles progrès génétiques en rendement. Pour la production de FAME (ester méthylique d'acide gras) l'industrie demande une teneur suffisante en acide oléique. Les variétés « classiques » de tournesol ont une teneur moyenne en acide oléique de 35 %, et seulement une variété sur trois inscrites au catalogue français est de type « high oleic ».

Les ressources génomiques sont restées longtemps limitées malgré l'existence de cartes génétiques, de banques BAC et de plusieurs centaines de milliers d'EST. Un consortium international piloté par le Canada et associant les USA et la France a démarré ses travaux en juillet 2009 dans l'objectif de produire, sur le tournesol, la première séquence génomique d'une Astéragée. Ce projet vise au-delà du séquençage du génome, avec un volet de génétique d'association sur des caractères simples, et un volet « second generation biofuel », car une espèce proche (*Helianthus argophyllus*) présenterait des caractères intéressants, de type « woody ». Les acteurs semenciers majeurs au niveau mondial sont depuis l'automne 2009 basés en France. Ils y développent un savoir-faire pour le marché mondial, et engendrent des emplois aussi bien dans les métiers de la recherche que de celui de la production sous-traitée aux agriculteurs multiplicateurs. Le tournesol mériterait certainement des efforts plus soutenus.

### **Le palmier à l'huile**

Il représente la première source d'huile dans le monde. L'usage de l'huile de palme comme biocarburant dépend des cours du pétrole.

### **Verrous et questions de recherche**

Les principales interrogations portent sur la durabilité et le maintien des équilibres écologiques dans les régions concernées (Indonésie en particulier). Des initiatives vers la durabilité existent (notamment le « Round Table on Sustainable Palm Oil (RSPO) »).

Le deuxième verrou est celui de la sensibilité à 3 maladies : fusariose en Afrique (20 à 30 % de mortalité), Ganoderma en Asie (20 à 30 % de mortalité) et pourriture du cœur en Amérique Latine (jusqu'à 80 % de mortalité). Une base génétique a été mise en évidence pour chacune de ces trois maladies et différents matériels sont déjà proposés, soit sous forme de graines, soit sous forme de vitroplants (plus limitée pour le moment).

Un autre verrou important pour maîtriser cette production est le contrôle de l'évolution sexuée de la plante selon les conditions agropédoclimatiques : la sécheresse induit le cycle mâle. Pour assurer une bonne production, il faut un bon équilibre pollen/fleurs femelles. Le déterminisme sexuel chez le palmier

à huile étant également influencé par des facteurs génétiques, il est possible d'avancer, par sélection variétale, vers une situation de « pseudo-dioïcie ». En effet la sélection génétique réalisée depuis de nombreuses années a déjà permis d'augmenter significativement la féminité des arbres. Un nouveau programme de recherche sur le déterminisme moléculaire du sexe vient d'être lancé entre l'IRD et le CIRAD. En effet la maîtrise du sexe permettrait d'optimiser le ratio mâle/femelle et donc la productivité de la plantation. Une autre piste qui pourrait être envisagée est la parthénocarpie, qui permettrait de produire de façon fiable des fruits en absence de pollen.

Tableau 15 : analyse SWOT du palmier à huile (*Elaeis guineensis*)

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques du palmier à huile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très forte productivité en huile (jusqu'à 10 tonnes/ha/an)</li> <li>• Plantations exploitables pendant au moins 15 ans (rentabilité / stabilité des sols)</li> <li>• Qualités spécifiques de l'huile (eg température élevée d'ébullition)</li> <li>• Génome séquencé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Récolte fastidieuse, mécanisation difficilement envisageable</li> <li>• Besoin élevé en eau (1,5m minimum par an)</li> <li>• Besoins en fertilisant conséquents pour obtenir production optimale</li> <li>• Carte génétique limitée et ressources génétiques mal connues</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demande mondiale pour corps gras d'origine végétale toujours croissante</li> <li>• Possibilité d'introgression de multiples gènes d'intérêt de l'espèce sauvage <i>E. oleifera</i> (résistance aux maladies, non abscission du fruit, « low lipase », teneur élevée en acide oléique, forme compacte)</li> <li>• Possibilité d'augmenter de manière conséquente la production mondiale avec surface plantée existante (diffusion de graines et de clones de génotypes élités)</li> <li>• Création d'un palmier à huile « pseudo-dioïque » pour mieux maîtriser la production (les cycles mâle et femelle dépendent en partie des facteurs climatiques)</li> <li>• Exploitation des « by-products » (raffes pour biocarburants 2<sup>e</sup> génération ; bois,...)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficultés croissantes pour trouver des récolteurs, en particulier dans les pays émergents</li> <li>• Destruction de la forêt tropicale dans certains pays (eg Indonésie) et pratiques « non durables »</li> <li>• Compétition entre usages alimentaires et biocarburant de 1<sup>ere</sup> génération</li> </ul>

### **Le coton**

Deux principales espèces sont cultivées, *Gossypium hirsutum* (90 % des surfaces dans le monde) et *Gossypium barbadense* (6 %). Comparativement à d'autres plantes oléagineuses, le coton a fait l'objet de peu de travaux dans ces domaines. Les différents éléments et résultats<sup>122</sup> sont ceux d'équipes américaines (Texas) et surtout australiennes (CSIRO/Canberra).

Le coton est une culture multi-usages: le coton-graine fournit, après égrenage (mécanique, industriel),

<sup>122</sup> Liu, Q., S. Singh, Chapman K., and Green A. 2009. Bridging traditional and molecular genetics in modifying cottonseed oil. in *Genetics and Genomics of Cotton*, edited by A.H. Paterson: Springer.

de la fibre, des graines et des déchets (proportion de l'ordre de 40 / 57 / 3 en poids). Chaque fibre est constituée de cellulose (95 % en moyenne), de protéines (1,6 %), de cires (0,9 %), de sucres physiologiques (0,3 %). La fibre de coton à usage textile demeure le principal produit d'importance économique et fait l'objet d'intenses recherches.

La graine est constituée d'une coque portant des fibres courtes résiduelles (linter), entourant une amande protéo-oléagineuse : elle contient environ 22 % de protéines, 20 % de matières grasses et 28 % de cellulose brute (sur poids sec). Elle peut être utilisée entière pour l'alimentation des vaches laitières (en Amérique du Nord). L'huile de coton est naturellement riche en acide linoléique (58 %) et palmitique, (26 %) et pauvre en acides stéarique (2 %) et oléique (13 %) ; elle contient aussi des composants non lipidiques, Vitamine E et phytostérols.

Les approches biotechnologiques telles que la transgénèse ou la RNAi ont déjà permis d'induire des modifications d'expression de gènes afin d'altérer la composition et de développer des lignées de type :

- High-oleic acid Cottonseed (HO-CSO), High-stearic acid Cottonseed (HS-CSO), et combinaison High-oleic et High-stearic acid, ou modification de la teneur en acide palmitique dans le sens d'une réduction (favorable pour la santé) ou d'une augmentation, avec différents usages potentiels respectifs (cosmétologie, lubrifiants).
- Réduction de la teneur en acides gras cyclopropénoïdes (utilisation alimentaire) ou encore augmentation de celle en acide vernolique (utilisables pour la production de colles, résines, agents de surfaces).

Le tourteau de coton (deuxième source mondiale de tourteau) présente un taux de protéines qui varie de 28 à 58 %, un taux de cellulose brute de 8 à 23 % et un taux de matières grasses de 0,5 à 15 % (sur poids sec). La farine de coton (amandes) peut contenir plus de 50 % de protéines et possède une excellente valeur nutritionnelle (produits destinés à l'enfant en période de sevrage ou souffrant de malnutrition sévère, alimentation traditionnelle africaine pour les farines « *glandless* », sans gossypol, cf. ci-dessous). Enfin un composé polyphénolique insecticide et toxique pour les animaux monogastriques, le gossypol, est présent dans la plante et dans les graines.

### **Verrous et questions de recherche**

Compte tenu du caractère polyvalent des utilisations des produits du cotonnier, les potentialités en termes de thématiques de recherche peuvent se subdiviser pour le cas du coton en valorisation:

- de la fibre comme matière première d'origine naturelle à usage textile (biomatériau).
- de l'huile et des acides gras valorisables en biodiesel (biocarburant et synthons).
- des matières ligno-cellulosiques qui constituent, hors la fibre et les amandes, les sous-produits de l'égrenage (coques des graines, linters et déchets de lint cleaners) et qui sont valorisables en bioéthanol ou biométhanol (biocarburant) ou en matériaux biosourcés.

Les questions de recherche sont :

- Diversifier l'utilisation des graines de coton et augmenter ainsi leur valeur pour le producteur. Maîtriser les procédés de mise en forme à l'échelle industrielle, en rapport avec leur impact sur la plante, la culture et plus largement l'ensemble de la filière. Ceci est particulièrement vrai dans le contexte des filières cotonnières souvent fragiles dans les pays en développement (Afrique).
- Le développement des ressources TILLING (non existantes dans le domaine publique) sur coton.

Tableau 16 : analyse SWOT de la graine de cotonnier

SWOT/graine de coton biocarburant	Forces	Faiblesses
Caractéristiques internes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les ressources génétiques dans le genre <i>Gossypium</i> sont nombreuses et constituent un réservoir de variabilité génétique (50 espèces &gt;3000 accessions dans la banque de gènes du CIRAD)</li> <li>• Ressources moléculaires nombreuses et la plupart des outils biotechnologiques sont utilisés (ou aisément mobilisables) sur coton: marqueurs moléculaires (&gt;8000 SSR, plusieurs projets SNP en cours y compris au CIRAD) : - plusieurs cartes génétiques saturées et approches QTL sur caractéristiques de fibre.</li> <li>• Transgenèse est maîtrisée (1<sup>ère</sup> plante source de variétés transgéniques dans le monde, avec comme caractères cibles les résistances aux insectes et aux herbicides), de même existence de promoteurs « graine », RNAi déjà publiées sur coton.</li> <li>• Relative proximité de <i>Gossypium</i> avec <i>Arabidopsis</i> (Malvales): gènes orthologues, génomique comparative et physiologie comparative (cf tvx Herman Höfte)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Malgré les travaux sur la fibre en génomique fonctionnelle et structurale, aucun gène candidat « fibre » validé ni d'exemples d'applications commerciales</li> <li>• Absence de publications en génétique de la graine</li> <li>• Faible expertise dans le domaine huile et ses composantes sur coton, à la différence du CSIRO</li> <li>• Peu de données sur la variabilité des caractéristiques qualitatives des graines (teneur en huile, composition, taux de linters), les déterminants de la variation des caractères (études d'association), l'influence environnementale (milieu abiotique, stress, nutrition) sur ces caractères.</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Origine externe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ressources génétiques peu exploitées et peu caractérisées sur un plan phénotypique excepté pour les propriétés physiques des fibres et, dans une moindre mesure, pour leurs teneurs en huile et en protéines.</li> <li>• - Plusieurs projets de séquençage de génomes complets sont en cours aux USA et en Chine (sous-génome diploïdes D et A)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concurrence avec et impact sur filière fibre si on affecte le ratio fibre/graine,</li> <li>• Concurrence avec et impact sur filière graine « classique » food and feed (huile, tourteaux)</li> <li>• Difficultés de mobiliser la filière industrielle.</li> </ul>

## Jatropha

La culture de *Jatropha* est préconisée pour la production de biocarburants en particulier sur des terrains arides et actuellement inoccupés en Inde ou en Afrique.

Tableau 17 : analyse SWOT du *Jatropha*



	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques internes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement satisfaisant en huile avec intrants et eau</li> <li>• Forces</li> <li>• Plante adaptée aux climats arides</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espèce non domestiquée</li> <li>• Tourteaux non valorisables en alimentation animale (présence de phorbol ester) système de reproduction est complexe</li> <li>• Espèce quasiment dépourvue de ressources génétiques et moléculaires</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Source énergétique pour un habitat éloigné des systèmes d'approvisionnement énergétique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dossier surmédiatisé</li> </ul>

### **Autres espèces**

Des ressources importantes sont également disponibles sur le soja aux USA, dont le génome est séquencé. Le génome du ricin est lui aussi séquencé à l'état de brouillon assemblé (biosynthèse d'acide ricinoléique, intéressant pour l'industrie des peintures). Le lin est abordé dans la partie plante à fibre, même si la graine de lin mériterait un chapitre à ce niveau en raison de son intérêt pour la production d'huiles spécifiques.

La cameline (*Camelia sativa*) qui appartient à la famille des crucifère, a disparu depuis la fin du XIX siècle en France. Les graines contiennent de 18 à 30 % d'huiles, utilisées dans les peintures.

<b>Atouts</b>	<b>Faiblesses</b>
Fructification 3 à 4 mois après le semis Terres pauvres Résiste mieux que le colza aux fortes chaleurs Semis entre mi-avril et mi-juin, permettant un remplacement de cultures ratées d'hiver Deux cultures annuelles possibles	Rendement 25 q/ha

### **Récapitulatif des questions de recherche pour les oléagineux**

#### **Priorité 1 :**

- Nouvelles sources de résistance aux pathogènes, principalement les insectes, et dans une moindre mesure les parasites (orobanche) pour colza et tournesol.
- Identification des QTL de rendement en huile.
- Durabilité des productions, amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'azote, bilans énergétiques et écologiques.
- Identification des facteurs de transcription contrôlant la biosynthèse des triglycérides et des acides gras.

#### **Priorité 2 :**

- Identification des mécanismes de partition du carbone entre lipides et protéines.
- Déterminisme de l'incorporation d'acides gras dans les triglycérides plutôt que dans les membranes. Stéréospecificité des acyl-transférases et des complexes enzymatiques dans différentes espèces.

- Biosynthèse d'acides gras inhabituels.
- Identification des flux métaboliques vers la synthèse des huiles et de leur compartimentation cellulaire.
- Impacts environnementaux sur la production de triglycérides.
- Amélioration des processus d'extractabilité.

#### 4.2.4. La sylviculture

La sylviculture présente un certain nombre de spécificités qui rendent l'amélioration des espèces forestières plus difficile que pour les espèces de grande culture : temps de génération important, difficultés techniques (surface d'expérimentation, gigantisme des organismes à manipuler), nombre de croisements contrôlés relativement limité, métabolismes et caractéristiques de développement spécifiques mal connus. Le nombre de chercheurs impliqués est plus réduit que sur les espèces de grande culture mais il s'agit d'une communauté soudée au niveau international.

On dispose de quelques ressources moléculaires. Les génomes de plusieurs espèces ligneuses sont disponibles : peuplier, eucalyptus, vigne et papaye. D'autres sont en cours : prunus, citrus, malus, quercus, castanea,... Des collections d'EST sont disponibles pour de nombreuses espèces.

Un énorme travail d'analyse des voies métaboliques propres aux arbres reste à faire (xylogénèse secondaire). L'analyse moléculaire de la variabilité génétique et l'étude de l'architecture génétique de caractères complexes (QTL) sont en plein développement. La génétique d'association pourra être une voie en l'absence de possibilité de disposer des effectifs *ad hoc* à la détection de QTL (les chercheurs devant s'appuyer sur le matériel mis en place il y a plusieurs décades !).

3 espèces de peupliers hybrides sur le territoire national sont cultivés sur le territoire national. **Le peuplier** est produit sous deux formes particulières : les TCR (très courte rotation) qui présente un intérêt pour la production de bioénergie : 3 révolutions de 7 ans sur des surfaces dédiées, et les TCCR de 2-3 ans, qui présentent l'inconvénient d'une plus grande sensibilité aux pathogènes (rouille notamment). Ce type de culture peut être mené sur des sols médiocres avec apport en azote en début de culture et récolte en hiver après la chute des feuilles. (*cf* § 5.1.3., page 187).

La sylviculture influe sur la qualité du bois. A titre d'exemple, le bois de tension a une quantité plus grande de cellulose. Or, une croissance plus importante s'accompagne d'une plus grande quantité de bois de tension, donc d'une plus grande quantité de cellulose.

Tableau 18 : analyse SWOT du peuplier

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques internes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte productivité (10T MS/ha/an)</li> <li>• Peu d'intrants (engrais, pesticides)</li> <li>• Multiplication végétative</li> <li>• Filière organisée</li> <li>• Coût énergétique faible (production et transformation)</li> <li>• Génome séquencé (collection d'EST), espèce transformable, disponibilité des techniques d'amélioration génétique</li> <li>• Plante modèle et plante d'application</li> <li>• Plante polyvalente (bioénergie, papeterie, matériaux, fibres, bois d'oeuvre)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teneur en eau élevée de la biomasse récoltée</li> <li>• Zone de culture limitée à des stations fertiles et bien alimentées en eau</li> <li>• Grande sensibilité intrinsèque aux bio-agresseurs (maladies, insectes)</li> <li>• Culture monoclonale</li> <li>• Faible durabilité du bois</li> <li>• Coût élevé d'implantation</li> <li>• Coût de la réversibilité de la</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bois de qualité industrielle (homogène) adapté aux procédés de trituration et d'explosion à la vapeur</li> <li>• Mécanisation possible des TCR/TTCR</li> <li>• Zone de culture ouverte, favorable à la biodiversité</li> </ul>	<p>culture</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coupe rase : changement brutal de paysage (impact écologique)</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte demande en bioénergies (combustion, biocarburants)</li> <li>• Demande en synthons (métabolites II, molécules aromatiques ex-lignines)</li> <li>• Développement de l'agroforesterie</li> <li>• Transfert de savoir faire acquis sur le saule (Suède, Angleterre) vers le peuplier</li> <li>• Préoccupations environnementales</li> <li>• Soutien des politiques publiques</li> <li>• Soutien de l'économie en zone rurale / aménagement du territoire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité des ressources financières pour des investissements ayant un retour sur investissement à moyens termes ?</li> <li>• Concurrence avec les autres usages du sol / productions alimentaires</li> <li>• Concurrence avec les réserves naturelles / zones humides</li> <li>• Risque / acceptation sociétale</li> <li>• Accès aux ressources en eau</li> <li>• Peu de traitements phytosanitaires disponibles</li> </ul>

Tableau 19 : analyse SWOT du Saule

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques internes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte productivité (10T MS/ha/an)</li> <li>• Peu d'intrants (engrais, pesticides)</li> <li>• Cycle végétatif plus court que celui du peuplier</li> <li>• Grande variabilité génétique</li> <li>• Mécanisation possible des TCR/TTCR</li> <li>• Zone de culture ouverte, favorable à la biodiversité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teneur en eau élevée de la biomasse récoltée</li> <li>• Sensibilités à la sécheresse, aux insectes et à la rouille</li> <li>• Technologies de transformation non développées</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte demande en bioénergies (combustion, biocarburants)</li> <li>• Demande en synthons (métabolites II, molécules aromatiques ex-lignines)</li> <li>• Développement de l'agroforesterie</li> <li>• Proximité du peuplier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité des ressources financières pour des investissements ayant un retour sur investissement à moyens termes ?</li> <li>• Concurrence avec les autres usages du sol / productions alimentaires</li> <li>• Concurrence avec les réserves naturelles / zones humides</li> <li>• Risque / acceptation sociétale</li> <li>• Accès aux ressources en eau</li> <li>• Peu de traitements phytosanitaires disponibles</li> </ul>

### Verrous et questions de recherche

Les questions seront autour des problématiques suivantes :

- Quels sont les produits et objectifs? Peut-on prévoir une évolution ?
- Quels transferts sont envisageables à partir des plantes modèles (cf pin et eucalyptus) ?
- Quel est le compromis à trouver pour la lignocellulose entre (i) la réduction des quantités et structures des lignines et les acides hydroxycinnamiques qui gênent la déconstruction des polysaccharides de la paroi secondaire, et donc ainsi minimisent les impacts environnementaux et

énergétiques des prétraitements physico-chimiques et (ii) le maintien du port de l'arbre, sa tolérance aux stress hydriques et thermiques et sa résistance aux pathogènes ? Il faut probablement envisager d'identifier les critères d'efficacité type de biomasse x modalités de prétraitement.

- Le caractère non alimentaire du produit permet d'envisager son rôle dans la phytoremédiation des sols : quelle stratégie de culture adopte-t-on, certaines variétés sont-elles mieux adaptées que d'autres ?
- Quel est l'impact des rotations rapides sur la fixation globale de CO<sub>2</sub>, sur l'appauvrissement du sol en nutriments, sur l'érosion du sol,...
- Quelles variétés sont adaptées aux types de terres sous-optimales pour parvenir à des rendements relativement élevés sur les zones les moins productives ?

**Le saule** présente une grande variabilité génétique. Il est peu exploité en France. Pratiquement aucune ressource moléculaire n'est disponible.

**Le robinier** pousse sur des sols très pauvres (plante légumineuse). Il produit un bois durable aux propriétés similaires à celles du tek. Peut-il être une source de molécules d'intérêt, en lien avec la durabilité ? C'est un arbre très invasif.

**L'Eucalyptus** est cultivé dans le Sud de la France (2 000 ha). La Production est de 8 à 12 T MS/ha. Des ressources moléculaires sont disponibles et un brouillon de génome est en cours d'élaboration. Quels sont les problèmes spécifiques (tolérance au froid, autres,...) ? Ne peut-on envisager d'utiliser l'eucalyptus pour la production de molécules spécifiques (terpènes et autres d'intérêt pharmaceutique ou cosmétique) ? Quels sont les besoins ? Que sait-on de leurs voies de biosynthèse ?

**Le pin** est la principale ressource de l'industrie papetière. Les nœuds des pins sont riches notamment en lignanes, molécules à forte valeur. Comment le pin se situe-t-il par rapport au peuplier et à l'eucalyptus dans la production de papier ? Pour la production de bois d'œuvre ? Quels sont les avantages et inconvénients de ces différentes espèces ? Ne peut-on envisager une exploitation du pin et d'autres résineux, pour la production de résine, de terpènes et autres produits dérivés ? Quels sont les productions, les besoins ? Que peut-on faire pour améliorer la situation ? En France, que ciblent et que devraient cibler les programmes d'amélioration du pin ?

#### Résumé des questions de recherche :

- Connaissances de la voie de biosynthèse des composants des parois et des déterminants de la régulation, de leur mise en place et lignification. Etude sur la teneur en cellulose du bois de tension.
- Amélioration génétique du peuplier pour réduire ses besoins en eau et minéraux : minimiser ces besoins pour réduire la vulnérabilité des peupleraies vis à vis de la concurrence pour l'usage du sol et de la disponibilité de l'eau. Cette question de recherche se pose également pour le pin.
- Augmentation de la résistance durable du peuplier et des autres espèces aux bio-agresseurs (rouille, champignons) : minimiser cette faiblesse du peuplier pour réduire la menace liée à la faible disponibilité des traitements phytosanitaires.
- Influence de l'architecture (nombre de tiges par souche) sur la qualité et la quantité de bois produit, notamment en relation avec la mise en place de bois de tension.
- Evaluation de la variabilité de la ressource pour des caractères importants pour l'utilisation envisagée (bioénergie, biomatériau, biomolécule) tels que proportion et qualité des lignines et des hémicelluloses et caractéristiques des interactions entre ces composés et la cellulose.
- Identification de synthons valorisables en co-produits, présents par exemple dans les écorces.

#### 4.2.5. Légumineuses protéagineuses et fourragères

Les légumineuses à graines sont beaucoup utilisées pour l'alimentation animale (cible principale) et humaine car elles sont riches en protéines et amidon. Les espèces intéressantes sont le pois, la féverole et le soja. La luzerne est avec le trèfle blanc la principale légumineuse fourragère.

Un intérêt important de ces cultures réside dans le fait qu'elles utilisent une ressource d'azote essentiellement symbiotique (symbiose avec des bactéries du genre *Rhizobium*). C'est donc une source potentielle d'économie de l'énergie fossile liée à la synthèse et à l'épandage des engrais azotés. Ces cultures produisent également un sous-produit de pailles sèches pouvant entrer dans des stratégies de carburant de deuxième génération. Il s'agit par ailleurs de plantes de service du point de vue des systèmes de production, mais elles ne sont pas réellement valorisées pour des applications non alimentaires.

### **Pois (*Pisum sativum L.*) et féverole (*Vicia faba*)**

Des collections de ressources génétiques importantes de pois et féverole sont disponibles à l'INRA et en Europe. Le développement de la connaissance génomique est très important et très rapide sur l'espèce modèle légumineuse *Medicago truncatula* qui est phylogénétiquement proche de la luzerne, du pois et de la féverole. La génomique du pois a également récemment progressé. Des démarches QTL, de génétique d'association et TILLING sont engagées. Les thèmes principaux travaillés sont l'acquisition des ressources azotées et leur remobilisation vers les graines, l'instabilité compositionnelle des graines, la résistance au froid, la résistance aux maladies.

### **Luzerne (*Medicago sativa L.*)**

La luzerne cultivée (*Medicago sativa*) est une plante herbacée fourragère de la famille des fabacées. Elle est très cultivée pour sa richesse en carotène, en protéines (allant jusqu'à 55 %), ce qui la rend intéressante pour l'alimentation du bétail et ses qualités d'amélioration des sols.

Ancienne et très bien adaptée à nos milieux naturels, la luzerne est présente à l'état sub-spontanée sur l'ensemble du territoire ! C'est une plante pérenne qui peut être récoltée plusieurs fois par an et qui est bien connue des céréaliculteurs qui l'ont employée depuis longtemps comme tête d'assolement. Son abandon durant de longues années sur ses territoires de production traditionnels a pu entraîner une perte d'inoculum qu'il est alors possible de réintroduire avec des semences inoculées. En outre la fixation est sensible à la sécheresse (nodosités très sensibles à l'anoxie), ce qui explique le recours à l'irrigation dès qu'il y a de l'eau disponible.

De grands progrès sur la génomique et la post-génomique de la fixation ont été réalisés. Le principal verrou méthodologique est le manque de moyen précis de mesure de l'activité fixatrice instantanée en vraie grandeur (comme pour la photosynthèse par exemple). L'amélioration de la luzerne a longtemps porté sur la morphologie et la vitesse de redémarrage. C'est un bon critère à revoir dans le contexte d'associations possibles avec des graminées pour la biomasse (switchgrass notamment) et dans le cadre d'une industrialisation de la récolte. Les critères de valeurs alimentaires (teneur en azote, en fibre,...) sont connus et leur variabilité génétique a fait l'objet de travaux qui pourraient aussi servir de base à une relance de l'amélioration pour la biomasse. Arabidopsis autant que *Medicago truncatula* sont d'excellents modèles pour les déterminants génétiques de la qualité de la tige.

La luzerne a été utilisée en industrie de déshydratation et la mécanisation de sa récolte dans un contexte industriel est bien connue. En particulier, la question de l'optimisation des tours de récolte en fonction de la maturité attendue a fait l'objet de travaux. De même, comme pour la teneur en azote qui

varie en fonction de la biomasse récoltable, les déterminants écologiques de la teneur en fibre sont mieux connus. Il est probablement possible, grâce à un effort en modélisation de la production, de rationaliser encore la récolte et le traitement ultérieur. Cette culture a en effet bénéficié de nombreuses études sur la valorisation des protéines dans la filière agroalimentaire et dans l'alimentation animale, études dont il serait peut être possible de tirer parti dans un contexte non alimentaire. Réintroduite avec l'élevage dans certaines régions céréalières, elle offre un potentiel d'usages multiples.

Pour finir, il conviendrait de l'essayer dans la mise en culture de plantes énergétiques comme le switch grass. Sa vitesse d'implantation rendrait probablement exploitables plus rapidement la culture de ce dernier et apporterait au sol des stocks d'azote organique importants pour les phases de maturités de la culture de switch grass, au cours desquelles la luzerne disparaîtrait. L'autre avantage d'une couverture avec de la luzerne serait la maîtrise des mauvaises herbes. Mais il n'est pas certain que les phénomènes initiaux de compétitions ne réduisent pas l'intérêt de cette pratique en cas de ressources du sol réduites.

Tableau 20 : analyse SWOT pois-féverole-luzerne

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques internes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction des émissions de GES, par l'efficacité énergétique et la fixation symbiotique de N<sub>2</sub> gazeux</li> <li>• Augmentation du rendement de la culture non-légumineuse qui suit dans les rotations</li> <li>• Réduction de l'usage des pesticides dans les systèmes de culture en lien avec la diversité</li> <li>• Bonnes ressources génétiques et génomiques riches d'une grande variabilité inter et intra-espèces</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faibles volumes</li> <li>• Des rendements instables</li> <li>• La substituabilité à d'autres matières premières utilisées en alimentation animale</li> <li>• Peu d'industries de transformations spécifiques</li> <li>• Luzerne : humidité des fractions récoltées</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Attentes sociétales sur le respect de l'environnement</li> <li>• Des débouchés disponibles</li> <li>• Des préoccupations en santé et nutrition humaine</li> <li>• Une augmentation des prix de l'énergie</li> <li>• La mise en place de taxes liées aux pollutions</li> <li>• Certaines démarches de contractualisation producteur-utilisateurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perte d'intérêt des agriculteurs et des coopératives vendant les pesticides dans un contexte de simplification</li> <li>• Un progrès génétique plus lent que chez d'autres espèces</li> </ul>

#### Questions de recherche :

- La pérennité de cette culture a ses limites. Rôle de l'état de nutrition azotée des pivots, par rapport à la morphologie de la plante et du nombre et activité des bourgeons.
- Réponse de la fixation symbiotique et effet sur la teneur en azote de la récolte.
- Optimisation de la culture en association : intensité de la compétition pour l'eau.
- Organisation de la récolte sur des grandes surfaces, sachant que la qualité varie beaucoup au cours de la repousse, d'où le besoin de disposer d'outils de prédiction de l'état de la culture selon la zone cultivée : mise au point d'un modèle de culture prévoyant les rendements, les propriétés technologiques importantes et les capacités de redémarrage après la coupe (condition de restauration, morphologie de la plante coupée, nombre et activité des bourgeons végétatifs après la récolte).
- Innovation variétale pour des idéotypes adaptés à la production de biomasse.

## 4.2.6. Tubercules et racines

### **Betterave sucrière**

La plupart des utilisations non alimentaires sont liées à des modifications chimiques du sucre. Les ressources moléculaires sont essentiellement développées au sein de 3 sociétés (SYNGENTA, KWS et le groupe FLORIMOND DESPREZ (comprenant sa filiale spécialisée en betterave : SESVANDERHAVE) et de l'USDA. On dispose de cartes génétiques RFLP, SSR et SNP, d'EST et de banques BACs. Des projets de séquençage du génome sont en cours. KWS par sa participation au consortium GABI a également essayé de développer un grand nombre d'études métabolomiques comme celle de la synthèse des sucres (GABI Sweet), mais aussi d'autres caractéristiques comme celles de la montée à graines (GABI Bolt), ou encore sur des maladies (Rhizoctonia,...). La transformation génétique est bien maîtrisée. Il ne semble pas y avoir de ressource TILLING.

Tableau 21 : analyse SWOT de la betterave sucrière

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Origine interne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Performances agronomiques exceptionnelles</li> <li>• Stérilité mâle nucléo cytoplasmique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilisation de l'azote</li> <li>• Résistance au stress hydrique</li> <li>• Résistance aux insectes, en particulier les pucerons</li> <li>• Obtention d'haploïdes</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Origine externe : marché, politiques publiques, concurrence	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extension à des pays de la zone tropicale (comme les Indes)</li> <li>• Capacité à croître dans les sols salins</li> <li>• Forte demande en biocarburants</li> <li>• Demande en polymère amphiphiles et autres produits</li> <li>• Préoccupations environnementales : réduire la dépendance par rapport aux énergies fossiles</li> <li>• Soutien des politiques publiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Régionalisation de la production</li> <li>• Préoccupations environnementales : possible dégradation des sols si pratique de culture non-adaptée</li> <li>• Concurrence avec les usages alimentaires</li> <li>• Concurrence avec les autres usages du sol</li> <li>• Concurrence des autres filières biomasse</li> <li>• Coût de l'énergie</li> </ul>

### **Manioc (*Manihot esculenta*)**

Quelques équipes (Etats-Unis, Colombie, Thaïlande) conduisent des recherches sur les ressources génétiques et moléculaires du manioc et sur la relation entre l'expression de différents gènes et le développement de la plante. L'achèvement d'un brouillon assemblé de qualité pour le génome du manioc vient d'être annoncé par un consortium international public. Le CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) basé en Colombie maintient une bibliothèque de 6 000 variétés de manioc et conduit le principal programme mondial de sélection et amélioration des variétés. Certaines variétés à très haut rendement ont ainsi été identifiées (40 tonnes de racine par hectare ou plus contre 10-20 tonnes par hectare en moyenne pour les variétés actuellement utilisées), ainsi que des variétés d'amidons à haute valeur ajoutée (amidon de type waxy, amidon à haute teneur en amylose).

Tableau 22 : analyse SWOT du manioc

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Origine interne : Caractéristiques du manioc	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plante polyvalente pouvant répondre à des besoins en chimie verte, synthons</li> <li>• Transformation / technologies de bioraffinerie disponible pour éthanol de 1ère génération</li> <li>• Possibilité de culture sur des sols relativement pauvres avec peu d'apports en eau</li> <li>• Grande facilité de transformation de l'amidon en glucose et produits divers</li> <li>• Peu de maladies et prédateurs en Asie du fait de l'importation de la plante depuis l'Amérique latine (diminution des intrants)</li> <li>• Disponibilité de variétés adaptées à des conditions écophysiologiques variées</li> <li>• Séquençage en cours =&gt; nouvelles perspectives d'amélioration</li> <li>• Culture en milieu tropical assurant une disponibilité de matière première toute l'année</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plante tropicale, c'est-à-dire pas de culture possible en France/Europe (nécessité d'importer la matière première, séchée)</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Origine externe : marché, politiques publiques, concurrence	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte demande en biocarburants</li> <li>• Demande en polymère amphiphiles et autres produits</li> <li>• Préoccupations environnementales : réduire la dépendance par rapport aux énergies fossiles</li> <li>• Soutien des politiques publiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Régionalisation de la production</li> <li>• Préoccupations environnementales : possible dégradation des sols si pratique de culture non-adaptée.</li> <li>• Concurrence avec les usages alimentaires</li> <li>• Concurrence avec les autres usages du sol</li> <li>• Concurrence des autres filières biomasse</li> <li>• Coût de l'énergie</li> </ul>

#### 4.2.7. Plantes à fibres

Le cas du coton a été traité précédemment.

Le lin et le chanvre représentent de faibles surfaces cultivées. Les principaux usages sont dans l'industrie textile et les matériaux de construction, en particulier les isolants. Les qualités de finesse recherchées pour le textile ne sont forcément pas requises pour des applications moins traditionnelles comme les agromatériaux (état de surface /défauts, faible densité, morphologie,...). Dans les 2 cas, cohésions intercellulaire et intracellulaire sont des facteurs importants dont les fondements restent à préciser et doivent faire l'objet de recherches. Bien que la cristallinité de la cellulose (plus importante dans les fibres de lin que de chanvre) oriente majoritairement les propriétés de ces fibres, elle n'explique pas toutes leurs propriétés physicochimiques.

Le lin « mixte » peut être valorisé pour sa fibre longue dans des matériaux composites ; sa graine est riche en lignane et en oméga 3. Le rouissage est un prétraitement « naturel » qui permet de désolidariser les faisceaux de fibre de la tige. On a envisagé un rouissage enzymatique à l'aide de



pectinases mais il n'est pas vraiment utilisé en raison du coût. Il serait sans doute intéressant d'utiliser les pectinases de la plante, mais celles-ci sont mal connues et il faudra en manipuler le fonctionnement de façon à les induire au moment du rouissage.

L'inventaire des ressources génétiques et l'acquisition de données moléculaires sont en cours au Canada et en France. Des données sur la cellulose pourront être transférées à partir du coton. Les possibilités d'amélioration devront porter sur les qualités technologiques et la résistance aux insectes.

### Verrous et question de recherche

- La résistance au froid du lin, quelle stratégie d'amélioration ?
- La structuration des fibres et la cohésion des polymères en relation avec les qualités attendues des fibres .
- L'impact de l'environnement et des pratiques culturales sur les qualités de la fibre n'est pas connu précisément.
- L'acquisition de connaissances moléculaires, en particulier sur les enzymes impliquées dans le rouissage.

### 4.3. Utilisation d'espèces végétales encore inexploitées

Trois objectifs ont été envisagés :

- Les **végétaux marins** avec les algues marines.
- Les **plantes (phanérogames terrestres)** qui ne sont pas considérées comme des espèces exploitées en agriculture ou non domestiquées.
- La **phyto-remédiation** pour tirer partie de surfaces sans compétition aucune avec les productions à finalité alimentaire. La phytoremédiation concerne aussi des plantes abordées précédemment (saule, peuplier, etc).

#### 4.3.1. Les algues marines

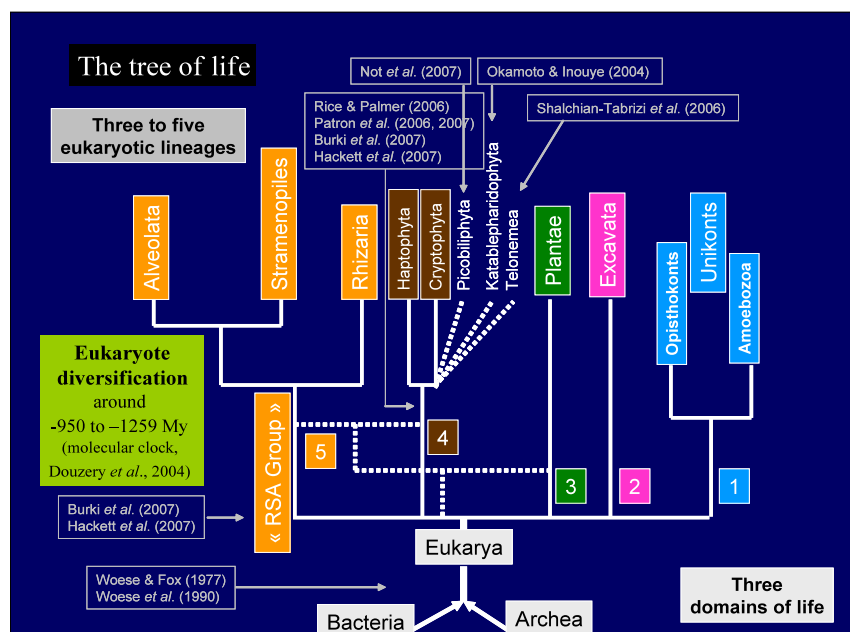


Figure 13 : arbre phylogénétique

Le terme d'algue n'a en fait aucune valeur taxonomique et les algues sont un groupe polyphylétique. Si on doit proposer une définition, les algues englobent tous les **eucaryotes photosynthétiques** dont le cycle de vie se déroule généralement en milieu aquatique à l'exception de certaines espèces de plantes terrestres telles que les posidonies ou les zostères qui sont retournées dans l'eau au cours de l'évolution. Les algues se situent donc dans plusieurs lignées évolutives indépendantes y compris à la base de la lignée des plantes terrestres qui ont pour ancêtre une algue verte. Cette diversité évolutive est le résultat de plusieurs événements endosymbiotiques à l'origine des différents types de plastes actuels. On distingue les macroalgues, les microalgues et les procaryotes photosynthétiques que sont les cyanobactéries, autrefois appelées algues bleues, et qui ont historiquement été classées dans les algues et à l'origine des plastes des eucaryotes photosynthétiques. Ces procaryotes peuvent constituer une biomasse intéressante à exploiter. Il existe trois grands groupes de macroalgues que sont les *Pheophyceae* (algues brunes), les *Rhodophytae* (algues rouges) et les *Chlorophyta* + streptophycophytes (algues vertes). Les micro-algues ou algues microscopiques, souvent unicellulaires, sont plus largement représentées et outre les trois groupes déjà mentionnés, on distingue (i) les Ochrophyta (appartenant aux Stramenopiles, voir lignée 5 figure ci-dessus) auxquelles appartiennent par exemple les bacillariophycées (diatomées) mais aussi de nombreuses autres classes ; (ii) les haptophytes, les cryptophytes et les picobiliphytes (dans une lignée encore non nommée du vivant, voir lignée 4 figure ci-dessus), (iii) les euglénophycées (appartenant aux Excavata, voir lignée 2 figure ci-dessus), (iv) les glaucophytes (appartenant aux Plantae avec les algues vertes et les algues rouges, voir lignée 3 figure ci-dessus), (v) les Chlorarachniophycées (appartenant aux Rhizaria, voir lignée 5 figure ci-dessus) et (vi) les Dinoflagellés (appartenant aux Alveolata, voir lignée 5 figure ci-dessus). Les Phanérogames marines également examinées dans cette tâche sont des plantes terrestres qui au cours de l'évolution sont retournées dans le milieu marin.

Les « algues » sont donc composées d'un très large éventail d'organismes souvent distincts de la lignée des plantes terrestres (Embryophytes) ainsi que de celle des animaux multicellulaires (*Metazoa*) et des champignons (*Eumycota*). Elles possèdent ainsi une gamme toute aussi large de métabolismes qui peuvent se révéler rares ou même absents chez les modèles usuels, animaux, végétaux ou fongiques. Ce sont donc des ressources biologiques aussi précieuses qu'encore relativement inexplorées. La forte mobilisation des recherches sur ces ressources, qui sont redécouvertes actuellement, justifie la place importante qui leur est consacrée dans ce document.

En ce qui concerne les algues exploitées en Europe, elles sont actuellement limitées aux récoltes manuelle et mécanisée des stocks naturels alors qu'elles sont cultivées en Asie. En Europe, on distingue 3 sources de biomasse d'algues : l'exploitation des stocks naturels, les algues d'échouage et la production par aquaculture.

La population naturelle d'algues est une ressource importante. En 1995, environ 3,6 millions de tonnes (poids frais) ont été collectés au niveau mondial à partir des stocks naturels (Lithothamne non inclus). Plus récemment, la FAO (2006) donne à peu près 1 million de tonnes récoltées chaque année provenant des stocks naturels qui ne représentent que 6 % des ressources mondiales, avec plus de 14 millions de tonnes produites par l'aquaculture. En Europe, les producteurs principaux sont la Norvège et la France. Près de 120 000 tonnes de *Laminaria* spp. sont récoltées chaque année en Norvège. Le stock permanent est estimé à 10 millions de tonnes<sup>123</sup>. La France exploite environ 50 000 à 70 000 tonnes par an, principalement *Laminaria* pour la production d'hydrocolloïdes. Aucune évaluation précise sur le stock de *Laminaria* n'a été effectuée récemment, mais une certaine diminution de la densité de population a été observée sur les sites soumis à une collecte fréquente. Il existe maintenant des méthodes globales et rapides pour obtenir les données sur les stocks disponibles. Par exemple une

---

<sup>123</sup> Shen, Q., Jensen R. 2008. Approximation-based feature selection and application for algae population estimation. *Applied Intelligence* 28(2):167-181

technologie sonar spécifique peut acquérir de grandes quantités de données afin d'établir une cartographie précise des stocks sous-marins de Laminaires. Le CEVA a développé cette technologie<sup>124</sup>. Des recherches sont en cours en Irlande afin de développer ces systèmes de surveillance<sup>125</sup>. Des technologies hyperspectrales sont disponibles pour surveiller la zone de balancement des marées. Elles sont basées sur des vols aériens pouvant couvrir des zones très importantes dans un court laps de temps, voire des prises de vues satellitaires, permettant une cartographie précise et rapide. La technologie hyperspectrale est couramment utilisée pour évaluer les marées vertes, mais elle a aussi été utilisée pour évaluer les stocks d'algues brunes à marée basse. À certains endroits il a été observé que les stocks diminuent depuis quelques années. Les facteurs impliqués ne sont pas encore compris. Dans les nouveaux règlements pour la gestion des zones côtières, il est indispensable de montrer que l'activité humaine dans ces zones est durable. Sans méthode appropriée pour contrôler le niveau des stocks d'algues et leur évolution, la récolte des algues est susceptible d'être interdite à brève échéance.

Les algues échouées en grand nombre sur les côtes du fait d'une eutrophisation non maîtrisée sont une autre source potentielle de biomasse. Certains rapports suggèrent que jusqu'à 20 % des stocks de *L. hyperborea* s'échouent chaque année en Irlande. L'emplacement exact et la disponibilité saisonnière de ces ressources sont imprévisibles, mais les historiques d'échouage permettent de faire des prévisions globales. Des échouages d'*Ulva* spp. connus sous le terme «marées vertes» ont tendance à s'étendre le long des côtes européennes en raison de l'eutrophisation. Ces algues ne sont pas utilisées et sont considérées comme un déchet. Le développement d'une application pour l'utilisation d'un tel déchet aurait une connotation très positive. Chaque année, les marées vertes en France produisent environ 60 000 tonnes d'*Ulva* spp humide, soit d'environ 8 000 tonnes en poids sec. Même si ce n'est pas une grande quantité, elles peuvent contribuer à la production de composés chimiques d'intérêt. Cependant, il peut être difficile de construire une activité industrielle fondée sur les déchets que tout le monde cherche à éradiquer.

La production de biomasse d'algues par la culture ne concerne que quelques genres : Laminaire, Porphyra, Undaria, Gracilaria, Eucheuma, Ulva et Chondrus. La quantité mondiale des algues récoltées a presque doublé au cours des 10 dernières années avec 14 millions de tonnes humides (FAO, 2006). Plus de la moitié, 7,4 millions de tonnes humides, sont des algues brunes, *Laminaria* spp, principalement et *L. japonica*. Le chiffre d'affaires de l'industrie mondiale a également augmenté, passant de US \$ 6,2 milliards en 1994 à US \$ 7,2 milliards en 2006. En Europe, la quantité d'algues cultivées est très faible, les entreprises ont essentiellement de très petites installations locales pour la culture des espèces de grande valeur. Les grandes installations de culture se situent dans les pays asiatiques (Chine, Philippines, Corée, Indonésie et Japon) et au Chili. Le principal obstacle au développement de l'aquaculture dans les pays européens est le coût du travail.

Des installations d'aquaculture en liaison avec les infrastructures off shore ont été étudiées<sup>126</sup>. L'étude a examiné la faisabilité de la culture en mer du Nord, en utilisant 1 000 km<sup>2</sup> sur une infrastructure de parc éolien offshore prévu en 2020. Elle a montré qu'un prix de revient entre 60 et 70 €/T sèche serait nécessaire pour que la biomasse algale soit compétitive financièrement dans la production de biogaz et d'électricité. Actuellement les laminaires récoltées en bateau dans les stocks naturels se négocient à 50 €/T fraîche, soit 170 €/T sèche. Elles servent principalement à la fabrication de produits industriels (hydrocolloïdes) qui se vendent entre 4 000 et 9 000 €/T. En Allemagne, les chercheurs ont réalisé des études techniques sur les nouvelles structures en mer pour la culture de *Latissima saccharina*. Une

---

<sup>124</sup> <http://www.ceva.fr>

<sup>125</sup> Blight, A. 2008. Methodology for the Quantitative Assessment of Ireland's Inshore Kelp Resource. Galway (GBR): *Marine Institute*.

<sup>126</sup> Reith, J.H., E.P. Deurwaarder, K. Hemmes, A.P.W.M. Curvers, P. Kamermans, W.A. Brandenburg, and G. Lettings. 2005. Bio-Offshore: Grootchalige teelt van zeewieren in combinatie met offshore windparken in de Noordzee. *ECN Energy Research Centre of the Netherlands*.

structure innovante en anneau flottant ancré aux turbines éoliennes en mer est proposée<sup>127</sup>. Le programme « Marine Biomass » des États-Unis a envisagé l'utilisation des algues. Le programme a été publié dans son intégralité<sup>128</sup>. La stratégie du programme américain « Marine Biomass » s'est ensuite portée sur *Laminaria* spp, qui pourrait se développer dans les eaux de l'Atlantique, et *Gracilaria* spp qui sont appropriées pour les eaux plus chaudes. Les priorités actuelles s'orientent vers les systèmes côtiers, réduisant ainsi de nombreux risques d'ingénierie liés au développement offshore.

#### 4.3.1.1. Macroalgues marines

Les macroalgues marines sont des composants essentiels des écosystèmes côtiers, riches d'une très grande diversité. Elles peuvent parfois constituer des couvertures denses et étendues et on parle par exemple de « forêts » de Laminaires. En Asie, les algues sont un aliment traditionnel. 70 % des quantités produites dans le monde le sont à des fins alimentaires (algues légumes). A l'inverse, en Europe et en Amérique, les algues sont d'abord une matière première industrielle.

De nos jours, le potentiel de la biomasse marine est de plus en plus considéré comme une opportunité pour la fabrication de produits industriels non-alimentaires, d'une part de par l'importance quantitative de cette ressource renouvelable car les océans occupent plus des trois quarts de la surface de notre planète, et d'autre part en intégrant le fait que la compétition avec la production vivrière est nettement moindre dans le cas des biomasses aquatiques que dans le cas de l'agriculture traditionnelle<sup>129</sup>.

Les végétaux marins et les algues en particulier représentent des gisements à fort potentiel. En conditions d'aquaculture, les algues ont un très haut rendement à l'hectare et n'obèrent pas la surface agricole terrestre utile. Des estimations montrent qu'il est possible de produire sept fois plus de biomasse algale par hectare que de biomasse céréalière, comparé à un champ de blé traditionnel (Tableau 23).

Tableau 23 : Productivités comparées d'algues et de plantes terrestres

espèces	technologie	productivité (t MS/ha/an)	commentaire	référence
Gracilaria ferox	continuous tank cultures	145	valeur moyenne expérience de 32 mois en Floride	Capo et al. (1999) J. Appl. Phycol. 11 : 143-147
Ulva lactuca	continuous tank cultures	73		Hirayama et al (2004) Appl. Biochem. Biotech. 112, 101-110
miscanthus	culture en champ	15 - 50		
blé	culture en champ	20		
colza	culture en champ	3,3		J-C Sourie et al. (2005) INRA Sciences Sociales n°2

Le rendement maximum d'un champ de macroalgues dans l'environnement naturel est de l'ordre de 50 T de matière sèche par hectare<sup>130</sup>. En conditions d'aquaculture intensive, ce rendement peut approcher les 150 T/ha/an, avec possibilité de produire tout au long de l'année. En 2005, cette

<sup>127</sup> Buck, B. H. 2007. Farming in a High Energy Environment: Potential and Constraints of Sustainable Offshore Aquaculture in the German Bight (North Sea) (published in : Berichte zur Polar- und Meeresforschung (=Reports on Polar and Marine Research), volume 543). Pp. 235 in *Faculty 2 of Biology & Chemistry*: University of Bremen.

<sup>128</sup> Chynoweth, D.P. 2002. Review of biomethane from marine biomass. Pp. 207. Bainsville: University of Florida, Department of Agricultural and Biological Engineering.

<sup>129</sup> Carlsson, A.S., J. Van Beilen, R. Möller, D. Clayton, and D. Bowles. 2007. Micro- and macro-algae utility for industrial applications. Outputs from the EPOBIO project. Newbury (GBR): CPL Press Science Publisher.

<sup>130</sup> Luning, K., and S. J. Pang. 2003. Mass cultivation of seaweeds: current aspects and approaches. *Journal of Applied Phycology* 15(2-3):115-19.

production récoltée était répartie en 7,8 millions de tonnes d'algues brunes (phéophycées), 4,8 millions de tonnes d'algues rouges (rhodophytes) et environ 13 000 tonnes d'algues vertes (chlorophytes) (IFREMER, 2006).

L'exploitation des algues marines à des fins commerciales se fait dans environ 35 pays, situés dans les deux hémisphères (FAO, 2007). Cependant, les premiers pays producteurs sont de loin les pays asiatiques (Chine, Philippines, Japon, Corées du Nord et du Sud, Indonésie). A eux six, ces pays représentent 90% de la production mondiale. Les algues brunes arrivent largement en tête des espèces récoltées dans le monde (Figure 12). En France, la récolte annuelle d'algues fraîches se situe en moyenne à 70 000 tonnes par an, dont 85 % sont destinés à l'industrie des colloïdes. L'industrie des algues présente une production très diversifiée, d'une valeur annuelle totale de 5,5 à 6 milliards de dollars US, dont 5 pour des produits alimentaires destinés à la consommation humaine. Le solde correspond pour une large part à des substances extraites d'algues marines, les hydrocolloïdes, le reste ayant des utilisations diverses et plus limitées, notamment comme engrais et ou additifs pour l'alimentation animale.

Ces végétaux aquatiques sont caractérisés par :

- La présence en abondance de polysaccharides matriciels originaux, intrinsèquement fonctionnalisés. Ces polysaccharides sont chargés (anioniques), carboxylés (alginates, ulvanes) ou/et sulfatés (carraghénanes, fucanes, ulvanes), non ou peu chargés (agars) et/ou pourvus de divers substituants : acétylés, pyruvates, etc. Ces compositions naturelles sont originales par rapport à celles des végétaux terrestres. Les applications potentielles qui en découlent sont décrites plus bas pour chaque groupe d'algue et type de constituants.
- La présence importante des pentoses qui peuvent avoir un intérêt dans le contexte de la chimie des furanes, mais qui présentent l'inconvénient d'une fermentation éthanolique difficile.
- La grande diversité des sucres constitutifs, avec des molécules intéressantes pour la chimie fine : L-rhamnose, L-fucose, acide iduronique (unique exemple dans le règne végétal), D-apiose (dans les phanérogames marines).

#### 4.3.1.1.1. Phéophycées (algues brunes)

Espèces de France métropolitaine : Laminaires, *Ascophyllum*, *Fucus*, *Undaria* (sp. introduite), *Ectocarpus*. Espèces des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF) : *Macrocystis*, *Durvillaea*

Constituants d'intérêt :

**Les Alginates** sont des polysaccharides extraits surtout des laminaires et des *Macrocystis* (Kelps) et secondairement des Fucales : Il s'agit de polymères linéaires d'acide guluronique et d'acide mannuronique utilisés en agroalimentaire et en industrie pour leurs propriétés gélifiantes et leur viscosité.

**La Laminarine** est un polymère de  $\beta$ 1-3 glucose principalement extraite de l'algue brune *Laminaria digitata* et utilisée pour stimuler les défenses naturelles des plantes cultivées (blé, vigne, pommier)<sup>131</sup> (Brevet n° FR 98/47375 Laboratoires Goëmar 1998. Procédé pour la potentialisation et la stimulation des défenses naturelles des plantes, lodus 40).

**Les Fucanes** (*Ascophyllum*, Fucales, Laminaires) sont des polysaccharides complexes et ramifiés dont la structure et les relations structure/propriétés sont encore mal connues.

---

<sup>131</sup> Klarzynski, O. 2000. Edited by Laboratoires Goëmar. France.

Ils peuvent constituer des actifs en cosmétique et sont aussi utilisés pour leurs propriétés d'anticoagulants. Les fucanes sont commercialisés en Asie (inscrits sur liste positive FOSHU) en tant que complément alimentaire pour la protection des muqueuses gastriques et la prévention de l'ulcère gastrique (empêche la fixation d'*Helicobacter pilori*). Ils peuvent aussi servir à la production d'oligosaccharides chargés (sulfatés) actifs qui peuvent mimer les Glycosaminoglycanes (GAG) de la matrice extracellulaire ou pour d'autres applications en cosmétique et nutraceutique.

**Les Phlorotannins** sont des polyphénols qui constituent une famille de composés de type polyphényléther hyperramifiés que l'on ne retrouve dans aucune autre classe du règne végétal. Leur particularité réside dans le fait qu'ils dérivent de la polymérisation en 3D d'un monomère unique : le phloroglucinol<sup>132</sup> (Figure 14). Pour cette raison, on les désigne sous la dénomination générique de « phlorotannins ». En fonction du type d'enchaînements présents dans le polymère (aryl-aryl ou aryl-éther), on peut regrouper les phlorotannins en plusieurs familles<sup>133</sup> dont quelques exemples sont listés ci-après :

- Les **fucols** composés de monomères de phloroglucinols reliés par des liaisons aryl-aryl ;
- Les **phloréthols** qui présentent uniquement des liaisons aryléthers résultant d'un couplage radicalaire C-O entre phloroglucinols. Ces liaisons se font para, ortho ou méta ;
- Les **éckols**, que l'on retrouve dans deux genres de laminariales. Ce sont des phloréthols particuliers dans lesquels il y a eu des cyclisations intramoléculaires ;
- Les **fucophloréthols**, largement répandus dans les algues brunes. Ce sont des enchaînements hybrides fucol/phloréthol constitués de nombreux monomères de phloroglucinols rattachés à la fois par des liaisons aryl-aryl et par des liaisons aryl-éther.

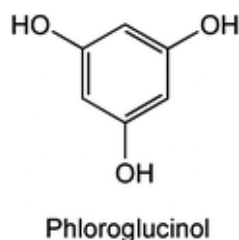


Figure 14 : structure chimique de l'unité phloroglucinol.

Les phlorotannins peuvent présenter des masses moléculaires variant entre 400 à 400 000 Da. On peut assimiler les tannins d'algues à des oligomères de lignine. Ce faible degré de condensation des tannins d'algues les rend facilement solubles et extractibles à l'aide de mélanges de solvants hydroalcooliques. Ceci présente l'avantage de ne pas nécessiter de procédés dénaturants comme c'est le cas par exemple pour la lignine. Cette solubilité est un avantage pour de potentielles applications en milieu dissous ou dispersé (colles, vernis). Les enchaînements aryl-aryl et aryl-éther présents dans les phlorotannins sont extrêmement stables d'un point de vue chimique et biochimique. Cette stabilité est d'ailleurs une difficulté pour l'étude structurale des polyphénols d'algues car ceux-ci, à la différence de leurs cousins issus de végétaux terrestres, sont 100 % résistants aux attaques hydrolytiques acides ou basiques. Bien que différents des tannins issus de végétaux terrestres (galliques et condensés), les phlorotannins possèdent des activités biologiques comparables. Chez les algues brunes, les

<sup>132</sup> Ragan, M. A., and J. S. Craigie. 1976. Physodes and phenolic compounds of brown-algae isolation and characterization of phloroglucinol polymers from *Fucus vesiculosus* L. *Canadian Journal of Biochemistry* 54(1):66-73.

<sup>133</sup> Parys, S., Rosenbaum, A., Kehraus S. et al. 2007. Evaluation of quantitative methods for the determination of polyphenols in algal extracts. *Journal of Natural Products* 70 (12) :1865-1870.

polyphénols de bas poids moléculaires ont des propriétés antifongiques, antivirales, antibiotiques et anti-algales<sup>134</sup>. D'autres études relatent une toxicité des phlorotannins vis à vis de divers animaux marins<sup>135</sup>. Ici aussi, ces propriétés peuvent être considérées comme avantageuses au regard de la stabilité aux agressions biologiques requise pour des applications de type matériaux.

Certaines algues brunes et en particulier les Laminaires ont la capacité de concentrer l'iode de l'eau de mer jusqu'à 30 000 fois et ont d'ailleurs été traditionnellement exploitées en Bretagne pour produire de l'iode. Ces algues possèdent également des enzymes très originales, les haloperoxydases à vanadium, qui catalysent l'oxydation de différents halogénures (iodure, bromure et chlorure) et peuvent former différents intermédiaires halogénés. Ces haloperoxydases peuvent aussi catalyser le pontage oxydatif des polyphénols qui renforce la cohésion des gels d'alginate et cette propriété pourrait avoir des débouchés dans la fabrication de colles pour l'aquaculture par exemple.

La fermentation des algues brunes pour produire du bioéthanol et/ou biobutanol est de plus en plus souvent évoquée par exemple dans le cas d'exploitation de champs d'algues au pied d'éoliennes implantées en infralittoral ou en offshore. Certaines difficultés techniques sont à surmonter pour raisonnablement envisager cette application, telles que l'hydrolyse des polysaccharides et le problème de la fermentation des pentoses en présence de polyphénols.

#### Données de génomique :

***Ectocarpus siliculosus*** : Il s'agit d'une espèce modèle dont le génome (240 Mpb)<sup>136,137</sup> a été entièrement séquencé par le Genoscope et dont l'analyse est achevée. En parallèle, des outils de génétique et de génomique fonctionnelle ont été développés ou sont en cours de développement (91 000 EST ; carte génétique, transformation, tilling, protéomique ; etc.). *Ectocarpus* pourrait jouer le même rôle d'espèce modèle de référence pour les algues brunes qu'*Arabidopsis* chez les plantes supérieures.

***Laminaria digitata*** : taille de génome 640 Mpb 3 000 EST disponibles<sup>138,139</sup>

**Fucales** : quelques milliers d'EST ont été produites pour l'espèce *Fucus serratus* qui possède un génome de taille importante (1095 Mpb)<sup>140</sup> mais ne sont pas publiques pour l'instant (Communication personnelles de G. Pearson, CCMAR, Faro, Portugal)

#### 4.3.1.1.2. Algues rouges (*Rhodoplantae*)

<sup>134</sup> Seshadri, R., Sieburth J.M., 1975. *Marine Biology* 30(2):105-117.

<sup>135</sup> Parys, S., Rosenbaum, A., Kehraus S. et al. 2007. Evaluation of quantitative methods for the determination of polyphenols in algal extracts. *Journal of Natural Products* 70 (12):1865-1870.

<sup>136</sup> Charrier, B., S. M. Coelho, A. Le Bail, T. Tonon, G. Michel, P. Potin, B. Kloareg, C. Boyen, A. F. Peters, and J. M. Cock. 2008. Development and physiology of the brown alga *Ectocarpus siliculosus*: two centuries of research. *New Phytologist* 177(2):319-32.

<sup>137</sup> Cock, J.M., Sterck L., Rouze P. et al., 2010. The *Ectocarpus* genome and the independent evolution of multicellularity in brown algae. *Nature* 465(7298):617-621.

<sup>138</sup> Crepineau, F., T. Roscoe, R. Kaas, B. Kloareg, and C. Boyen. 2000. Characterisation of complementary DNAs from the expressed sequence tag analysis of life cycle stages of *Laminaria digitata* (Phaeophyceae). *Plant Molecular Biology* 43(4):503-13.

<sup>139</sup> Roeder, V., J. Collen, S. Rousvoal, E. Corre, C. Leblanc, and C. Boyen. 2005. Identification of stress gene transcripts in *Laminaria digitata* (Phaeophyceae) protoplast cultures by expressed sequence tag analysis. *Journal of Phycology* 41(6):1227-35.

<sup>140</sup> Peters, A.F., Marie, D., Scornet D. et al., 2004. Proposal of *Ectocarpus siliculosus* (Ectocarpales, Phaeophyceae) as a model organism for brown algal genetics and genomics. *Journal of Phycology* 40(6):1079-1088.

Fonctions d'usage :

- Les carraghénanes et les agars sont des galactanes plus ou moins sulfatés extraits de la paroi de certaines algues rouges. Exploités sous forme brute et semi-raffinée, ils sont utilisés pour des applications de texturation des produits alimentaires et autres formulations nécessitant une gestion de la viscosité, voire de la prise en gel.
- Présence de phénols et oligophénols halogénés (chlorés, bromés, iodés) naturellement biocides (par exemple extrait d'*Asparagopsis* d'« Algues et Mer » vendu comme conservateur cosmétique)
- Présence de xylanes dans *Palmaria*.
- Les fibres de gracilaire sont adaptées à la production de papier.

**Données de génomique :**

***Chondrus crispus*** : génome (~110 Mpb) séquencé au Genoscope et environ 300 000 EST sont disponibles<sup>141</sup>

***Porphyra umbilicalis*** : génome en cours de séquençage au JGI (<http://www.jgi.doe.gov/genome-projects/>).

***Porphyra yezoensis*** : (~20 000EST Japon<sup>142,143</sup>)

***Gracilaria tenuistipitata*** : (3 000 ESTs, J. Collen, Communication personnelle)

---

<sup>141</sup> Collen, J., V. Roeder, S. Rousvoal, O. Collin, B. Kloareg, and C. Boyen. 2006. An expressed sequence tag analysis of thallus and regenerating protoplasts of *Chondrus crispus* (Gigartinales, Rhodophyceae). *Journal of Phycology* 42(1):104-12.

<sup>142</sup> Nikaido, I., Asamizu, E., Nakajima M. et al., 2000. Generation of 10,154 expressed sequence tags from a leafy gametophyte of a marine red alga, *Porphyra yezoensis*. *DNA Research* 7():223-227.

<sup>143</sup> Asamizu, E., M. Nakajima, Y. Kitade, N. Saga, Y. Nakamura, and S. Tabata. 2003. "Comparison of RNA expression profiles between the two generations of *Porphyra yezoensis* (Rhodophyta), based on expressed sequence tag frequency analysis. *Journal of Phycology* 39(5):923-30.



Tableau 24 : analyse SWOT appliquée à l'utilisation des macroalgues brunes et rouges pour des usages en chimie verte et bioénergies

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques des macroalgues brunes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polyélectrolytes de type polysaccharides, dont certains sont sulfatés</li> <li>• Oligosaccharides aux propriétés biologiques</li> <li>• Métabolites II (polyphénols, terpènes, pigments)</li> <li>• Sucres rares (fucose, ac. guluronique)</li> <li>• Voies métaboliques originales (halogénées par ex)</li> <li>• Disponibilité d'enzymes d'intérêt pour la biosynthèse et la bioconversion</li> <li>• Pas de lignine chez algues brunes mais récemment découverte chez les rouges</li> <li>• Présence de polyphénols hydrosolubles « oligolignol-like»</li> <li>• Disponibilité de données génomiques</li> <li>• Productivité élevée en biomasse, en eau de mer</li> <li>• Maîtrise du stock sauvage, soumis à la cueillette</li> <li>• Connaissance sur la culture des macroalgues (Asie du Sud Est)</li> <li>• Bonne aptitude au stockage de la matière première</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Accès à la ressource limité : ressource récoltée et non cultivée (en France)</li> <li>• Manque de connaissance sur la chimie fine des polyphénols</li> <li>• Manque de connaissance sur la chimie des constituants complexes de la paroi des algues brunes, limitant la valorisation intégrale de la ressource</li> <li>• Accumulation des métaux lourds</li> <li>• Sensibilité aux pathogènes</li> <li>• Teneur en eau élevée</li> <li>• Transformation génétique non maîtrisée à ce jour</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besoin de bioremédiation</li> <li>• Préoccupations environnementales favorables à la valorisation des produits de la mer (biodiversité)</li> <li>• Demande en produits bio-sourcés, bioactifs</li> <li>• Biologie synthétique, hémisynthèse</li> <li>• Pression sur la ressource en eau douce et concurrence pour l'usage du sol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conflit d'usage / espaces marins</li> <li>• Filière non organisée en France – faible niveau de mécanisation</li> <li>• Peu de R&amp;D dans le domaine des algues</li> <li>• Modifications climatiques</li> </ul>

Remarque: pas de connaissance précise sur la propriété industrielle

#### 4.3.1.1.3. Algues vertes

Genre principal = *Ulva* (ulve, entéromorphe). *Ulva* est une algue proliférante liée aux problèmes d'eutrophisation côtière et la responsable du phénomène des marées vertes. C'est une algue à croissance très rapide, à reproduction végétative et à croissance en mode non fixé. Elle vit en suspension dans la colonne d'eau. *Ulva* est un très bon candidat pour l'épuration d'effluents chargés en nutriments azotés et phosphatés.

Fonctions d'usage :

- Les **ulvanes** sont des polysaccharides sulfatés et carboxylés complexes dont les structures commencent à être précisées. Pour certaines structures, des applications comme texturant et gélifiant

sont envisageables mais non encore exploitées. Les polysaccharides sulfatés ont des propriétés connues en modulation de l'immunité. Ils interagissent avec les sites des membranes cellulaires et peuvent donc bloquer l'adhésion des bactéries, des virus ou de certains médiateurs chimiques. Ces propriétés ont été explorées chez les fucanes, polysaccharides sulfatés d'algues brunes. Elles restent à explorer en détail pour les ulvanes.

- Le **rhamnose** est un monomère sulfaté particulier qui est utilisé dans la chimie des arômes et la protection cellulaire.
- L'**acide iduronique** est un acide uronique présent chez les ulves qui a des applications dans l'hémisynthèse de l'héparine.
- Présence de métabolites soufrés particuliers, la DMPT (Dimethyl-beta-propiothetin) ou la DMSP (dimethylsulfonylpropionate). Il s'agit de métabolites soufrés sous forme réduite, utilisés par l'algue comme molécule de défense : DMPT → DMS + Acide Acrylique.
- Facteurs d'appétance pour les poissons (indicateurs de broûteurs).
- Il est possible de produire de l'amidon dans les algues vertes. Avec nos connaissances actuelles, la quantité d'amidon produite reste faible, mais peut faire l'objet d'une valorisation en tant que co-produit. Pour des applications industrielles, l'intérêt général d'une production sans surface agricole vivrière et sans eau douce peut présenter un intérêt. L'amélioration des rendements de production naturels est probablement possible.
- Présence de cellulose hautement cristalline, sans lignine, dans *Cladophora*. La production de papier est possible. L'utilisation en formulation galénique d'actifs pharmaceutiques a été décrite avec l'avantage d'une grande surface de contact offerte par la géométrie des cristaux de cellulose.
- Les ulves sont riches en acides aminés, majoritairement glutamate et aspartate et contiennent des acides aminés soufrés intéressants en alimentation animale pour le fourrage

#### **Données de génomique :**

**Ulves** : environ 2000 EST disponibles<sup>144</sup>.

---

<sup>144</sup> Stanley, M. S., R. M. Perry, and J. A. Callow. 2005. Analysis of expressed sequence tags from the green alga *Ulva linza* (Chlorophyta). *Ibid.*41(6):1219-26.

Tableau 25 : Analyse SWOT appliquée à l'utilisation des macro-algues vertes pour des usages en chimie verte et bioénergies

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques des macroalgues vertes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polyélectrolytes de type polysaccharides, dont certains sont sulfatés</li> <li>• Oligosaccharides aux propriétés biologiques</li> <li>• Métabolites II (DMSP, pigments)</li> <li>• Production d'amidon en culture sous stress (30 % sec)</li> <li>• Sucres rares (rhamnose, acide iduronique)</li> <li>• Voies métaboliques originales (soufrées)</li> <li>• Disponibilité d'enzymes d'intérêt pour la biosynthèse et la bioconversion</li> <li>• Pas de lignine chez algues vertes</li> <li>• Forte teneur en cellulose chez certaines espèces (80% chez <i>Valonia sp.</i>, 15% chez <i>Cladophora sp.</i>)</li> <li>• Productivité élevée en biomasse (100 T sèche /ha/an en conditions réelles de production industrielle)</li> <li>• Production en eau de mer</li> <li>• Stock d'algues vertes échouées important (&gt; 10 M T fraîche mondial)</li> <li>• Connaissance sur la culture des macroalgues (Asie du Sud Est, Chili, Israel, ...) notamment en système intégré.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Accès à une ressource de qualité limité : ressource récoltée et non cultivée (en France)</li> <li>• Manque de connaissance sur la chimie des constituants complexes de la paroi, limitant la valorisation intégrale de la ressource</li> <li>• Sensibilité aux pathogènes</li> <li>• Teneur en eau élevée</li> <li>• Transformation génétique non maîtrisée à ce jour</li> <li>• Stockage nécessitant un procédé de stabilisation</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilité d'application en bioremédiation</li> <li>• Préoccupations environnementales favorables à la valorisation des produits de la mer (biodiversité)</li> <li>• Demande en produits bio-sourcés, bioactifs</li> <li>• Biologie synthétique, nouveaux intermédiaires (sucres et composés soufrés)</li> <li>• Pression sur la ressource en eau douce et concurrence pour l'usage du sol</li> <li>• Nouveaux texturants</li> <li>• Nouvelle source de fibres cellulosique alternative au bois/coton</li> <li>• Ressource disponible mondialement (en zone littorale)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conflit d'usage / espaces marins</li> <li>• Filière non organisée en France – pas de mécanisation</li> <li>• Peu de R&amp;D dans le domaine des algues</li> </ul>

### Questions de Recherche pour les macro-algues

- Réfléchir à une approche intégrée, pluridisciplinaire, sur la question des systèmes de culture des macroalgues en France : comment améliorer l'accès à la ressource ?
  - Faisabilité de la mécanisation de la culture.
  - Faisabilité technico-économique de la culture des macroalgues.
  - Amélioration de la résistance aux pathogènes.
  - Maîtrise du cycle de reproduction des macroalgues (écloserie, collection de ressources biologiques).
  - Analyse des impacts environnementaux des systèmes de production de macroalgues.
  - Garantir la traçabilité des souches utilisées en aquaculture.
  - Programmes de génotypage pour la sélection assistée par marqueurs.

- Améliorer les connaissances des voies métaboliques et des enzymes originales (biosynthèse et dégradation), qu'elles soient endogènes ou isolées des microflores associées aux macroalgues (exploiter la disponibilité d'enzymes d'intérêt pour des applications en biologie synthétique) pour :
  - La modulation fine de la structure des polysaccharides et donc des propriétés physicochimiques.
  - La production de nouveaux oligosaccharides (actifs biologiques).
  - Le traitement de la biomasse en vue de conversions chimiques ou biotechnologiques ultérieures (fermentation vers bioénergie, préparation d'intermédiaires et de building blocks pour la chimie fine).
- Dans le cas des enzymes endogènes, le défi est double. Il faut identifier d'une part les gènes qui n'ont aucun homologue connu pour la plupart dans les génomes récemment séquencés d'algues brunes et rouges, et ceci peut se faire par des approches de bioinformatique ou d'annotation du génome par protéomique et il est nécessaire d'autre part de conduire des analyses biochimiques ciblées pour valider la fonction ou l'activité des enzymes.
- Améliorer les connaissances sur les polysaccharides :
  - Résoudre la structure de certains polysaccharides complexes (disposer d'outil de séquençage rapides, de banques de données structure/fonction).
  - Identifier des nouveaux procédés d'hydrolyse.
  - Résoudre le problème de la fermentation des pentoses en présence de polyphénols par des recherches notamment en microbiologie.
- Résoudre le problème de la fermentation des polysaccharides marins sulfatés par de nouvelles approches microbiologiques et biochimiques.
- Etudier les possibilités de prédiction des activités biologiques et fonctionnelles, par le biais d'approches de métabolomique et phénotypage à haut débit et de biologie structurale.
- Développer des outils d'analyse des polyphénols, approfondir les connaissances sur leurs voies de biosynthèse.

#### 4.3.1.2. Microalgues marines

Les microalgues représentent un groupe très divers de producteurs primaires qui sont présents dans la plupart des écosystèmes (marins, dulcicoles, déserts,...) et qui jouent un rôle primordial dans la fixation ou l'assimilation du carbone et dans la production d'oxygène. Elles recèlent une multitude de composés de hautes valeurs ajoutées pour l'industrie chimique, l'alimentation et la médecine (antibiotiques). Les cinq classes les plus importantes au moins en terme d'abondance sont : (i) les diatomées (*Bacillariophyceae*), algues qui dominent le phytoplancton dans les océans mais sont aussi présentes dans les eaux douces (environ 100 000 espèces). Elles stockent le carbone sous forme de lipides ou de polymères de glucose (chrysolaminarine); (ii) les algues vertes (*Chlorophyceae*) qui sont aussi très abondantes en particulier dans les eaux douces, leur principale réserve de carbone est l'amidon mais elles peuvent aussi produire des lipides dans certaines conditions; (iii) les algues bleues (*Cyanophyceae*) procaryotes photosynthétiques, qui jouent un rôle prépondérant dans la fixation de l'azote atmosphérique (environ 2 000 espèces); (iv) les *Chrysophyceae* qui sont voisines des diatomées (environ 1 000 espèces); (v) les haptophytes qui regroupent les coccolithophores.

Seules quelques espèces cependant ont fait l'objet d'études poussées et très peu ont été utilisées à des fins biotechnologiques contrairement aux macroalgues qui dans plusieurs pays sont utilisées comme sources de fibres, de minéraux, de vitamines et d'antioxydants. Le développement de cultures en bioréacteurs permet désormais d'envisager un plus grand champ d'applications. Un exemple est la production d'un pigment rouge (astaxanthine). Ce caroténoïde, présent chez les crustacés (crabes, crevettes, homards, écrevisses, langoustes) est produit de manière commerciale à partir de l'algue

verte *Haematococcus pluvialis*. Il est utilisé comme complément alimentaire en aquaculture. Les microalgues sont de plus de véritables sources d'acides gras polyinsaturés mais aussi d'oxylipines ou oxylipides qui outre des applications connues comme précurseurs de détergents, lubrifiants, plastiques biodégradables, ont aussi des propriétés pharmacologiques.

La grande diversité biologique qui existe chez les microalgues, répond sans doute à une exceptionnelle adaptabilité et laisse préjuger d'une richesse proportionnelle en molécules originales (lipides, protéines, sucres, métabolites, etc). De plus, le rendement des diatomées et chlorophycées est nettement supérieur à celui des plantes terrestres telles que le colza car ce sont des organismes unicellulaires et leur croissance en suspension dans un milieu aqueux leur permet un meilleur accès aux ressources : eau, CO<sub>2</sub> ou minéraux. En conditions de stress, leur production de lipides augmente et peut atteindre plus de 50% de la biomasse totale. C'est pour ces raisons que les algues microscopiques ont été décrites comme étant capables « de synthétiser 30 fois plus d'huile à l'hectare que les plantes terrestres oléagineuses utilisées pour la fabrication de biocarburants » (Tableau 26<sup>145</sup>). Il faut noter que les chiffres donnés dans ce tableau sont très optimistes, et s'ils correspondent à un potentiel théorique, d'une part, avec les souches disponibles actuellement, de fortes productivités en biomasse et de fortes teneurs en lipides sont souvent incompatibles (il s'agit là d'un axe de recherche majeur), et d'autre part la pratique de la culture à grande échelle au cours des dernières décennies indique que le maximum de productivité annuelle en biomasse à grande échelle se situe plutôt autour de 100T/ha. Une étude récente s'appuyant sur des données de terrain a ainsi estimé le potentiel de productivité en lipides des cultures de microalgues autour de 20T/ha en l'état actuel de la pratique, et évalué un optimum réaliste autour de 40T/ha<sup>146</sup>.

Tableau 26 : Comparaison de quelques sources de biodiesel

	Rendement Huile (L/ha)	Aire requise <sup>a</sup>	% d'aire cultivable USA <sup>a</sup>
<b>Maïs</b>	172	1540	846
<b>Soja</b>	446	594	326
<b>Jatropha</b>	1892	140	77
<b>Canola</b>	1190	223	122
<b>Noix de coco</b>	2639	99	54
<b>Huile de Palme</b>	5950	45	24
<b>Microalgues<sup>b</sup></b>	136900	2	1.1
<b>Microalgues<sup>c</sup></b>	58700	4.5	2.5

<sup>a</sup> pour satisfaire 50 % de la totalité du pétrole utilisé pour les transports aux USA

<sup>b</sup> 70% d'huile (wt) en biomasse

<sup>c</sup> 30% d'huile (wt) en biomasse

Les perspectives et le potentiel des microalgues comme usines cellulaires (production de molécules commerciales recombinantes) ont été abordés et traités par différents auteurs relativement récemment

<sup>145</sup> Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25(3):294-306.

<sup>146</sup> Rodolfi, L., G. C. Zittelli, N. Bassi, G. Padovani, N. Biondi, G. Bonini, and M. R. Tredici. 2009. Microalgae for Oil: Strain Selection, Induction of Lipid Synthesis and Outdoor Mass Cultivation in a Low-Cost Photobioreactor. *Biotechnology and Bioengineering* 102(1):100-12.

et de façon plus ou moins exhaustive<sup>147,148,149,150,151</sup>

Tableau 27 : analyse SWOT appliquée à l'utilisation des microalgues pour des usages en chimie verte et bioénergies

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques des microalgues vertes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oligosaccharides actifs</li> <li>• Métabolites II (pigments)</li> <li>• Production d'hydrogène</li> <li>• Forte teneur en lipides poly-insaturés</li> <li>• Voies métaboliques originales (terpénoïdes longs par ex)</li> <li>• Disponibilité d'enzymes d'intérêt pour la biosynthèse et la bioconversion</li> <li>• Productivité élevée en biomasse</li> <li>• Homogénéité du matériel biologique</li> <li>• Disponibilité de données génomiques</li> <li>• Transformation génétique – usine cellulaire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Production des lipides et de l'hydrogène dans des conditions de stress</li> <li>• Coût d'infrastructure pour les systèmes intensifs</li> <li>• Pour les systèmes ouverts, microalgues diluées</li> <li>• Forte teneur en eau</li> <li>• Extraction des molécules d'intérêt</li> <li>• Manque de connaissance pour une valorisation intégrale de la ressource</li> <li>• Accumulation des métaux lourds</li> <li>• Sensibilité aux pathogènes et compétiteurs (en milieu ouvert)</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besoin de bioremédiation</li> <li>• Demande en produits bio-sourcés</li> <li>• Biologie synthétique</li> <li>• R&amp;D émergente sur les microalgues (transfert de connaissance possible d'une espèce à l'autre)</li> <li>• Complémentarité des usages (systèmes intégrés)</li> <li>• Limitation des émissions de CO<sub>2</sub> (capture de CO<sub>2</sub>)</li> <li>• Pression sur la ressource en eau douce et concurrence pour l'usage du sol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombreux brevets sur les enzymes de biosynthèse des acides gras et plus généralement stratégie de protection systématique des gènes d'intérêt dès qu'un génome est annoté</li> <li>• Filière non organisée en France</li> <li>• Domaine très spéculatif</li> </ul>

Certaines caractéristiques relevées dans le tableau d'analyse Swot peuvent être spécifiques à quelques espèces (ex microalgues oléagineuses vs productrices de polysaccharides) et ne peuvent être croisées directement avec des caractéristiques propres à d'autres espèces. Plusieurs questions de recherche communes émanent cependant :

- Besoin d'une compréhension au niveau moléculaire et génétique des éléments qui conduisent à une modification de la composition et de la quantité en lipides et protéines.
- Etablir les bases d'une modélisation prédictive pour orienter de manière optimale le métabolisme cellulaire vers la synthèse de composés d'intérêt.

<sup>147</sup> Franklin, S. E., and S. P. Mayfield. 2005. Recent developments in the production of human therapeutic proteins in eukaryotic algae. *Expert Opinion on Biological Therapy* 5(2):225-35.

<sup>148</sup> Leon-Banares, R., D. Gonzalez-Ballester, A. Galvan, and E. Fernandez. 2004. Transgenic microalgae as green cell-factories. *Trends in Biotechnology* 22(1):45-52.

<sup>149</sup> Stevens, D. R., and S. Purton. 1997. Genetic engineering of eukaryotic algae: Progress and prospects. *Journal of Phycology* 33(5):713-22.

<sup>150</sup> Walker, T. L., S. Purton, D. K. Becker, and C. Collet. 2005. Microalgae as bioreactors. *Plant Cell Reports* 24(11):629-41.

<sup>151</sup> Cadoret, J. P., M. Bardor, P. Lerouge, M. Cabiglier, V. Henriquez, and A. Carlier. 2008. Producing recombinant commercial proteins. *M S-Medecine Sciences* 24(4):375-82.

- Développement d'études environnementales portant sur l'adaptation de ces micro-organismes
- Etudes des mécanismes de réponse aux pathogènes en vue d'une culture intensive.

Pour chaque espèce de micro-algue des questions plus spécifiques sont mentionnées dans les paragraphes suivants.

#### 4.3.1.2.1. Les algues vertes

##### **Les chlorelles**

*Chlorella* est une algue verte unicellulaire (*Trebouxiophyceae*, *Chlorophyta*), formée de cellules rondes de 2 à 10 µm de diamètre. Les *Chlorella* sont haploïdes, asexuelles et typiquement contiennent un seul chloroplaste. On trouve dans ce genre des espèces vivant en milieu marin, dulcicole et sur la terre. Les chlorelles sont aujourd'hui, par exemple, des organismes modèles pour l'étude de l'interaction entre les virus et les algues. Le génome de deux souches de *Chlorella* a été séquencé, *Chlorella* sp. NC 64A ([http://genome.jgi-psf.org/ChINC64A\\_1/ChINC64A\\_1.home.html](http://genome.jgi-psf.org/ChINC64A_1/ChINC64A_1.home.html)) et *Chlorella vulgaris* C169 (<http://genome.jgi-psf.org/Chlvu1/Chlvu1.home.html>). Elles sont connues pour leur application en nutraceutique et en biotechnologie, où elles sont cultivées en bioréacteurs pour exprimer des gènes hétérologues. L'intérêt du genre *Chlorella* n'est pas l'originalité des molécules produites (caroténoïdes, lutéine, acides gras polyinsaturés, phospholipides et galactolipides) que l'on trouve dans tous les organismes photosynthétiques, mais la possibilité d'en produire des quantités importantes.

Plusieurs souches de *Chlorelles* sont d'excellents candidats à la production de biodiesel. En conditions optimales de croissance, les algues se développent vite et produisent des acides gras essentiellement des phospholipides et des galactolipides qui représentent environ 5-20 % de leur matière sèche. De nombreuses espèces sont aussi capables de produire de grandes quantités d'huile (triacylglycérols), 40-80 % de leur matière sèche en condition de stress. Cependant, ces stress (en nutriments) conduisent à une réduction de la synthèse protéique et de la croissance cellulaire qui par conséquent diminue le rendement en biomasse.

##### **Questions de Recherche plus spécifiques aux chlorelles**

Le métabolisme des lipides des *Chlorelles* semble sur la base de résultats préliminaires de séquences, être analogue à celui des plantes supérieures. Bien que certaines applications soient déjà développées à l'échelle industrielle, la production de triglycérides enrichis en acides gras omega-3 bénéficierait d'une meilleure compréhension du métabolisme de *Chlorella* au niveau génétique. Ce métabolisme peut être orienté par modifications des propriétés chimiques du milieu de culture, mais nécessiterait pour son optimisation une compréhension aux niveaux moléculaire et génétique des éléments qui conduisent à une modification de la composition et de la quantité en lipides.

##### ***Chlamydomonas reinhardtii***

L'algue verte unicellulaire, *Chlamydomonas reinhardtii* (*Chlorophyceae*, *Chlorophyta*) considérée comme une «levure verte» est un modèle de choix pour étudier de nombreux processus biologiques dont la photosynthèse ou la photo-production d'hydrogène. Son génome a été récemment séquencé (<http://www.chlamy.org>)<sup>152</sup>. Il existe des outils génétiques permettant de transformer aussi bien le génome nucléaire que celui du chloroplaste ou des mitochondries et de nombreux mutants sont disponibles. Cette algue peut être cultivée de façon auto et hétérotrophe en utilisant dans ce dernier cas

<sup>152</sup> Merchant, S.S., Prochnik S.E., Vallon O. et al., 2007. The *Chlamydomonas* genome reveals the evolution of key animal and plant functions. *Science* 318(5848):245-251.

de l'acétate comme source de carbone et elle possède un métabolisme fermentaire particulièrement diversifié. Actuellement, *C. reinhardtii* est une espèce phare en biotechnologie, avec la synthèse d'anticorps recombinants<sup>153</sup> et de vaccins, et pour la bioremédiation des sols pollués par des métaux lourds<sup>154</sup>. *Chlamydomonas reinhardtii* a été retenue comme espèce modèle pour développer une biologie des systèmes (projets GoForSys en Allemagne et Algomics en France) visant à intégrer par la modélisation les données de transcriptomique, protéomique, métabolomique/fluxomique en vue de la compréhension chez cet organisme du métabolisme photosynthétique et carboné. Le but ultime de ces approches intégratives est de se doter de concepts innovants (identification des régulateurs et des points de contrôle du métabolisme) et d'orienter le métabolisme, *via* des approches biotechnologiques, vers la synthèse de composés d'intérêt (hydrogène, amidon, lipides, protéines, métabolites à haute valeur ajoutée,...).

### Questions de Recherche plus spécifiques à *Chlamydomonas*

De par la versatilité de son métabolisme et la disponibilité d'outils génétiques variés, *Chlamydomonas reinhardtii* apparaît comme un des organismes modèles privilégiés pour explorer les potentialités des micro-organismes photosynthétiques pour des applications biotechnologiques dans différents domaines (nutraceutique, biocarburants, bioremédiation,...).

Développer des approches de biologie systémique visant à établir les bases d'une modélisation prédictive pour orienter de manière optimale le métabolisme cellulaire vers la synthèse de composés d'intérêt. *Chlamydomonas* représente ainsi un modèle expérimental permettant d'établir un lien entre les organismes unicellulaires hétérotrophes (bactéries, levures) et les plantes supérieures.

### *Ostreococcus*

*Ostreococcus* sp. (*Prasinophyceae*, *Chlorophyta*) est une algue verte eucaryote unicellulaire dont le diamètre est inférieur à 1  $\mu\text{m}$ . Les génomes de deux souches d'*Ostreococcus* ont été publiés et celui d'un troisième écotype est maintenant terminé. Les différentes espèces/souches d'*Ostreococcus* adaptées à différentes niches écologiques marines (forte/faible lumière; côtier/océanique) ainsi que les genres proches *Micromonas* et *Bathycoccus* en font des modèles de choix pour les études environnementales portant sur l'adaptation des micro-organismes photosynthétiques en milieu marin. Le cycle de vie de cette microalgue est connu, sa culture est bien maîtrisée et les cellules peuvent être transformées. Son métabolisme lipidique présente plusieurs caractéristiques intéressantes. *Ostreococcus* se prête aussi particulièrement bien au développement d'études de génomique des populations avec son petit génome et la possibilité d'isoler et de maintenir en culture relativement facilement de nombreuses souches. Par l'absence (ou forte réduction) des familles multigéniques et sa divergence à la base de la lignée verte, *Ostreococcus* est aussi un modèle intéressant pour certaines études de biologie cellulaire. Enfin, par l'absence de paroi ou thèque entourant la cellule, c'est un organisme potentiellement intéressant pour la production et l'excrétion de molécules d'intérêt en biotechnologie.

### Questions de Recherche plus spécifiques à *Ostreococcus*

- Développer des études environnementales.

<sup>153</sup> Mayfield, S. P., S. E. Franklin, and R. A. Lerner. 2003b. Expression and assembly of a fully active antibody in algae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100(2):438-42.

<sup>154</sup> Siripornadulsil, S., S. Traina, D. P. S. Verma, and R. T. Sayre. 2002. Molecular mechanisms of proline-mediated tolerance to toxic heavy metals in transgenic microalgae. *Plant Cell* 14(11):2837-47.



- Développer des études de biologie cellulaire.

#### 4.3.1.2.2. Haptophytes

L'embranchement eucaryote des Haptophyta inclut environ 500 espèces dans 50 genres, pour la plupart des flagellées photosynthétiques. Les haptophytes sont unicellulaires, appartiennent majoritairement au nanoplancton (cellules de 2 à 20 µm de diamètre) et représentent l'un des groupes clefs de producteurs primaires en milieu marin (côtier et plus particulièrement océanique<sup>155</sup>), tout en étant rares en eau douce. Les cellules d'haptophytes sont typiquement recouvertes d'une ou plusieurs couches d'écailles organiques minuscules. Dans la lignée la plus importante de cet embranchement, les coccolithophores, du carbonate de calcium est précipité sur ces écailles dans des vacuoles spécifiques avant d'être extrudés à la surface de la cellule. La fonction écologique de ces écailles calcifiées (les « coccolithes »), dont une multitude d'architectures extraordinaires existe, demeure inconnue. Par ailleurs à ce jour une espèce d'haptophytes présente des écailles de silice formées à partir d'un phénomène original (à la différence des diatomées) de silicification intracellulaire. Malgré leur taille réduite, les coccolithophores sont responsables pour la majorité de la calcification en milieu pélagique, un processus central du cycle de carbone entre les différents compartiments de la biosphère. En termes de potentialité d'exploitation pour la Bioremédiation, une caractéristique unique aux coccolithophores est le piégeage de carbone sous forme inorganique, non biodégradable, dans son exosquelette, ce qui constitue la seule source de séquestration strictement réversible du carbone.

Les lipides sont encore peu caractérisés chez les haptophytes, néanmoins certaines molécules originales ont été mises en évidence (ex : alcénones, des lipides à longues chaînes polyinsaturés très résistants et utilisés comme biomarqueurs en paléoclimatologie). Certains haptophytes non-calcifiés (notamment *Isochrysis galbana* et *Pavlova lutheri*) font partie du groupe restreint d'espèces de microalgues exploitées en aquaculture en tant que fourrage pour les invertébrés. Les haptophytes sont de gros producteurs de diméthylsulfide (DMS), une substance qui, une fois libéré dans l'atmosphère, influence le climat (formation de nuages et effet conséquent sur l'albédo<sup>156</sup>). Le DMS peut provoquer des migrations de poissons et par conséquent influencer les pêcheries. Par ailleurs, certaines variétés d'haptophytes produisent des ichtyotoxines.

La plupart des études sur les haptophytes ont été réalisées sur le coccolithophore *Emiliana huxleyi* et l'espèce non calcifiée *Phaeocystis sp.*. Le génome d'*Emiliana huxleyi* a été récemment publié (<http://genomeportal.jgi-psf.org/Emihu1/Emihu1.home.html>) et celui de *Phaeocystis* est en cours de séquençage.

Tableau 28 : analyse SWOT appliquée à l'utilisation des haptophytes pour des usages en chimie verte et bioénergies

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques des haptophytes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcification – piégeage de carbone inorganique</li> <li>• Voies métaboliques originales</li> <li>• Séquences de génomes disponibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manque de connaissances pour une valorisation intégrale de la ressource</li> <li>• Manque de connaissances fondamentales sur le processus de</li> </ul>

<sup>155</sup> Liu, G.L., Tang, D.L., Wang, S.F. *et al.*, 2009. Variations in the dominant algal bloom-forming species in the western South China Sea from 1993 to 2007. *African Journal of Marine Science* 31(3):373-380.

<sup>156</sup> Malin, G. 1997. Biological oceanography - Sulphur, climate and the microbial maze. *Nature* 387(6636):857-59.

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Productivité élevée</li> </ul>	calcification <ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible diversité génétique des variétés cultivées</li> <li>• Variétés toxiques</li> <li>• Transformation génétique non maîtrisée à ce jour</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitation des émissions de CO<sub>2</sub> (piégeage de CO<sub>2</sub>) / biocarburants</li> <li>• Nanostructures</li> <li>• Aquaculture (algues fourrage)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peu de R &amp; D</li> <li>• Acidification de l'océan</li> </ul>

### Question de Recherche spécifiques aux haptophytes :

- Compte tenu de l'importance écologique et des spécificités de bio-minéralisation des coccolithophores (forte capacité de piégeage de CO<sub>2</sub>), une meilleure appréhension des mécanismes physiologiques et génétiques de la calcification est indispensable.
- L'étude structurale des nombreux exemples d'exosquelettes biominéraux (calcite, silice) produits par les haptophytes présente de forts potentiels d'applications pour les biotechnologies (nanostructures, optique,...).
- De nombreuses études génétiques environnementales ont montré une importante diversité d'haptophytes qui restent non cultivés à ce jour. L'isolement et la caractérisation de souches est une condition nécessaire pour l'exploitation optimale de cette ressource.
- Recherche et caractérisation d'autres espèces d'haptophytes particulièrement adaptées pour une culture à grande échelle et exploitable en aquaculture et / ou production de biocarburants.

#### 4.3.1.3. Dinoflagellés

Ce groupe notamment connu pour la présence d'espèces produisant des toxines, ne présente pas d'indications sur l'utilisation potentielle de ce type d'organismes dans des applications entrant dans le cadre de l'ARP VegA.

#### 4.3.1.4. Les diatomées

Les diatomées (Bacillariophytes) sont des eucaryotes trouvés à la fois dans le milieu marin mais aussi dans les eaux douces qui sont responsables pour environ 20 % de la productivité primaire globale. Les génomes de deux diatomées marines sont accessibles, celui de *Thalassiosira pseudonana* (<http://genome.jgi-psf.org/Thaps3/Thaps3.home.html>) et de *Phaeodactylum tricornutum* (<http://genome.jgi-psf.org/Phatr2/Phatr2.home.html>). Dans les milieux dulcicoles, la diatomée la plus abondante est *Asterionella formosa* qui présente la spécificité en condition de stress osmotique de produire plus de sucres et d'aldéhydes insaturés, métabolites qui empêchent la prolifération cellulaire et constituent donc aussi un objet d'étude intéressant.

Les diatomées présentent une grande capacité à accumuler des lipides spécialement en conditions de stress, mais elles sont de plus munies d'une enveloppe de silice qui pourrait être exploitée dans le domaine des nanotechnologies<sup>157</sup>. Les valves des diatomées fossiles étant privées de cellulose sont aussi utilisées dans l'industrie et employées comme tripoli, poudre qui sert d'une part dans la fabrication

<sup>157</sup> Bradbury, 2004. Nature's nanotechnologists: Unveiling the secrets of diatoms. *Plos Biology* 2(10):1512-1515.

de patines, et d'autre part, telle quelle, pour polir finement le verre, la pierre et les métaux. En outre, la propagation de la lumière dans les frustules ou parois siliceuses des diatomées suit des lois bien définies de sorte qu'on pourrait les étudier dans le domaine des communications optiques et les utiliser pour réaliser des nanolasers par exemple. La silice des frustules peut en effet être transformée en composés ayant des propriétés électroniques ou optiques intéressantes<sup>158</sup>.

L'acide eicosapentanoïque (EPA) a déjà été extrait à partir de diatomées (17 to 40 mg/g matière sèche)<sup>159</sup> à une échelle semi-industrielle. Chez la diatomée *Phaeodactylum tricornutum*, l'EPA a été purifié à partir du monogalactosyl diglycéride MGDG avec un rendement de 84 %. Bien entendu, du fait de cette teneur élevée en lipides, les diatomées sont aussi sur les rangs dans la course aux « algocarburants » et certaines espèces sont très prometteuses<sup>160</sup>.

Tableau 29 : analyse SWOT appliquée à l'utilisation des diatomées pour des usages en chimie verte et bioénergies

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques des diatomées	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Présence d'une enveloppe de silice et absence de cellulose</li> <li>• Métabolites II (pigments et aldéhydes insaturés)</li> <li>• Forte teneur en lipides poly-insaturés</li> <li>• Voies métaboliques originales</li> <li>• Productivité élevée en biomasse</li> <li>• Disponibilité de données génomiques</li> <li>• Transformation génétique – usine cellulaire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Production des lipides dans des conditions de stress</li> <li>• Coût d'infrastructure pour les systèmes intensifs</li> <li>• Pour les systèmes ouverts, dilution</li> <li>• Extraction des molécules d'intérêt</li> <li>• Manque de connaissance pour une valorisation intégrale de la ressource</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demande en produits bio-sourcés</li> <li>• Biologie synthétique</li> <li>• R&amp;D émergente sur les diatomées (transfert de connaissance possible d'une espèce à l'autre)</li> <li>• Complémentarité des usages (systèmes intégrés)</li> <li>• Limitation des émissions de CO<sub>2</sub> (séquestration de CO<sub>2</sub>)</li> <li>• Concurrence pour l'usage du sol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modifications climatiques</li> </ul>

### Questions de Recherche spécifiques aux diatomées

- Approfondir les connaissances biochimiques du métabolisme en général et en particulier de la régulation et du contrôle des métabolismes du carbone et des lipides.
- Développer des connaissances afin d'optimiser leur culture et séquestrer le CO<sub>2</sub>.
- Étudier les mécanismes spécifiques de la fabrication de la paroi de silice et explorer l'utilisation

<sup>158</sup> Tang, Y., Coradin, T., 2008. A green route to silica nanoparticles with tunable size and structure. *Green Chemistry* 10(2):183-190.

<sup>159</sup> Belt, S.T., Masse, G., Allard, W.G. et al., 2003. Novel monocyclic sester- and triterpenoids from the marine diatom, *Rhizosolenia setigera*. *Tetrahedron Letters* 44(51):9103-9106

<sup>160</sup> Cadoret, J.P., and O. Bernard. 2008. La production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis. *Journal de la Société de Biologie* 202(3):201-11.

de ces systèmes pour la nanofabrication de structures hautement définies.

- Serait-il possible d'enrichir l'océan en fer pour stimuler la séquestration de CO<sub>2</sub> par les diatomées ?
- Etudier l'impact du changement climatique sur les populations de diatomées ?

#### 4.3.1.5. Rhodoplantae

D'un point de vue biotechnologique, les algues rouges unicellulaires ont été étudiées pour leurs exopolysaccharides, dans des applications diverses, en santé<sup>161</sup> ou pour l'industrie<sup>162</sup>.

La transformation au sein du chloroplaste a été réalisée chez l'algue rouge *Porphyridium* sp.. La technique utilisée pour introduire le marqueur de sélection dans les chloroplastes a été le bombardement de microparticules. Dans la transformation de *Porphyridium*, l'herbicide Sulfométuron de méthylène a été utilisé comme marqueur. L'enzyme cible de cet herbicide est l'enzyme biosynthétique acétohydroxyacide synthase. Chez les rhodophytes, cette enzyme qui est codée par le chloroplaste<sup>163</sup> a produit des transformants résistants à cet herbicide. Plus récemment<sup>164</sup> a rapporté aussi la transformation par électroporation au niveau nucléaire de l'algue rouge *Cyanidoschizon merolae*. Le génome de cette dernière a été entièrement séquencée (<http://merolae.biol.s.u-tokyo.ac.jp/>).

#### 4.3.1.6. Cyanobactéries

Les cyanobactéries (« algues bleues ») sont des organismes procaryotes photosynthétiques autotrophes. La plupart d'entre elles peuvent croître à partir de substrats minéraux jusqu'à des densités importantes sur des milieux enrichis en CO<sub>2</sub> ou sur des milieux alcalins, riches en bicarbonate.

Des cultures industrielles de cyanobactéries se sont développées essentiellement pour le marché des compléments nutritionnels, avec deux espèces principalement cultivées : *Spirulina* (*Arthrospira*) *platensis*, et *Aphanizomenon flos-aqua*. L'*Arthrospira* déshydratée (Spiruline) est couramment vendue sur le marché nutraceutique mais entre aussi dans la composition de compléments utilisés en cas de pénurie alimentaire, avec des ventes annuelles estimées à 40 million US \$. Elle constitue une source naturelle de nombreux composés comme le β-carotène et autres caroténoïdes, vitamines B, acide γ-linolénique, protéines, acides aminés essentiels et minéraux assimilables. Sa culture peut être réalisée en bassins ouverts, sans problème majeur de contamination car sa capacité à pousser dans des conditions très alcalines limite le développement de compétiteurs.

De nombreuses espèces de cyanobactéries sont connues pour produire des toxines, souvent des oligopeptides (microcystine, nodularine, etc.) ainsi que toute une palette de composés bioactifs pouvant être utiles à l'industrie pharmaceutique (antitumoraux, antiviraux, antifongiques, etc.<sup>165</sup>). Comme tous

<sup>161</sup> Matsui, M.S., Muizzuddin, N., Arad, S. *et al.*, 2003. Sulfated polysaccharides from red microalgae have antiinflammatory properties in vitro and in vivo. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 104(1):13-22.

<sup>162</sup> Gourdon, D., Q. Lin, E. Oroudjev, H. Hansma, Y. Golan, S. Arad, and J. Israelachvili. 2008. Adhesion and stable low friction provided by a subnanometer-thick monolayer of a natural polysaccharide. *Langmuir* 24(4):1534-40.

<sup>163</sup> Lapidot, M., D. Raveh, A. Sivan, S. Arad, and M. Shapira. 2002. Stable chloroplast transformation of the unicellular red alga *Porphyridium* species. *Plant Physiology* 129(1):7-12.

<sup>164</sup> Minoda, A., R. Sakagami, F. Yagisawa, T. Kuroiwa, and K. Tanaka. 2004. Improvement of culture conditions and evidence for nuclear transformation by homologous recombination in a red alga, *Cyanidoschyzon merolae* 10D. *Plant Cell Physiol* 45(6):667-71.

<sup>165</sup> Singh, S., B. N. Kate, and U. C. Banerjee. 2005. Bioactive compounds from cyanobacteria and microalgae: An overview. *Critical Reviews in Biotechnology* 25(3):73-95.

les organismes photosynthétiques, elles produisent une large gamme de pigments et d'antioxydants pouvant avoir des applications diverses.

Pour ce qui concerne les composés stockés en quantité importante, la plupart des espèces accumulent du glycogène comme principal polysaccharide de réserve. Celui-ci peut notamment être converti en éthanol-carburant, soit en utilisant les systèmes fermentaires de la cyanobactérie, soit en réalisant une fermentation « classique » de biomasse cyanobactérienne. Certaines cyanobactéries ont également été étudiées pour leurs capacités de production d'hydrogène (*Synechocystis* PCC6803, *Gloeocapsa alpicola*, *Nostoc punctiforme*, *Anabaena variabilis*, *Arthrospira maxima* entre autres). Les cyanobactéries n'accumulent pas ou peu de lipides de réserve susceptibles d'être aisément transformés en biocarburant. Il est à noter cependant la capacité de certaines espèces à synthétiser des acides gras à courtes chaînes (jusqu'à 50 % de C10 chez *Trichodesmium erythraeum* par exemple<sup>166</sup>).

Tableau 30 : analyse SWOT appliquée à l'utilisation des cyanobactéries pour des usages en chimie verte et bioénergies

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques des cyanobactéries	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Organismes procaryotes : recombinaison homologue (favorable à une approche de biologie synthétique)</li> <li>• Métabolites II (pigments, oligopeptides)</li> <li>• Production d'hydrogène/fixation d'<math>N_2</math></li> <li>• Voies métaboliques originales, métabolismes fermentaires</li> <li>• Disponibilité d'enzymes d'intérêt pour la biosynthèse et la bioconversion</li> <li>• Productivité élevée en biomasse</li> <li>• Homogénéité du matériel biologique</li> <li>• Disponibilité de données génomiques</li> <li>• Transformation génétique – usine cellulaire</li> <li>• Souches extrémophiles (alcalinité-peu de concurrence)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût d'infrastructure pour les systèmes intensifs</li> <li>• Pour les systèmes ouverts biomasse diluée</li> <li>• Forte teneur en eau</li> <li>• Extraction des molécules d'intérêt</li> <li>• Manque de connaissance pour une valorisation intégrale de la ressource</li> <li>• Sensibilité aux pathogènes, prédateurs et compétiteurs (en milieu ouvert) peu caractérisée</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besoin de bioremédiation</li> <li>• Demande en produits bio-sourcés</li> <li>• Biologie synthétique</li> <li>• R&amp;D émergente sur les cyanobactéries (transfert de connaissance possible d'une espèce à l'autre)</li> <li>• Complémentarité des usages (systèmes intégrés)</li> <li>• Limitation des émissions de <math>CO_2</math> (capture de <math>CO_2</math>)</li> <li>• Pression sur la ressource en eau douce et concurrence pour l'usage du sol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brevets : protection systématique des gènes d'intérêt dès qu'un génome est annoté</li> <li>• Filière non organisée en France</li> <li>• Domaine très spéculatif</li> </ul>

## Questions de recherche pour les Cyanobactéries

<sup>166</sup> Hu, Qiang, Milton Sommerfeld, Eric Jarvis, Maria Ghirardi, Matthew Posewitz, Michael Seibert, and Al Darzins. 2008. Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *Plant Journal* 54(4):621-39.

On retrouve ici un positionnement et donc des questions de recherche potentielles assez proches de celles que l'on a évoquées chez les microalgues vertes et les diatomées, avec quelques spécificités cependant :

- Le fait que ces organismes soient procaryotes ouvre des possibilités différentes en matière de transformation (recombinaison homologue) et pourrait également faciliter, du moins pour des souches unicellulaires, des approches du type évolution dirigée.
- Pour la même raison, ces organismes apparaissent comme des hôtes de choix pour le développement d'approches de biologie synthétique en vue de produire des substances d'intérêt.
- Existence de souches fixatrices d'azote : cela peut-il constituer un avantage spécifique dans certains systèmes de production ?
- Concernant la production de biocarburants, il semble que les voies hydrogène ou alcool soient les plus envisageables<sup>167</sup>, les cyanobactéries n'accumulant pas ou peu de lipides. Toutefois, il existe des souches de cyanobactéries produisant des acides gras à chaînes plus courtes que les microalgues eucaryotes : intérêt potentiel si cela peut être couplé à un métabolisme de stockage.
- Certaines cyanobactéries peuvent survivre dans des milieux extrêmes, parfois en entretenant ses caractéristiques (alcalinisation notamment) : il serait intéressant de mieux comprendre ces phénomènes qui peuvent permettre d'exclure d'éventuels compétiteurs et ont donc potentiellement des implications pratiques en matière de système de culture.

#### 4.3.1.7. Phanérogames Marines (plantes à fleurs)

Deux grandes familles de Phanérogames marines sont concernées ici, les Posidoniales que l'on trouve essentiellement sur le pourtour méditerranéen et les Zosteriales localisées sur les façades atlantique et de la Manche. Ces plantes contiennent des fibres de cellulose et de l'hémicellulose, qui présentent la particularité d'être des fibres creuses et leurs parois renferment des polysaccharides sulfatés intrinsèquement ignifugés. Elles présentent également des inclusions de silice qui pourraient être valorisées. Le genre Zostère contient des phénols particuliers : acide caféique, acide rosmarinique et acide zostérique (phénol sulfaté à propriétés anti-adhésives, antifouling).

Fonctions d'usage :

- Utilisation du monométhylstannane (élastomère) extrait de *Zostera* comme agent de vulcanisation.
- Isolant riche en éléments minéraux et donc intrinsèquement ignifugé.
- Industrie du papier.
- Antiadhésifs (acide zostérique = antifouling).
- Utilisation de l'acide rosmarinique (molécule aromatique).
- Apporte des acides aminés soufrés intéressants en alimentation animale (fourrage).
- Support pour culture hydroponique (concurrence aux filières laine de roche et fibres de coco).

La culture de ces plantes se fait soit à partir de graines pour produire des semis, soit à partir de rhizomes pour faire du bouturage et coloniser les sols. Les zostères constituent des écosystèmes riches et fragiles. Il existait jusqu'aux années 1930 une industrie des zostères à partir de récolte d'échouage en Amérique du Nord mais elle a disparu suite à des problèmes de biomasse en baisse à cause d'un virus pathogène. Dans le bassin d'Arcachon, 5 000t/an de matière sèche sont récoltées (échouages) pour l'industrie du papier et la valorisation des co-produits.

---

<sup>167</sup> Angermayr, S. Andreas, Klaas J. Hellingwerf, Peter Lindblad, and M. Joost Teixeira de Mattos. 2009. Energy biotechnology with cyanobacteria. *Current Opinion in Biotechnology* 20(3):257-63.

Il y a donc de la place pour des projets de restauration des écosystèmes : intérêt des Posidonies et Zostères pour la restauration des zones de frayères à poissons (zones protégées par exemple). Ces plantes peuvent fixer l'azote et on peut envisager le développement de projet d'élimination des algues vertes et de restauration d'herbiers à zostères dans un contexte de compétition pour l'accès à la lumière entre les ulves de surface (écran) et les herbiers du sol marin.

### Ressources génomiques :

*Zostera marina* + *Posidonia oceanica*, collections d'environ 15 000 EST

<http://drzompo.uni-muenster.de/>

Génome de *Z. marina* en attente de séquençage au JGI ([www.jgi.doe.gov/genome-projects/](http://www.jgi.doe.gov/genome-projects/))

Tableau 31 : analyse SWOT appliquée à l'utilisation des phanérogames marines pour des usages en chimie verte et bioénergies

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques des Phanérogames marines	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polyélectrolytes de type polysaccharides aux propriétés associatives, oligosaccharides aux propriétés biologiques.</li> <li>• Métabolites II (phénols sulfatés)</li> <li>• Fibres cellulosiques creuses, pas de lignine</li> <li>• Très riche en silicates et autres minéraux</li> <li>• Non propagateur de flamme</li> <li>• Imputrescible</li> <li>• Sucre rare (apiose)</li> <li>• Disponibilité de données génomiques</li> <li>• Production en eau de mer</li> <li>• Capacité de fixation en azote dans les rhizomes</li> <li>• Récoltes par échouage</li> <li>• Stockage facile sans traitement de stabilisation</li> <li>• Connaissances sur la culture</li> <li>• Plante à graines</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Accès à la ressource limité : échouages</li> <li>• Manque de connaissance sur les interactions entre constituants de la plante.</li> <li>• Accumulation des métaux lourds</li> <li>• Sensibilité aux pathogènes</li> <li>• Transformation génétique non maîtrisée à ce jour</li> <li>• Pas de filière produit existante</li> <li>• Croissance lente</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besoin de bioremédiation et restauration de l'environnement</li> <li>• Préoccupations environnementales favorables à la valorisation des produits de la mer (biodiversité)</li> <li>• Matériau isolant (imputrescible, non propagateur de feu)</li> <li>• Support de culture hors sol (remplacement laine de roche)</li> <li>• Application phytosanitaire</li> <li>• Application antifouling</li> <li>• Biologie synthétique en amont des hémisynthèses</li> <li>• Pression sur la ressource en eau douce et concurrence pour l'usage du sol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conflit d'usage/espaces marins</li> <li>• Filière non organisée en France</li> <li>• Peu de R&amp;D dans le domaine des phanérogames marines</li> <li>• Modifications climatiques</li> <li>• Sensible à la pollution côtière</li> <li>• Sensible aux maladies virales</li> </ul>

### 4.3.2. Plantes

A partir d'une liste de plantes certainement non exhaustive, Alfa, Bambous, Baumier du Pérou, *Brachypodium*, Canne à sucre sauvage (*Saccharum spontaneum*), Canne de Provence, Chanvre de

Manille, Crambre d'Abyssinie, Cuphéa, Euphorbe, Genêt, Guta-percha, Guayule, Jacinthe d'eau, Jojoba, *Jatropha*, Kenaf, Lentille d'eau, *Miscanthus*, Orties, *Panicum*, *Phalaris*, *Phragmites*, *Psychotria*, **Jatropha, Jojoba, Cuphea et Crambe ont été plus particulièrement envisagés pour la production de lipides et *Miscanthus* et Switchgrass pour la lignocellulose.**

Des « espèces dédiées » à ces nouveaux usages : le *Miscanthus* apparaît comme la plante emblématique de l'utilisation de la biomasse. Les rhizomes se plantent au printemps, tous les 80 cm, à raison de 15 000 pieds/ha et 0,15   le rhizome. En trois ans, les plantes peuvent atteindre 2,5 à 3 m de haut et ont colonisé tout l'espace. L'autre plante vedette est switchgrass (ou panic érigé) qui est une graminée, dont la pérennité serait de 10 à 15 ans et qui mesure 1,5 à 1,8 m de haut. La plante est intéressante pour sa tolérance hydrique et a un pouvoir germinatif très faible (environ 50 %). La plante croit au printemps et en été. L'utilisation de cette biomasse requiert toutefois la disponibilité de procédés de conversion de la lignocellulose opérationnels jusqu'à la gestion des coproduits de transformation.

#### 4.3.2.1. *Jatropha curcas* L.

Le *Jatropha* est un arbuste de la famille des euphorbiacées originaire d'Amérique centrale<sup>168</sup> et/ou d'Amérique du Sud<sup>169,170</sup>. Il était principalement utilisé en médecine traditionnelle : ses graines pour des purges (en grec : iatros=docteur et tropha=nourriture), ou son latex comme onguent pour les plaies<sup>171</sup>. Son implantation sur le continent africain *via* les îles du Cap Vert par les portugais a permis sa diffusion d'abord en Afrique et ensuite en Asie où sa plantation sous forme de haies vives s'est fortement développée. Toutefois son odeur désagréable et surtout les produits toxiques que contiennent ses parties aériennes l'empêchaient d'être consommé par les animaux<sup>172</sup>. La forte teneur en huile des graines, entre 30 et 40 %, et sa résistance à un environnement difficile ont poussé les portugais du Cap Vert à en développer la culture dans des conditions semi extensives<sup>173</sup>. Ainsi on comptait environ 8 000 ha de *Jatropha* au Cap Vert en 1932 soit un sixième des cultures des îlots avec des rendements variables, entre 200 et 800 kg de graines à l'ha en fonction de la pluviométrie<sup>174</sup>.

La propagation du *Jatropha* a été le sujet le plus étudié et l'on dispose aujourd'hui d'informations conséquentes sur les différentes méthodes, leurs avantages et leurs inconvénients<sup>175,176,177</sup>. *Jatropha*

<sup>168</sup> Adam, Jean. 1953. *Les plantes à matière grasse. 4, Le ricin, le pourghère*. Paris: Société d'Editions G ographiques.

<sup>169</sup> Berry, E.W. 1929. An eogene tropical forest in the Peruvian desert. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 15:345-46.

<sup>170</sup> Carels, N. 2009. *Jatropha curcas*: A Review. Pp. 39-86 in *Advances in Botanical Research*. London: Academic Press Ltd.

<sup>171</sup> Grimm, C., Guharay, H. 1997. Potential of entomopathogenous fungi for biological control of true bugs in *J. Curcas* plantations in Nicaragua. *Biofuels and Industrial Products from Jatropha curcas, Nicaragua*, 7 p.

<sup>172</sup> Grimm, C., Maes, J.M., 1997. Arthropod Fauna Associated with *Jatropha curcas* L in Nicaragua, A Synopsis of Species, their biology and Pest Status. *Biofuels and Industrial Products from Jatropha curcas, Nicaragua*, 9 p.

<sup>173</sup> Avila, J., and Coulard. 1949. Breves instru oes para a cultura de purgueira. Colonia de Cabo Verde, Reais parti ao Tehnica dos serviços Agrícolas, Floreste e Pacuários. Praia. *Imprensa Nacional de Cabo Verde, Praia*.

<sup>174</sup> Cunha da Silveira, J. 1934. Contribution   l'étude du pourgh re aux  les du Cap Vert. *Anais do Instituto Superior de Agronomia* 6(1):116-26.

<sup>175</sup> Heller, J. 1991. *Etude des potentialités génétiques et amélioration des méthodes de culture et de reproduction du pourghère (Jatropha curcas L.)*. Stuttgart: GTZ.

<sup>176</sup> Soares Severino, L., R. de Lourdes Silva de Lima, A. Bezerra Leao, and N. Esberard de Macedo Beltrao. 2007. Root system characteristics of *Jatropha Curcas* plants propagated through five methods. in *Expert Seminar on Jatropha Curcas L. Agronomy and genetics*, edited by Fuels from



est une plante allogame qui se multiplie par graine, le bouturage donnant des plants plus fragiles à cause de l'absence de racine pivotante<sup>178</sup>. La plantule développe une racine pivotante qui permet au futur arbuste une alimentation en eau et nutriments en profondeur. Par contre, les individus obtenus par bouture ne développent que des racines adventives, superficielles et donc mal adaptées à la survie dans les sols difficiles sous des climats arides. Cependant, la multiplication non contrôlée par graines ne permet pas une reproduction conforme à la mère et ne garantit pas la transmission à la descendance de tous les caractères intéressants. Compte tenu de son absence de sensibilité au photopériodisme, le *Jatropha* est une plante qui fleurit quand les conditions environnementales sont favorables<sup>179</sup>. Les floraisons s'échelonnent tant qu'il pleut et l'on trouve facilement sur le même arbre des fruits à des stades différents de maturation et le récolteur doit régulièrement passer pour prélever les fruits mûrs.

La forte plasticité phénotypique de l'espèce en fonction des conditions environnementales et malgré une faible diversité génétique observée, nuit à la bonne conduite des essais d'amélioration. Bien que peu d'études concernant la diversité génétique aient été publiées, leurs résultats concourent à montrer un faible taux de variabilité génétique au sein de populations établies en-dehors de la zone d'origine du *Jatropha*. La potentialité adaptative marquée de cette plante ne pouvant être attribuée à sa seule diversité génétique, elle doit dépendre principalement de nombreux phénomènes de régulation épigénétique. Dans ce sens, *Jatropha* pourrait constituer un modèle intéressant pour effectuer des études dans le domaine de la régulation des fonctions des gènes.

Les nombreux travaux réalisés sur le *Jatropha* ont surtout porté sur la valorisation de l'huile<sup>180,181</sup>. Avant la deuxième guerre mondiale, l'intérêt porté à cette huile a permis le développement de travaux scientifiques en Europe<sup>182</sup>. Cependant il s'est avéré qu'en dehors de la savonnerie, son intérêt était limité puisqu'elle se prêtait mal à la réalisation de peintures (huile pas assez siccativante) ou au graissage mécanique. Au début de la deuxième guerre mondiale, les premières analyses chimiques ont retenu l'attention des ingénieurs mécaniciens du Centre Expérimental des Carburants Végétaux de Ségou au Mali qui ont entrepris des tests méthodiques d'utilisation de l'huile de *Jatropha* dans les moteurs<sup>183</sup>. La conclusion fut que l'huile de *Jatropha* se comportait bien comme combustible dans les moteurs diesel (de l'époque) sans traitement préalable particulier. Les cours très attractifs du pétrole ont ensuite éclipsé l'intérêt porté à cette culture.

Dans les années 80, un projet de production et d'utilisation de l'huile de *Jatropha* en milieu rural africain<sup>184</sup> a été mené par la GTZ au Mali sous la forme du Programme Spécial Energie. Il consistait à promouvoir la mise en place de haies vives de *Jatropha* dont les graines étaient récoltées et devaient

---

Agriculture in Communal Technology (FACT) Foundation. Wageningen (NLD): Fuels from Agriculture in Communal Technology (FACT) Foundation.

<sup>177</sup> Saturnino, H. M., D. D. Pacheco, J. Kakida, N. Tominaga, and N. P. Goncalves. 2005. Cultivation of *Jatropha curcas* L [Cultura do pinhao-manso (*Jatropha curcas* L.)]. *Informe Agropecuario* 26(229):44-78.

<sup>178</sup> Heller, J. 1991. *Etude des potentialités génétiques et amélioration des méthodes de culture et de reproduction du pourghère (Jatropha curcas L.)*. Stuttgart: GTZ.

<sup>179</sup> Heller, J. 1996. *Physic nut. Jatropha curcas L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops*.

<sup>180</sup> Droits, 1932.

<sup>181</sup> Vaitilingom, G. 1992. Etude du comportement de l'huile de pourghère dans le couple huile/moteur." Pp. 53: CIRAD-SAR.

<sup>182</sup> Droits, 1932.

<sup>183</sup> Larochas, L. 1948. (Les huiles siccatives et l'industrie française) Le pourghère. *Oléagineux* 3(6-7):321-28.

<sup>184</sup> Vaitilingom, G. 1995. Utilisation de l'huile de pourghère comme carburant en milieu rural africain." Pp. 15: CIRAD-SAR.

servir à différents usages : production de savon, d'huile d'éclairage, production d'électricité, utilisation de motopompe<sup>185</sup>. On estime qu'à travers ce projet ,ce sont plus de 1 500 km de haies qui ont été plantées et la production est estimée à 3 000 t de graines par an. L'extraction d'huile était réalisée avec des presses artisanales manuelles et on estime la production d'huile à 500 t.

Le projet Tempate au Nicaragua a vu le jour en 1990<sup>186</sup> avec un pilote de 1 000 ha en production chez 200 planteurs. Dix ans après, un bilan très intéressant en était fait bien que les rendements obtenus (environ 7 700 kg de fruits frais et 350 kg d'huile à l'ha) aient été bien en deçà de ceux qui étaient attendus (environ 33 000 kg de fruits frais et 1 500 kg d'huile à l'ha). La plupart des causes étaient liées à la méconnaissance de la production agricole et à l'absence d'appui technique aux producteurs qui découvraient pour la première fois cette culture<sup>187</sup>. Le projet Tempate a également montré l'importance du choix de la densité tant pour optimiser la production que pour faciliter la gestion du verger (entretien, taille, récolte).

Les graines moulues, l'huile des graines et le latex de *Jatropha* présentent différentes activités phytoprotectrices : insecticide<sup>188</sup>, antifongique<sup>189</sup> et molluscicide<sup>190</sup>. Ces capacités de la plante sont attribuées à sa teneur en différents composés toxiques, et plus particulièrement en phorbol esters, diterpènes tétracycliques à activité tumorale. D'autres molécules actives sont présentes dans les différentes parties de la plante, en particulier des inhibiteurs de trypsine, l'acide phytique, un agent chélateur de métaux pouvant altérer la croissance, une protéine aux propriétés agglutinantes, la curcine (substance toxique mais ayant des effets antitumoraux), une protéase, la curcaine, aux effets cicatrisants, des diterpènes aux activités métastatiques, des peptides cycliques inhibant modérément la prolifération des cellules T chez l'homme. La sensibilité aux maladies et aux insectes a longtemps été sous estimée<sup>191</sup>. On imaginait que la toxicité des parties aériennes protégeait l'arbre des agressions extérieures. Cependant de nombreuses maladies ou prédateurs plus ou moins virulents ont été observés sur *Jatropha*<sup>192,193</sup>). Les 2 principaux prédateurs identifiés sur le projet ont été des punaises, *Pachycoris klugii* et *Leptoglossus zonatus*<sup>194</sup>. L'approche lutte biologique s'est intensifiée et des champignons entomopathogènes ont été identifiés pour lutter contre ces punaises<sup>195</sup>.

---

<sup>185</sup> Henning. 1990. Le pourghère. Pp. 277.

<sup>186</sup> Foidl, N., M. Siles Hernandez, M. Sanchez Mendez, and Montoya Lopez A. 1996. Tempate (*Jatropha curcas* L., Euphorbiaceae). Pp. 109 - 13 in *Especies para reforestación en Nicaragua*, edited by Z. Herrera Alegría and B. Lanuza. Managua (Nicaragua): Pie de Imprenta.

<sup>187</sup> Technoserve. 2001. Biodiesel in Nicaragua : Growing Opportunity or Fruitless Effort Pp. 57: Columbia Université.

<sup>188</sup> Grainge, M., and S. Ahmed. 1988. *Handbook of plants with Pest-control Properties*. New York (USA): John Wiley and Sons

<sup>189</sup> Garcia, R.P., and P. Lawas. 1990. Note: Potential plant extracts for the control of *Azolla* fungal pathogens. *Phillipp. Agric* 73(TACHE-7-V10):343-48.

<sup>190</sup> Agaceta, L.M., P.U. Dumag, Atolos J.A., and F.C. Bandolia. 1981. Studies on the control of snail vectors of fascioliasis. Molluscicidal activity of some indigenous plants. National Science Development Board (NSDB). *Technol.J. (Philippines)* 6:30-34.

<sup>191</sup> Henning. 1990. "Le pourghère." Pp. 277.

<sup>192</sup> Shanker, C., and S.K. Dhyani. 2006. Insect pests of *Jatropha Curcas* L. and the potential for their management. *Current Science* 91(2):162-63.

<sup>193</sup> Sharma, N., and A. Sarraf. 2007. Pest Disease Management. In *Expert seminar on Jatropha Curcas L. Agronomy and genetics*, edited by Fuels from Agriculture in Communal Technology (FACT) Foundation. Wageningen (NLD): Fuels from Agriculture in Communal Technology (FACT) Foundation.

<sup>194</sup> Grimm, C., and J.M. Maes. 1997. Arthropod Fauna Associated with *Jatropha curcas* L. in Nicaragua: A Synopsis of Species, their Biology and Pest Status. In *Biofuels and Industrial Products from Jatropha curcas. Developed from the Symposium "Jatropha 97" Managua, Nicaragua February 23 – 27, 1997*, edited by G.M. Gübitz, M. Mittelbach, and M. Trabi. Graz (Austria): Dbv-Verlag für die Technische Universität Graz.

<sup>195</sup> Grimm, C., and F Guharay. Ibid. Potential of Entomopathogenous Fungi for the Biological Control of True Bugs in *Jatropha curcas* L. Plantations in Nicaragua."

Concernant les études d'impacts environnementaux, peu de travaux ont été menés. Une étude publiée par l'IFEU<sup>196</sup> fait état d'une séquestration limitée du carbone au niveau de la culture, le principal gain étant celui de la substitution du gazole par l'huile ou son ester. Certains auteurs ont mentionné le *Jatropha* comme un hôte de maladies à virus pour d'autres espèces cultivées telles que le manioc<sup>197</sup>. L'Australie du Nord considère le *Jatropha* comme une plante mauvaise herbe susceptible d'être invasive<sup>198</sup>.

Tableau 32 : analyse SWOT appliquée à l'utilisation de *Jatropha curcas* pour des usages en chimie verte et bioénergies

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques de <i>Jatropha curcas</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte plasticité</li> <li>• Plante résistant à des conditions difficiles</li> <li>• Ecotypes poussant dans des conditions environnementales très variées</li> <li>• Teneur importante en lipides de la graine (25-35 %)</li> <li>• Métabolites secondaires d'intérêt (propriétés biocides et médicinales de certains composants)</li> <li>• Qualité du tourteau (en dehors des toxines)</li> <li>• Diversité génétique pour les écotypes d'Amérique Centrale (existe un écotype sans esters de phorbol au Mexique)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peu de production de graines dans des conditions de culture difficiles</li> <li>• Allogamie/protogynie</li> <li>• Craint le gel</li> <li>• Sensible à l'hydromorphie</li> <li>• Faible diversité génétique des écotypes cultivés en Afrique et Asie</li> <li>• Floraison étalée</li> <li>• Présence de toxines dans le tourteau</li> <li>• Manque de données fiables</li> <li>• Manque de programmes d'amélioration variétale</li> <li>• Manque de données génétiques et génomiques</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demande globale en biocarburants</li> <li>• Possibilité d'accès à l'énergie pour les zones enclavées</li> <li>• Culture sur sols marginaux (fertilisation de zones arides, phytoremédiation,...)</li> <li>• Apport monétaire supplémentaire pour les producteurs</li> <li>• Possibilité de réduction de la facture pétrolière pour les pays producteurs</li> <li>• Recherche de médicaments d'origine naturelle</li> <li>• Nombreux programmes de recherche sur <i>Jatropha</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concurrence pour l'usage du sol et des intrants</li> <li>• Financements actuels limités pour des programmes de recherche</li> </ul>

### Questions de recherche sur *Jatropha*

- Rechercher l'origine de sa forte résistance à la sécheresse et à d'autres stress

<sup>196</sup> Reinhardt, G., K. Becker, and A. Gosh. 2008. Basic data for *Jatropha* production and use - updated version." Pp. 15. Heidelberg: IFEU Institute for Energy and Environmental Research

<sup>197</sup> Munch, E., and J. Kiefer. 1986. Le Pourghère (*Jatropha Curcas* L.) Botanique, écologie, culture (1ère partie). Produits de récolte, filières de valorisations, réflexions économiques (2ème partie). Pp. 276 in *Institut pour la production végétale dans les zones tropicales et subtropicales*: Université de Stuttgart - Hohenheim.

<sup>198</sup> Crothers, M. 1984. Physic nut (*Jatropha curcas* L.). . *Agnote n° 583. Northern Territory Department of Primary Industry and Fisheries (Australia)*.

environnementaux.

- Explorer la diversité génétique dans le centre d'origine (Amérique Centrale) ; ressources génétiques potentielles au sein du genre ?
- Création de variétés avec les caractères fixés.
- Suppression des composants les plus toxiques du *Jatropha*.
- Regroupement de la floraison. Raccourcissement du cycle de floraison.
- Acclimatation de *Jatropha curcas* à des climats tempérés avec risque de gel.
- Caractérisation des métabolites secondaires à haute valeur ajoutée et appréhension de leurs voies de biosynthèse (avec un préalable : développer des outils de transformation génétique ou, en complément, des études de sélections variétales).
- Analyse socio-économique pour mesurer l'impact des plantations de *Jatropha* à l'échelle d'un territoire.

#### 4.3.2.2. Jojoba (*Simmondsia chinensis*)

Le jojoba est une plante pérenne qui pousse naturellement dans le désert de Sonora en Arizona aux Etats-Unis. Sa taille est comprise entre 5 et 7 m de haut et 3 à 5 m de large. Sa durée de vie moyenne est d'une centaine d'années et ses racines peuvent atteindre une profondeur de 9 m ce qui lui permet de résister aux fortes températures et à la sécheresse. Il faut environ 3 à 4 ans avant qu'elle produise des graines et 10 ans pour atteindre sa production maximale. Les graines contiennent des réserves lipidiques qui représentent 50 % de leur poids sec. Ces réserves sont des cérides (esters d'un acide gras et d'un alcool) contenant de 38 à 44 atomes de carbone. Les propriétés de cette huile sont proches de celles du spermaceti de cachalot et elle est utilisée comme matière première alternative dans l'industrie des cosmétiques (lotions, shampoings, conditionneurs). L'huile de jojoba et ses dérivés sont également utilisés comme lubrifiants, fluides de transmission et comme agents anti-mousse. Après hydrogénation, l'huile qui est sous forme de cires trouve des usages dans le lustrage des automobiles, dans la préparation des sols, dans la protection des fruits et dans la confection de sucreries.

Les plantations de jojoba représentaient environ 7 000 ha en 2003 dont 3 000 ha en Argentine et 2 300 ha aux Etats-Unis. Les rendements sont variables et oscillent entre 200 g et 1 200 g/plante. Différents programmes de sélection ont été lancés aux Etats-Unis, en Israël et en Australie qui ont abouti à l'obtention de clones qui peuvent produire jusqu'à 900 kg/ha. L'influence de différents paramètres de cultures ont été étudiés : irrigation, intrants, pH, nature du sol, température, sensibilité au gel. Il ressort de ces essais une grande variabilité des résultats obtenus. Néanmoins, on peut conclure que le jojoba est résistant aux fortes températures (à 40°C l'appareil photosynthétique est fonctionnel), que la température optimale de croissance est de 27-30°C, qu'il est tolérant à la salinité du sol, que l'irrigation n'est pas spécialement bénéfique à son développement et qu'il est sensible au gel (les jeunes plantes meurent après une exposition de 3h à 7°C).

En conclusion, l'adaptation de la culture de jojoba à des climats tempérés semble dans l'état des connaissances actuelles extrêmement difficile et les aires de culture pour le jojoba les plus appropriées demeurent les zones semi arides des Etats Unis, de l'Argentine, de l'Australie et d'Israël. Cependant, les paramètres de culture doivent être manipulés avec soin pour obtenir un rendement et une qualité optimaux. La domestication de cette plante est très difficile y compris dans ces aires de culture et semble peu compatible avec l'obtention d'une huile de qualité normalisée en accord avec les exigences du marché.

#### 4.3.2.3. Genre *Cuphea*

Le genre *Cuphea* de la famille des *Lythraceae* compte 260 espèces différentes mais seules quelques

unes sont utilisées à des fins commerciales. Ce sont des plantes à fleurs annuelles pérennes originaires du Mexique et d'Amérique centrale qui ont une préférence pour les sols humides, pour les climats tempérés et qui sont sensibles à la sécheresse. Selon les variétés, elles peuvent être des plantes basses de 40 cm de hauteur au maximum ou bien des arbustes pouvant atteindre une hauteur de 2 m. Les Cuphéas se reproduisent soit par autopolinisation soit par pollinisation croisée. Quelques variétés sont cultivées et commercialisées comme plantes ornementales mais c'est la composition en acides gras de l'huile de certaines variétés qui a suscité depuis les années 80 l'intérêt de Procter et Gamble pour la culture du Cuphéa. Les triacylglycérols de l'huile de ces variétés contiennent essentiellement un acide gras à chaîne moyenne (C8 à C14). Par exemple, l'acide caprique (C14:0) représente 95 % des acides gras de l'huile de *C. koehneana* et l'acide laurique (C12:0) 80 % chez *C. carthagenensis*. Cette huile est considérée comme une source alternative à l'huile de coco et de palmiste pour la production de détergents, de shampoings et de dentifrices. Les recherches récentes ont eu comme objectif de développer des variétés ne présentant pas de déhiscence des fruits et dont les graines ne présentent pas de dormance afin de pouvoir augmenter le rendement de la récolte. A l'heure actuelle, un hybride PSR23 issu d'un croisement entre *C. viscosissima* et *C. Lanceota* est en cours de développement dans le centre des Etats-Unis. Ces cultures concernaient en 2006 environ une centaine d'hectares. Les graines sont semées en mai à une densité de 1 à 2 millions par ha et la récolte a lieu fin septembre. Dans ces conditions, le rendement est de 1 000 kg/ha de graines avec un contenu d'huile variant entre 28 et 33% et dont l'acide caprique représente 67 à 73 % du total des acides gras. La quantité d'huile produite par PSR23 est plus importante lorsque la température est peu élevée. Il demeure cependant que les conditions et la conduite des cultures restent à standardiser notamment pour ce qui concerne le rendement qui reste faible dans les régions les plus septentrionales.

L'huile de palme est actuellement la source quasi exclusive de ces acides gras utilisés principalement comme détergents. Les données concernant la domestication du Cuphéa essentiellement développée aux Etats-Unis indiquent que cette plante présente un fort potentiel pour devenir à moyen terme une source alternative pour la production d'acides à chaîne moyenne dans les pays tempérés. Elle est capable de s'adapter aux régions tempérées et pourrait être utilisée comme culture de rotation entre les cultures de maïs et de soja en utilisant le même équipement de récolte. En outre, l'existence de plusieurs brevets déposés par la société Monsanto et concernant l'utilisation des ressources génétiques des différentes variétés de colza réduit l'intérêt de cette plante comme source de production d'acides gras à chaîne moyenne.

#### **4.3.2.4. Crambe (*Crambe abyssinica*)**

Le crambe est une plante hexaploïde ( $2n=6x=90$ ) originaire du bassin méditerranéen et des hauts plateaux de l'Afrique de l'Est. Il en existe 30 espèces mais seule *Crambe abyssinica* ou moutarde d'Abyssinie est cultivée pour son huile riche en acide érucique (C22:1). Cette plante a été adaptée et introduite en 1933 en URSS et un programme d'amélioration a été initié en Suède dès 1949. Elle est actuellement utilisée comme culture de printemps en Europe (Russie, Suède, France et Pologne), Asie et depuis 1958 aux Etats-Unis. Cette culture représentait 23 000 hectares dans le Nord Dakota en 1996. Cette crucifère annuelle est tolérante au gel (-4 à -6°C), sa hauteur varie de 1 à 2 m (moyenne 1,2 m) suivant la saison et la densité de culture. En général, la période de floraison est de 3 semaines et les fleurs blanches, petites et nombreuses, donnent des capsules sphériques contenant de nombreuses graines brunes de 1 à 3 mm. Les rendements sont de 2,3 tonnes de graines/ha et d'environ 850 kg d'huile/ha. Les graines contiennent 37% d'huile dont l'acide gras majoritaire est l'acide érucique (57 %). Ce dernier a été suspecté être à l'origine de problèmes de santé lors de son utilisation pour l'alimentation humaine, en conséquence l'usage de l'huile de crambe est essentiellement chimique. Elle sert de lubrifiant, d'agent anti corrosion et est un des ingrédients entrant dans la synthèse du caoutchouc synthétique. L'acide érucique est utilisé soit directement, soit après

transformation chimique comme matière première directe pour la fabrication de films plastiques, de nylon, de colles et d'isolants électriques.

Les tourteaux résultant de l'extraction de l'huile, tout en étant riches en protéines (40 % pour les graines décortiquées, environ 30 % pour les autres), contiennent des glucosinolates qui limitent leur utilisation pour l'alimentation animale.

Bien qu'il reste à mettre au point des protocoles performants de transformation du Crambe, sa culture en Europe semble toujours présenter un intérêt. La CEE vient d'octroyer un financement pour le projet ICON (Industrial Crops producing added value Oils for Novel chemicals) dont l'objectif est d'aboutir à la sélection d'une plante de grande culture à rendement élevé qui produira des huiles adéquates utilisables pour la fabrication de lubrifiants et de matières premières pour l'industrie chimique. Il faut noter que le colza érucique occupe déjà en partie ce créneau. Dans ce projet, le crambe (*Crambe abyssinica*) et la moutarde d'Ethiopie (*Brassica carinata*) seront génétiquement modifiés afin d'orienter la synthèse des lipides vers la production d'esters de cires (cérides) qui sont plus résistants que les huiles végétales usuelles aux hautes températures et aux fortes pressions. Ces nouvelles plantes ne devraient nécessiter qu'une faible mobilisation de la surface des terres cultivables amputant très peu l'espace des cultures destinées à l'alimentation.

Tableau 33 : analyse SWOT appliquée à l'utilisation du Crambe pour des usages en chimie verte et bioénergies

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques du Crambe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un strict produit non alimentaire</li> <li>• Variabilité génétique</li> <li>• Plante facilement adaptable (culture de printemps en Europe et d'hiver sur le pourtour Méditerranéen)</li> <li>• Existence de variétés à haut rendement</li> <li>• Sélection d'un Crambe d'hiver en cours</li> <li>• Utilisation possible comme biocide</li> <li>• Peu exigeante en eau</li> <li>• Matière première (huile) valorisable</li> <li>• <i>Brassicaceae</i> (banques de données disponibles)</li> <li>• Teneur importante en lipides (40% de la graine)</li> <li>• Croisement avec d'autres plantes oléagineuses peu probable</li> <li>• Valorisation des sous-produits (tourteau notamment)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement moins élevé que les oléagineux cultivés</li> <li>• Sensibilité au froid</li> <li>• Faible connaissance de la diversité génétique des variétés</li> <li>• Forte proportion de glucosinolates</li> <li>• Sensible aux maladies (<i>Alternia</i>)</li> <li>• Coque épaisse et volumineuse</li> <li>• Possibilité de flux de gènes vers les espèces sauvages notamment en Europe du sud</li> <li>• Manque d'outils de marquage génétique, de données « omiques »</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demande en biocarburants</li> <li>• Prix élevé des produits pétroliers</li> <li>• Existence d'un projet européen « ICON »</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concurrence pour l'usage du sol (culture d'exportation)</li> <li>• Risque sociétal (OGM)</li> <li>• Compétition avec le colza</li> </ul>

### Questions de recherche sur le Crambe

- Sélection, amélioration par des méthodes conventionnelles et par modification génétique pour

augmenter le rendement.

- Sélection de variétés résistantes à *Alternia*.
- Développement d'un protocole de transformation.
- Sélection de variétés d'hiver.
- Développement des outils de marquage génétique et de données « omiques ».
- Meilleure connaissance du métabolisme lipidique.
- Modification par génie génétique du métabolisme lipidique.

#### 4.3.2.5. Le *Miscanthus* et le switchgrass (*Panicum virgatum*)

*Miscanthus* est un genre appartenant à la famille des poacées et qui comporte une quinzaine d'espèces. Seuls des clones de l'hybride interspécifique *Miscanthus x giganteus* sont utilisés aujourd'hui pour la production de biomasse<sup>199,200</sup>. La plupart de ces espèces sont utilisées à des fins ornementales et seuls des clones de l'hybride interspécifique *Miscanthus x giganteus* sont utilisés aujourd'hui pour la production de biomasse<sup>201</sup>. Quelques travaux de synthèse donnent une description assez complète de la biologie et de l'agronomie de *Miscanthus x giganteus*<sup>202,203</sup>. Le *Miscanthus* géant (*Miscanthus giganteus*) est une plante qui résulte du croisement par l'Homme de *Miscanthus sinensis* et *Miscanthus sacchariflorus*. Elle est stérile, perenne, se reproduit par rhizomes et fournit une biomasse importante. Il s'agit d'une espèce à très fort potentiel pour la production d'éthanol à partir de la cellulose. Par ailleurs *via* ses rhizomes et sa rhizosphère une partie importante du carbone absorbé par la plante est stockée dans le sol.

Karp et Shield (2008)<sup>205</sup> ont recensé et synthétisé des valeurs consensuelles de composition de diverses cultures lignocellulosiques de *Miscanthus*. La teneur en lignocellulose est élevée pour les deux plantes et dépasse 70 % de la masse sèche. Les teneurs en cendres du *Miscanthus* et du switchgrass sont plus faibles que celles des pailles de blé ou de maïs mais plus élevée que celle des taillis à courte rotation de peuplier ou de saule. La date de coupe a une grande influence sur la composition de la plante. Une coupe précoce (octobre) aboutit à doubler les teneurs en eau, en cendres, en potassium, en chlore et augmente les teneurs en azote, par rapport à une coupe en février<sup>204</sup>. De part sa composition chimique, le *Miscanthus* est bien adapté à un débouché en combustion<sup>205</sup>. Le *Miscanthus* et le switchgrass sont également étudiés pour un débouché en carburants de deuxième génération par voie biologique.

Le switchgrass (*Panicum virgatum*) appartient également à la famille des poacées. Il est originaire du nord de l'Amérique où il a été utilisé comme fourrage avant de devenir une plante d'intérêt pour le débouché bioénergie<sup>204</sup>. Différentes variétés sont aujourd'hui disponibles. La teneur en éléments minéraux peut être très variable, avec un rôle important de l'interaction population\*site<sup>209</sup>.

Une efficacité de conversion de l'énergie lumineuse de l'ordre de 1 % en moyenne avec un maximum de 2 % a été obtenue dans des essais sur trois années dans l'Illinois, fournissant ainsi 30 tonnes

<sup>199</sup> Lewandowski, I. et al., 2000. *Miscanthus* : European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy* 19(4) :209-227.

<sup>200</sup> Jones, M.B. and Walsh, M.E. *Miscanthus* for energy and fibre. James & James pub., London, 192

<sup>201</sup> Scally, L., T. Hodkinson, and M.B. Jones. 2001. Origins and Taxonomy of *Miscanthus*. Pp. ? in *Miscanthus for energy and fibre*, edited by M.B. Jones and M. E. Walsh. London: James & James.

<sup>202</sup> Lewandowski, I., J. C. Clifton-Brown, J. M. O. Scurlock, and W. Huisman. 2000. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy* 19(4):209-27.

<sup>203</sup> Jones, M. B., and M. E. Walsh. 2001. *Miscanthus for energy and fibre*. London (GBR): James & James.

<sup>204</sup> Lewandowski I., and Heinz, A. 2003. Delayed harvest of *Miscanthus* - influences on biomass quantity and quality and environmental impacts of energy production. *European Journal of Agronomy*, 19(1): 445-63.

(maximum 60 tonnes) par hectare de matière sèche. La production d'éthanol est, dans ces conditions, de l'ordre de 2,6 fois celle fournie sur une surface équivalente par du maïs-grain. Une grande partie de cette productivité est due à une photosynthèse de type C4 et à une assimilation du carbone pendant des périodes de basse température ce qui se traduit par une plus longue durée de croissance active.

Le switchgrass (*Panicum virgatum*) appartient également à la famille des poacées. Il est originaire du nord de l'Amérique où il a été utilisé comme fourrage avant de devenir une plante d'intérêt pour le débouché bioénergie. Différentes variétés sont aujourd'hui disponibles. Une synthèse bibliographique sur la biologie et l'agronomie de la plante a été réalisée par Parrish et Fike<sup>205</sup>.

Très peu d'études ont été publiées sur la valorisation du Miscanthus ou du switchgrass. De part sa composition chimique, le Miscanthus est bien adapté à un débouché en combustion<sup>206</sup>. Le Miscanthus et le switchgrass sont également étudiés pour un débouché en carburants de deuxième génération, notamment par voie biologique.

Une revue bibliographique récente a recensé et synthétisé des valeurs consensuelles de composition de diverses cultures lignocellulosiques<sup>207</sup>. Le tableau 32 en présente un extrait pour Miscanthus et switchgrass.

Tableau 34 : composition du Miscanthus et du switchgrass pour une récolte hivernale<sup>209</sup>

	eau %MF	cendres %MS	volatiles %MS	lignine %MS	hémicellulose %MS	cellulose %MS	PC MJ.kg-1	densité t.m-3	N %MS	K %MS	Na %MS	Cl %MS	Si %MS	S %MS
miscanthus	20	2	82,1	10,5	15,9	57,6	18,2	0,22	0,37	0,41	0,03	0,39	1	0,04
switchgrass	20	3,7	71,5	6,1	36	31,6	17,9	0,35	0,6			0,07		0,04

Globalement, le Miscanthus et le switchgrass présentent un profil de composition similaire, avec un avantage pour le Miscanthus pour la teneur en éléments minéraux, en cellulose, et le pouvoir calorifique. La teneur en cendres du Miscanthus et du switchgrass est plus faible que celle des pailles de blé ou de maïs mais plus élevée que celle des taillis à courte rotation de peuplier ou de saule. La teneur en lignocellulose est élevée pour les deux plantes et dépasse 70 % de la masse sèche.

La teneur en éléments minéraux du switchgrass peut être très variable en fonction du génotype et du site d'étude<sup>208</sup>. Des tests de production d'éthanol indiquent qu'un prétraitement est indispensable pour améliorer le rendement en sucres fermentescibles. Après prétraitement et hydrolyse, le rendement glucose peut atteindre 90 % et le rendement xylose 100 %. Le rendement éthanol varie, lui, entre 70 et 90 % du maximum théorique<sup>209</sup>.

La récolte du Miscanthus peut s'effectuer avec du matériel existant, soit avec une ensileuse à maïs, soit

<sup>205</sup> Parrish, D. J., and J. H. Fike. 2005. The biology and agronomy of switchgrass for biofuels. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24(5-6):423-59.

<sup>206</sup> Lewandowski, I., and A. Kicherer. 1997. Combustion quality of biomass: Practical relevance and experiments to modify the biomass quality of Miscanthus x giganteus. *European Journal of Agronomy* 6(3-4):163-77.

<sup>207</sup> Karp, A., and I. Shield. 2008. Bioenergy from plants and the sustainable yield challenge. *New Phytologist* 179(1):15-32.

<sup>208</sup> El-Nashaar, H. M., G. M. Banowetz, S. M. Griffith, M. D. Casler, and K. P. Vogel. 2009. Genotypic variability in mineral composition of switchgrass. *Bioresource Technology* 100(5).

<sup>209</sup> Keshwani, D. R., and J. J. Cheng. Ibid. Switchgrass for bioethanol and other value-added applications: A review. (4):1515-23.



avec une presse à haute densité après coupe<sup>210</sup>. Contrairement au *Miscanthus x giganteus*, le switchgrass se propage par les graines et peut donc se semer. Toutefois les semences sont petites et sensibles aux conditions de milieu lors de la levée<sup>211</sup>. Il n'y a pas de publication décrivant les méthodes de récolte du switchgrass mais les expériences européennes montrent qu'elles sont les mêmes que pour le *Miscanthus*. Aucune référence indiquant d'éventuels bio-agresseurs (ravageurs, maladies) du *Miscanthus* et du switchgrass n'a été répertoriée.

Le *Miscanthus* et le switchgrass sont deux cultures pérennes qui constituent donc un système de culture à part entière. Leur pérennité est supérieure à 10 ans<sup>212,213</sup>. Ce sont également 2 plantes en C4 dont le potentiel de production est très élevé. Les valeurs maximales de rendement en automne pour les études publiées sont de 60 t de matière sèche à l'hectare pour le *Miscanthus* et 40 t pour le switchgrass (dans les deux cas aux Etats-Unis d'Amérique)<sup>214,215</sup>. Toutefois, d'une étude à l'autre, les niveaux de production sont très hétérogènes.

Le facteur limitant principal de la production du *Miscanthus* semble être la disponibilité en eau<sup>216</sup>. En terme de réponse à l'azote les résultats d'études sont très hétérogènes. Le consensus est que le *Miscanthus* a de faibles besoins en azote. Cela semble s'expliquer par la présence des rhizomes qui servent d'organes de stockage pour les éléments minéraux<sup>217</sup>. Dans leur étude bibliographique, Parrish et Fike<sup>218</sup> montrent que les réponses à l'azote du switchgrass sont inexistantes ou au contraire positives jusqu'à des niveaux d'apports de 200 kgN/ha. Une particularité du switchgrass est que la réponse du rendement aux facteurs de production (eau et azote) et à la date et/ou au rythme de coupe est très dépendante des types variétaux en interaction avec la localisation géographique<sup>219,220</sup>.

Au niveau environnemental, ces 2 espèces présentent des caractéristiques *a priori* favorables au

---

<sup>210</sup> Venturi, P., W. Huisman, and J. Molenaar. 1998. "Mechanization and costs of primary production chains for *Miscanthus x giganteus* in the Netherlands." *Journal of Agricultural Engineering Research* 69(3).

<sup>211</sup> Monti, A., P. Venturi, and H. W. Elbersen. 2001. Evaluation of the establishment of lowland and upland switchgrass (*Panicum virgatum* L.) varieties under different tillage and seedbed conditions in northern Italy. *Soil & Tillage Research* 63(1/2).

<sup>212</sup> Christian, D. G., A. B. Riche, and N. E. Yates. 2008. Growth, yield and mineral content of *Miscanthus x giganteus* grown as a biofuel for 14 successive harvests." *Industrial Crops and Products* 28(3):320-27.

<sup>213</sup> Fike, J. H., D. J. Parrish, D. D. Wolf, J. A. Balasko, J. T. Green, M. Rasnake, and J. H. Reynolds. 2006. Long-term yield potential of switchgrass-for-biofuel systems. *Biomass & Bioenergy* 30(3):198-206.

<sup>214</sup> Heaton, E. A., F. G. Dohleman, and S. P. Long. 2008. Meeting US biofuel goals with less land: the potential of *Miscanthus*. *Global Change Biology* 14(9):2000-14.

<sup>215</sup> Kiniry, J. R., C. R. Tischler, and G. A. Van Esbroeck. 1999. Radiation use efficiency and leaf CO<sub>2</sub> exchange for diverse C-4 grasses. *Biomass and Bioenergy* 17(2):95-112.

<sup>216</sup> Richter, G.M., A.B. Riche, A.G. Dailey, Gesan S.A., and D.S. Powlson. 2008. Is UK biofuel supply from *Miscanthus* water-limited? . *Soil Use and Management* 24:235-45.

<sup>217</sup> Christian, D. G., P. R. Poulton, A. B. Riche, N. E. Yates, and A. D. Todd. 2006. The recovery over several seasons of N-15-labelled fertilizer applied to *Miscanthus x giganteus* ranging from 1 to 3 years old. *Biomass & Bioenergy* 30(2):125-33.

<sup>218</sup> Parrish, D. J., and J. H. Fike. 2005. The biology and agronomy of switchgrass for biofuels. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24(5-6):423-59.

<sup>219</sup> Stroup, J. A., M. A. Sanderson, J. P. Muir, M. J. McFarland, and R. L. Reed. 2003. Comparison of growth and performance in upland and lowland switchgrass types to water and nitrogen stress. *Bioresource Technology* 86(1):65-72.

<sup>220</sup> Fike, J. H., D. J. Parrish, D. D. Wolf, J. A. Balasko, J. T. Green, M. Rasnake, and J. H. Reynolds. 2006. Long-term yield potential of switchgrass-for-biofuel systems. *Biomass & Bioenergy* 30(3):198-206.

stockage de carbone dans les sols : elles permettent d'éviter le travail du sol, présentent une production élevée de biomasse avec des pertes avant la récolte et ont une biomasse souterraine importante<sup>221</sup>. Ce rôle positif sur le stockage de carbone dans les sols, ainsi que leur pérennité et leurs faibles besoins en intrants notamment azotés, leur permettent de présenter des émissions globales de GES (gaz à effet de serre) plus faibles que celles des grandes cultures annuelles<sup>222,223</sup>. Cependant, très peu d'études ont été menées pour ces 2 cultures, concernant les émissions de N<sub>2</sub>O qui ont un impact important sur le bilan de GES.

De part sa stérilité, *Miscanthus x giganteus* présente *a priori* de faibles risques liés à un éventuel comportement invasif, d'autant plus qu'aucune propagation n'a été observée à partir de parcelles de *Miscanthus* cultivées en Europe. De tels risques ne peuvent par contre pas être écartés pour le switchgrass, mais ceux-ci devront être précisés en fonction de la région d'introduction<sup>224</sup>. Dans la mesure où il n'existe pratiquement qu'une seule origine à cette nouvelle espèce, il est impératif d'apprécier la variabilité des espèces parentales en particulier pour ce qui concerne la qualité de la biomasse produite en vue de son utilisation pour la production d'éthanol mais aussi des co-produits issus des lignines. Cette variabilité devra être appréciée également en fonction des variations du milieu. Le marquage moléculaire des régions chromosomiques concernées et le génotypage des ressources génétiques permettront d'appuyer la création de matériel innovant.

Tableau 35 : analyse SWOT appliquée à l'utilisation du *Miscanthus* et du switchgrass pour des usages en bioénergies

Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte demande en biocarburant</li> <li>• <b>Forces</b></li> <li>• <i>Miscanthus</i> : développement de projets de co-génération</li> <li>• Métabolisme photosynthétique en C4</li> <li>• Potentiel de production élevé par unité de surface mobilisée (bilans énergétiques et environnementaux)</li> <li>• Plantes pérennes (faible nombre d'interventions nécessaires)</li> <li>• Plantes pouvant potentiellement être cultivées sur des zones écologiquement naturellement sec (février-mars) avec du matériel agricole classique</li> <li>• Basse teneur en contaminants</li> <li>• Basse teneur en intrants (azote, phyto)</li> <li>• Bilans énergétiques et environnementaux <i>a priori</i> assez positifs</li> <li>• Existence de plusieurs projets de recherche sur ces espèces</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concurrence pour l'usage des terres avec les cultures alimentaires et les autres filières de production de biomasse</li> <li>• <b>Faiblesses</b></li> <li>• <i>Miscanthus</i> : implantation coûteuse et délicate</li> <li>• Switchgrass : implantation délicate</li> <li>• Faisabilité (technique et économique) à l'échelle industrielle de la transformation en biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération encore à démontrer</li> <li>• <i>Miscanthus</i> : faible variabilité génétique des clones actuellement cultivés en Europe</li> <li>• Switchgrass : risque de comportement invasif à évaluer</li> <li>• Faisabilité d'une récolte d'automne, « en vert » à évaluer au niveau</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fortes teneurs en lignocellulose</li> <li>• <i>Miscanthus</i> : faibles teneurs en cendre et éléments minéraux permettant une valorisation en combustion</li> <li>• Switchgrass : capacité à recycler l'azote <i>via</i> des mécanismes de translocation/remobilisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pérennité des plantes et besoins en azote.</li> <li>• Cultures « nouvelles » et donc encore mal connues (génétique, écophysiole, maîtrise technique, impacts environnementaux)</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte demande en biocarburant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concurrence pour l'usage des</li> </ul>

<sup>221</sup> Lemus, R., and R. Lal. 2005. Bioenergy crops and carbon sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24(1):1-21.

<sup>222</sup> Styles, D., and M. B. Jones. 2007. Energy crops in Ireland: Quantifying the potential life-cycle greenhouse gas reductions of energy-crop electricity. *Biomass & Bioenergy* 31(11-12):759-72.

<sup>223</sup> St Clair, S., J. Hillier, and P. Smith. 2008. Estimating the pre-harvest greenhouse gas costs of energy crop production. *Ibid.* 32(5):442-52.

<sup>224</sup> Barney, J. N., and J. M. Ditomasso. 2008. Nonnative species and bioenergy: Are we cultivating the next invader? *Bioscience* 58(1):64-70.

## Questions de recherche sur Miscanthus et Switchgrass

- Etude de l'effet des facteurs agronomiques et génétiques sur la production et la qualité des plantes.
- Etude de la sélection, la diversification et l'amélioration génétique.
- Etude de l'effet des facteurs du milieu sur la production et la qualité des plantes.
- Optimisation de la gestion des intrants et des itinéraires techniques.
- Evaluation des impacts environnementaux (bilans de GES, impacts sur l'eau, etc.).
- Etude des techniques de transformation de la biomasse en biocarburant de 2<sup>ème</sup> génération.

### 4.3.2.6. Remplacement de l'hévéa

Actuellement, la recherche de sources alternatives de caoutchouc naturel est devenue un impératif<sup>225, 226,227</sup>. En effet, la diminution des surfaces de plantation, le manque de biodiversité génétique de l'hévéa, les problèmes très fréquents d'allergie aux protéines présentes dans le latex (médecine), la susceptibilité potentielle de l'hévéa au champignon pathogène *Microcyclus ulei*, la tendance générale vers une diminution de l'utilisation des dérivés du pétrole et une demande mondiale croissante de caoutchouc naturel (en particulier de la part de la Chine et de l'Inde) sont autant d'éléments incitatifs à cette recherche. En outre, la récolte du latex est un travail pénible qui ne peut être mécanisé et nécessite l'incision journalière d'une centaine d'arbres par travailleur.

La plante idéale devrait être annuelle, capable de croître rapidement et de produire une biomasse importante, avec une concentration élevée en caoutchouc. Les plantes les plus prometteuses sont la guayule (*Parthenium argentatum* Gray) et le pissenlit russe (*Taraxacum kok-saghyz*), deux plantes de la famille des *Asteraceae*, capables de se développer dans des climats tempérés<sup>228,229</sup>.

La guayule (*Parthenium argentatum* Gray) comme source de caoutchouc est connue depuis les temps précolombiens. Elle pousse dans les zones arides et semi-arides du Sud Ouest des Etats-Unis, du Nord du Mexique et dans les régions ayant un climat similaire, sous forme de buisson pérenne. Son latex, qui est formé essentiellement dans les cellules parenchymateuses de l'écorce, est hypoallergénique. Il est exploité commercialement par la société « Yulex Corporation ». Cette plante représente une bonne alternative à l'hévéa car elle fournit des quantités significatives (300 à 1 000 kg/ha/an contre 500 à 3 000 pour *H. brasiliensis*) de caoutchouc de haute qualité. Comme elle produit également des résines terpéniques, qui sont des pesticides naturels, elle est résistante à de nombreux agents pathogènes. De plus, sa culture est adaptée aux techniques de récolte mécanisée. Cependant, cette plante, introduite comme biennale ou multiannuelle, ne supporte pas les basses températures hivernales de nombreux pays européens et des Etats-Unis. L'exploitation de son caoutchouc est techniquement plus compliquée

<sup>225</sup> Sainte Beuve, J., M. De Lattre-Gasquet, H. Omont, E. Penot, P. Laburthe, and H. De Livonnière. 2000. What futures for the natural rubber commodity chain ? Pp. 103-17 in *The rubber industry entering a decade of changes (Proceedings of the International Rubber Forum 2000, Antwerp, Belgium, 9-10 November 2000)*, edited by Frank N. Kelley and Assembly of the International Rubber Study Group. London (GBR): IRSG (International Rubber Study Group).

<sup>226</sup> van Beilen, J.B., and Y. Poirier. 2007b. Guayule and Russian Dandelion as Alternative Sources of Natural Rubber. *Critical Reviews in Biotechnology* 27(4):217-31.

<sup>227</sup> van Beilen, J. B., and Y. Poirier. 2007a. Establishment of new crops for the production of natural rubber. *Trends in Biotechnology* 25(11):522-29.

<sup>228</sup> van Beilen, J.B., and Y. Poirier. 2007b. Guayule and Russian Dandelion as Alternative Sources of Natural Rubber. *Critical Reviews in Biotechnology* 27(4):217-31.

<sup>229</sup> van Beilen, J. B., and Y. Poirier. 2007a. Establishment of new crops for the production of natural rubber. *Trends in Biotechnology* 25(11):522-29.

que celle de l'hévéa. En effet, le caoutchouc est produit sous forme de particules de quelques microns dans les cellules parenchymateuses de l'écorce et non sous forme de latex pouvant s'écouler librement, ce qui nécessite un broyage de la plante. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour augmenter le rendement et la qualité du caoutchouc de cette plante.

Le pissenlit russe (*Taraxacum kok-saghyz*) est une plante pérenne, qui pousse en climat tempéré et donne du caoutchouc de haut poids moléculaire et de bonne qualité (150 à 500 kg/ha/an). La gomme est produite dans les laticifères des racines. Cependant, une récolte par incision n'étant pas possible, la plante doit être broyée. Le développement d'une culture plus rentable nécessiterait un croisement avec le pissenlit commun (*Taraxacum officinale*) afin d'obtenir des racines plus larges et donc plus faciles à récolter. Un autre inconvénient potentiel du pissenlit russe est la présence de protéines en quantités importantes dans le latex, ce qui élimine toute utilisation dans le domaine médical. Le pissenlit russe contient également d'autres produits comme l'inuline (25-40 % de la matière sèche) pouvant faire l'objet d'une exploitation.

Il existe d'autres sources potentielles de caoutchouc naturel<sup>230</sup>. Une recherche extensive entreprise à la fin des années 1920 par la « Edison Botanic Research Company » avait montré que la solidage (*Solidago canadensis*), une mauvaise herbe commune, produit environ 5 % de latex, mais fournit un caoutchouc de mauvaise qualité (masse moléculaire de 300 kDa). Une étude récente indique que la laitue (*Lactuca serriola*) contient de petites quantités de caoutchouc ayant un poids moléculaire voisin de celui de l'hévéa et de la guayule, mais le potentiel de cette plante comme source domestique de caoutchouc reste à démontrer. Parmi d'autres plantes, on peut citer *Ficus elastica* (« Indian rubber tree ») et *Ficus carica*, qui appartiennent à la famille des *Moraceae*. Le développement du figuier comme source alternative de caoutchouc est prometteur car il a une croissance rapide et une longue durée de vie. Il génère un grand volume de latex et se prête à une croissance végétative, un moyen de multiplier des arbres génétiquement modifiés. Cependant, les données concernant la biosynthèse du caoutchouc dans le figuier sont encore très réduites. L'évaluation de la quantité et de la qualité du polymère produit dans les particules de gomme du latex est un préalable au développement futur de cette plante.

Il est à noter que la gutta-percha provient du latex de certains arbres de Malaisie, du Pacifique Sud et d'Amérique du Sud, en particulier *Palaquium oblongifolia* et, jadis, *Palaquium gutta* et plusieurs espèces voisines de la famille des *Sapotaceae*. La gutta-percha est également un polymère de l'isoprène, mais à la différence du caoutchouc, il s'agit d'un isomère trans, ce qui le rend beaucoup moins élastique. Cette matière plastique naturelle, ayant l'apparence du cuir, est un excellent isolant (très utilisée auparavant dans la fabrication de câbles sous-marins).

Enfin, *Euphorbia lathyris* fait partie de la très large famille des Euphorbiacées, plantes dicotylédones ayant toutes en commun de posséder un suc laiteux, très toxique en raison de l'euphorbone qu'il contient. Il existe environ 2 300 espèces d'euphorbes. *Euphorbia lathyris* présente l'avantage de pouvoir être cultivée sur des sols arides et semi-arides, impropres à la culture de plantes destinées à l'alimentation. En dépit du travail de pionnier réalisé par Melvin Calvin (Prix Nobel de Chimie) dans les années 70, de nombreux aspects liés à la différenciation des laticifères (cellules spécialisées produisant le latex) ainsi qu'à la biosynthèse et à l'accumulation des triterpénoïdes restent largement inconnus. Ces connaissances ainsi que la mise au point de méthodes de transformation génétique d'*Euphorbia lathyris* sont indispensables si l'on veut augmenter la quantité de triterpénoïdes produits par cette plante, pour la production potentielle de biocarburant de troisième génération.

---

<sup>230</sup> Van Beilen et Poirier, 2007b. Guayule and Russian Dandelion as Alternatives Sources of Natural Rubber. *Critical Reviews in Biotechnology* 27(4):217-31.

Divers programmes de recherche et de développement sont en cours pour domestiquer et optimiser la production et la qualité du caoutchouc naturel.

- Projet EU-PEARLS, financé par la Communauté Européenne et coordonné par l'Université de Wageningen (Pays-Bas), qui a pour objectif le développement de nouvelles cultures pour la production de caoutchouc naturel en Europe.
- Recherches concernant la valorisation de la guayule, menées dans le cadre du Programme National USDA-ARS (#306) « Quality and Utilization of Agricultural Products », et réalisées par K. Cornish et al. au « Western Regional Research Center », Albany, CA (USA). Parmi les objectifs, il faut citer une approche d'ingénierie métabolique pour tenter d'améliorer la production et la qualité du caoutchouc produit par le tournesol (tiges et feuilles) et de créer des plants de tabac produisant du caoutchouc.

#### 4.3.3. Phyto-remédiation : les phytotechnologies

Le développement des activités industrielles, de l'extraction minière, de l'agriculture moderne et des activités militaires a conduit à une augmentation d'origine anthropogénique des pollutions organiques et inorganiques dans les sols et les eaux. Cette pollution qui affecte directement les végétaux met en danger tous les organismes vivants car les végétaux sont le point d'entrée de la chaîne alimentaire. Dans la seule Europe, environ 52 millions d'hectares sont affectés par des pollutions organiques ou métalliques<sup>231</sup>, comparativement aux 155 millions d'ha de la SAU<sup>232</sup>.

Jusqu'à présent la principale solution pour traiter les sols pollués consiste à excaver ces sols puis à les stocker dans des endroits dédiés. Ce type d'opération coûte environ 2 million \$/ha<sup>232</sup>. En raison de ce coût élevé, très peu de sites sont traités. Cette solution n'est en outre pas durable puisqu'elle se limite à déplacer la pollution, laissant le problème aux générations futures.

Les phytotechnologies proposent des méthodes alternatives intéressantes pour nettoyer ou pour stabiliser les sols pollués<sup>233</sup>. Aux Etats-Unis, l'agence de protection de l'environnement (EPA) et le ministère de l'énergie des USA (DOE) ont mis en place plusieurs programmes de recherche pour évaluer la faisabilité d'approches fondées sur l'utilisation des phytotechnologies (EPA 2000, <http://www.epa.gov>). Les résultats obtenus sont tout à fait prometteurs, particulièrement en ce qui concerne la phytodégradation de la pollution organique. Les plantes et la microflore associée peuvent assurer la biodégradation de polluants organiques en les métabolisant sous des formes moins toxiques<sup>234</sup>.

##### 4.3.3.1. Phytoremédiation des contaminants organiques

Les plantes peuvent métaboliser les polluants organiques au niveau de leurs racines. Des résultats intéressants ont été obtenus pour des herbicides, le trinitrotoluène, des éthers butyliques tertiaires ou le trichloréthylène. D'autres polluants organiques tels que le diphényle polychloré, les hydrocarbures aromatiques polycycliques ou d'autres dérivés de pétrole sont trop hydrophobes pour être pris en charge dans des cellules végétales. Dans ce cas, la microflore rhizosphérique assure la dégradation de

<sup>231</sup> Peuke, A. D., and H. Rennenberg. 2005. Phytoremediation - Molecular biology, requirements for application, environmental protection, public attention and feasibility. *Embo Reports* 6(6):497-501.

<sup>232</sup> Raskin, I. et Ensaly, B.D. 2000. Phytoremediation of toxic metals. John Wiley and Sons Pub., New York, 304 pp.

<sup>233</sup> Pilon-Smits, E. 2005. Phytoremediation. Pp. 15-39 in *Annual Review of Plant Biology*.

<sup>234</sup> Reichenauer, T. G., and J. J. Germida. 2008. Phytoremediation of Organic Contaminants in Soil and Groundwater. *Chemosuschem* 1(8-9):708-17.

ce type de polluant. Dans cette situation, les plantes sont employées pour favoriser le développement d'une flore microbienne riche dans le sol (phytostimulation). Ces approches se développent essentiellement sur des sols très remaniés (sites de stockage, sites industriels) aux propriétés physico-chimiques peu favorables à la croissance des plantes. La population de microorganismes rhizosphériques est dynamique, en compétition, et donc difficile à contrôler. La recherche et l'utilisation de bactéries endophytes, habitant naturellement les plantes, semble une approche prometteuse pour stabiliser la microflore bactérienne<sup>235</sup>. Ces approches dans lesquelles les plantes sont un support à une activité microbienne, elle-même responsable de la dégradation de polluants, sont déjà couramment utilisées. Un des exemples le plus frappant est l'utilisation de zones humides artificielles, souvent peuplées de roseaux et placées par exemple en aval de stations d'épuration, pour achever la purification des eaux. Ce type d'approche est qualifié de rhizofiltration. Plusieurs entreprises dont au moins deux entreprises françaises (Phytorem, Phytorestore) font commerce de solutions de dépollution fondées sur une association entre plantes et bactéries pour dépolluer des contaminations organiques.

#### 4.3.3.2. Phytoremédiation des contaminants métalliques : phytostabilisation et phytoextraction

Les phytotechnologies mises en œuvre pour traiter les sols pollués par des molécules organiques ne sont pas appropriées pour traiter la pollution par des métaux. Les métaux ne peuvent en effet pas être dégradés ; la pollution par les métaux est donc une « pollution terminale ». Les stratégies consistent donc soit à fixer les métaux, si possible dans une forme non toxique, soit à les déplacer, par exemple pour les diluer ou les concentrer.

Pour limiter la toxicité des métaux, la seule marge de manœuvre qui existe est de changer leur spéciation. Par exemple, l'oxydation de l'arsenic As(III) en As(V) est considérée comme un mécanisme de détoxification (World Health Organization); il est donc intéressant de convertir l'As(III) en As(V), ce que certaines bactéries peuvent réaliser<sup>236</sup>. Un changement de spéciation peut aussi avoir pour effet de modifier la solubilité du métal. Ainsi, à pH acide, l'aluminium est sous la forme  $Al^{3+}$  et il est soluble. Lorsque le pH est augmenté, l'aluminium est hydroxylé ou complexé et il devient insoluble. Des plantes sécrétant des acides organiques (citrate notamment) provoquent une complexation de l'aluminium et le rendent insoluble<sup>237</sup>. C'est un mécanisme « classique » de tolérance à l'aluminium. Modifier la solubilité d'un métal conduit à éviter qu'il ne soit entraîné par les eaux de surface ou qu'il n'atteigne la nappe phréatique.

Les approches qui visent à fixer les métaux dans le sol peuvent être qualifiées de phytostabilisatrices. Pour la phytostabilisation, il convient d'utiliser des plantes fortement tolérantes au métal présent dans le sol et possédant des systèmes racinaires importants. Il est en général possible de trouver des espèces végétales tolérantes à tel ou tel métal. Une difficulté apparaît cependant lorsque la pollution est polymétallique, ce qui est souvent le cas. Comme les mécanismes de tolérance sont en général spécifiques à un métal donné, il est rare de voir des espèces végétales qui présentent une tolérance à des concentrations élevées de plusieurs métaux simultanément. Il y a donc là une difficulté majeure qui incite à travailler sur la tolérance des plantes à plusieurs métaux. Par ailleurs, l'accumulation du métal dans les parties aériennes n'est pas souhaitable dans les approches de phytostabilisation, car elle

---

<sup>235</sup> Doty, S. L. 2008. Enhancing phytoremediation through the use of transgenics and endophytes. *New Phytologist* 179(2):318-33.

<sup>236</sup> Weeger, W., D. Lievremont, M. Perret, F. Lagarde, J. C. Hubert, M. Leroy, and M. C. Lett. 1999. Oxidation of arsenite to arsenate by a bacterium isolated from an aquatic environment. *Biometals* 12(2):141-49.

<sup>237</sup> Larsen, P. B., J. Degenhardt, C. Y. Tai, L. M. Stenzler, S. H. Howell, and L. V. Kochian. 1998. Aluminum-resistant *Arabidopsis* mutants that exhibit altered patterns of aluminum accumulation and organic acid release from roots. *Plant Physiology* 117(1):9-18.

pourrait mener à l'absorption de ce métal par les herbivores ce qui conduit plus généralement à un transfert des polluants à toute la faune et plus largement dans la chaîne alimentaire. Dans les approches de phytostabilisation, un enjeu important se trouve souvent dans le fait que les sols pollués par les métaux sont pauvres et que très peu de végétaux sont capables de pousser sur de tels sols, livrant ces sols à une forte érosion éolienne. Il peut alors être utile de recourir à des espèces végétales fonctionnant en symbiose avec des bactéries fixatrices d'azote, pour faciliter la colonisation des sols très pauvres. Lorsqu'on s'intéresse à des sols pollués par les métaux, il est utile que les bactéries fixatrices d'azote soient elles aussi tolérantes aux métaux.

Ces approches de phytostabilisation relèvent principalement de problématiques d'« aménagement écologique ». L'enjeu est alors de trouver l'espèce végétale appropriée, ce qui n'est pas toujours facile, et les conditions dans lesquelles implanter cette espèce<sup>238</sup>.

Il existe aussi des solutions pour dépolluer des sols contenant des métaux lourds toxiques. La solution consiste donc à les extraire du sol en utilisant des plantes et l'énergie solaire pour réaliser ce que l'on qualifie de phytoextraction. Les plantes absorbent les métaux dans leurs racines et les transportent vers leurs parties aériennes. Ces parties aériennes peuvent alors être récoltées et brûlées, ce qui permet de concentrer et récupérer les polluants métalliques. A la limite, on peut imaginer pouvoir utiliser des plantes comme procédé d'extraction minière<sup>239</sup>. Toutes les espèces végétales sont capables d'accumuler des métaux lourds dans leurs tissus. Cependant, l'efficacité d'absorption, qui est très variable d'une plante à l'autre, est en général trop faible pour que la phytoextraction soit « rentable ». Il existe un petit nombre d'espèces végétales qui ont la capacité d'hyper-accumuler des métaux dans leurs tissus aériens<sup>240</sup>. Ces espèces peuvent présenter des teneurs métalliques des parties aériennes 100 à 1 000 fois plus élevées que les espèces usuelles. Les teneurs maximales exprimées par référence au poids sec peuvent ainsi atteindre > 10 000 ppm pour le zinc, le cobalt, le manganèse ou le nickel et > 1 000 ppm pour le cadmium, le cuivre, le plomb ou le sélénium<sup>241</sup>. Le critère important à prendre en compte est le facteur de bioconcentration qui se définit comme le rapport entre la concentration en métal dans des parties aériennes et la concentration en métal dans le sol. Les plantes hyper-accumulatrices peuvent présenter des facteurs de bioconcentration de 20, alors que les plantes usuelles ont toujours des facteurs de bioconcentrations très inférieurs à 1. Il est important de noter que les espèces hyper-accumulatrices n'accumulent qu'un nombre réduit de métaux, habituellement un seul et au maximum trois. Cette observation est cohérente avec le fait que les métaux sont absorbés, pris en charge et transportés dans les plantes par des mécanismes en général totalement différents selon le métal considéré.

Les espèces hyper-accumulatrices de métaux ne sont cependant pas appropriées pour la phytoextraction car bien qu'elles aient un facteur de bioconcentration très élevé, leur biomasse est trop faible pour que le rendement d'extraction soit efficace. Une étude conduite sur *Thlaspi caerulescens* (Brassicacée), espèce hyper-accumulatrice de zinc et de cadmium dont le facteur de bioconcentration est de 20, a montré que le rendement au champ atteignait un maximum de 5 t/ha. Il faudrait alors une vingtaine de récoltes (soit 20 ans) pour diviser par deux la concentration en métal dans l'horizon

---

<sup>238</sup> Requena, N., E. Perez-Solis, C. Azcon-Aguilar, P. Jeffries, and J. M. Barea. 2001. Management of indigenous plant-microbe symbioses aids restoration of desertified ecosystems. *Applied and Environmental Microbiology* 67(2):495-98.

<sup>239</sup> Brooks, R. R., M. F. Chambers, L. J. Nicks, and B. H. Robinson. 1998. Phytomining. *Trends in Plant Science* 3(9):359-62.

<sup>240</sup> Baker, A.J.M., and R. Brooks. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements- a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1:81-126.

<sup>241</sup> Brooks, R. R., M. F. Chambers, L. J. Nicks, and B. H. Robinson. 1998. Phytomining. *Trends in Plant Science* 3(9):359-62.

superficiel de 20 centimètres du sol<sup>242</sup>. Si on utilisait une espèce non hyper-accumulatrice, il faudrait plus de cent récoltes pour atteindre le même but ! Il faut donc que les plantes présentent à la fois un facteur de bioconcentration élevé et une bonne production de biomasse pour que la phytoextraction puisse être mise en œuvre. Il n'existe pas encore d'espèce végétale remplissant ces deux critères.

Des travaux concernant l'accumulation des métaux dans les plantes en particulier les arbres (le peuplier et le saule semblent les plus adaptés) peuvent être évoqués<sup>243</sup> pour le stockage des métaux lourds dans la paroi des cellules du tronc ou des racines plutôt que dans les feuilles ou radicelles (le lien éventuel avec les propriétés mécaniques du bois serait à étudier). Les questions de mobilités saisonnières des métaux lourds entre organes (feuillage/tige/racines) et même au sein du bois<sup>244</sup> sont à étudier pour en déduire des stratégies de transformation.

### Questions de recherche dans le domaine des phytotechnologies

Les axes de recherche seraient donc :

- D'identifier de nouvelles espèces végétales capables de tolérer et d'accumuler les métaux ou de métaboliser des composés organiques.
- D'améliorer les plantes déjà connues pour présenter ces caractéristiques et améliorer significativement leur biomasse.
- D'améliorer les espèces à haut rendement en biomasse en leur conférant des caractères d'accumulation élevée de métaux lourds (tolérance) ou de dégradation de xénobiotiques
- D'identifier de nouvelles espèces de microorganismes bactériens et fongiques en interaction avec les plantes, capables de détoxifier les composés organiques et favorisant la croissance et l'implantation des plantes. Bien que ces quatre voies méritent d'être explorées, les deux dernières semblent les plus réalistes.

### Développement d'espèces génétiquement modifiées.

Les atouts de PGM seraient :

- critère ciblé,
- créer des plantes capables de pousser sur des sols hostiles,
- accélérer la domestication des espèces sauvages,
- systèmes enzymatiques réactifs pour produire des formes utilisables chimiquement ensuite.

La connaissance des mécanismes impliqués dans la tolérance des plantes aux métaux ou dans l'accumulation des plantes aux métaux, deux caractères qui ne sont pas nécessairement associés, est encore très parcellaire. De même les mécanismes de l'absorption et de la dégradation des xénobiotiques, ainsi que les interactions plantes-microorganismes bactériens et fongiques dans des milieux sous fortes contraintes édaphiques sont très limités. Il semble primordial de développer des recherches dans ces domaines pour proposer des solutions applicables à des problématiques de phytoremédiation. A plus long terme, pour mettre en application les solutions proposées, il sera probablement indispensable de recourir à l'utilisation de plantes génétiquement modifiées dans lesquelles les caractères de tolérance aux métaux et d'accumulation de métaux auront été importés.

<sup>242</sup> McGrath, S. P., and F. J. Zhao. 2003. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology* 14(3):277-82.

<sup>243</sup> Migeon, A., P. Richaud, F. Guinet, M. Chalot, and D. Blaudez. 2009. Metal Accumulation by Woody Species on Contaminated Sites in the North of France. *Water Air and Soil Pollution* 204(1-4):89-101.

<sup>244</sup> Laureysens, I., L. De Temmerman, T. Hastir, M. Van Gysel, and R. Ceulemans. 2005. Clonal variation in heavy metal accumulation and biomass production in a poplar coppice culture. II. Vertical distribution and phytoextraction potential. *Environmental Pollution* 133(3):541-51.



### Questions de recherche :

- Identifier puis caractériser physiologiquement et génétiquement des modèles végétaux « originaux » (plantes hyper-accumulatrices de métaux) utilisables dans d'autres contextes que leur contexte naturel.
- Avoir une connaissance fondamentale des mécanismes contrôlant la tolérance des plantes aux métaux et l'accumulation de métaux dans les plantes.
- Caractériser les mécanismes de l'absorption et de la détoxification de composés organiques dans les plantes.
- Identifier et caractériser des microorganismes rhizosphériques capables de dégrader les composés organiques.
- Caractériser les déterminants de l'interaction plantes-microorganismes rhizosphériques ou endosymbiotiques pour la production de biomasse et l'implantation dans des systèmes oligotrophes (bactéries fixatrices d'azote, mycorhizes tolérants aux métaux).
- Transférer à des plantes cultivables et à forte biomasse des caractères de tolérance aux métaux ou d'accumulation de métaux, ainsi que de détoxification de xénobiotiques identifiés chez des espèces modèles et faire des essais au champ.
- Développer des stratégies de tolérance efficace pour pouvoir obtenir des espèces végétales capables de pousser sur des sols présentant une pollution complexe : polymétallique, organique ou mixte.

Tableau 36 : analyse SWOT liée à la mise en œuvre de techniques de phytotechnologies, principalement pour les pollutions métalliques

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Caractéristiques des phytotechnologies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existence de dispositifs opérationnels dans le domaine de la phytoextraction et de la rhizofiltration</li> <li>• Existence d'une grande diversité d'espèces tolérantes aux métaux et hyperaccumulatrices de métaux et de bactéries dégradants des composés organiques</li> <li>• Existence d'une bonne complémentarité des compétences pour aborder en France ces questions (écologie, diversité, génétique, physiologie science du sol, chimie et biochimie, aménagement)</li> <li>• Marge de manœuvre <i>a priori</i> importante en termes d'espérance d'amélioration des caractères de tolérance aux métaux et d'accumulation de métaux, aussi bien qu'en termes de possibilités d'ingénierie génétique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peu d'espèces réellement adaptées à une mise en œuvre efficace d'approches de phytoextraction</li> <li>• Difficultés liées aux pollutions polymétalliques, et souvent à l'association de pollutions organiques et minérales</li> <li>• Difficulté de développer des approches de génétique moléculaire dans les espèces végétales hyperaccumulatrices de métaux</li> <li>• Difficulté de stabilisation de la microflore associée aux plantes, soit pour des activités métaboliques directes, soit pour en stimuler la croissance</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grenelle de l'Environnement, préoccupations environnementales, besoin de "technologies propres"</li> <li>• Développement de techniques d'analyse massive des génomes et de leur expression permettant l'accès aux déterminants génétiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficulté d'accès à des essais au champ</li> <li>• Utilisation à terme de Plantes Génétiquement Modifiées</li> <li>• Durée des processus de remédiation</li> </ul>

	<p>dans des espèces de plantes et de microorganismes « non-modèle »</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Existence d'un marché pour ces technologies (comme en atteste la présence de différentes entreprises sur ce créneau)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stabilité des interactions plantes-microorganismes</li> </ul>
--	--	--

#### 4.4. Stratégies d'amélioration génétique

Ce chapitre a pour objectif de définir les champs de recherche à ouvrir pour l'élaboration **par la voie du génie génétique** de végétaux aux propriétés nouvelles répondant à différents niveaux (environnemental, agronomique, compositionnel, technologique, commercial, etc.) aux besoins exprimés dans les tâches précédentes.

Le verrou fondamental pour disposer à terme d'une plante ou d'un organe adapté à nos besoins est de disposer d'une gamme de variabilité. L'apport de la transgénèse est de lever ce verrou de la variabilité, au delà de celle rencontrée dans les populations naturelles. C'est donc bien un outil complémentaire aux stratégies conventionnelles d'amélioration des plantes, fondé sur la variation génétique spontanée ou induite (mutagenèse) et couplé aux techniques de biologie moléculaire (QTL, sélection assistée par marqueurs).

Cette réflexion a été conduite en encourageant **une imagination créatrice**, menée indépendamment des obstacles à l'utilisation des OGM que nos sociétés ont construits et des restrictions à leur utilisation, éventuellement plus sévères encore, qui pourraient être imposées dans l'avenir. Notons que malgré ces obstacles, les plantes OGM actuellement commercialisées, ont été cultivées sur plus de 125 millions d'hectares en 2008 (ISAAA Brief 39 stats.).

De nombreux exemples témoignent du potentiel de la transgénèse des végétaux, pour des applications biotechnologiques:

- La production d'amidon enrichi en amylopectine chez la pomme de terre par la suppression de l'expression du « Granule-Bound Starch Synthase » (BASF, données non publiées). Ce type d'amidon a de nombreuses applications non-alimentaires (adhésifs, papier, textiles, construction, cosmétiques, etc.).
- L'augmentation par un facteur 6 du contenu en vitamine E (tocotriénol et tocophérol) des grains de maïs par la surexpression du gène d' « homogenistic acid geranyl geranyl transférase, HGGT » d'orge<sup>245</sup>.
- L'augmentation de la teneur en huile de la graine de colza par expression d'une glycérol-3-phosphate-déshydrogénase dans l'embryon : le facteur limitant est le glycérol-3-phosphate<sup>246</sup>.
- La production d'acides gras insaturés à chaîne longue omega-3 chez le soja par l'introduction de 5 nouvelles étapes enzymatiques issues respectivement d'une micro-algue (*Mortierella alpina*) et d'un champignon (*Fusarium*) : Kinney et coll. Dupont, données non publiées.
- Le doublement de la production de sucre par la canne à sucre (également pour la racine de carotte) par accumulation d'un isomère du saccharose (liaison  $\alpha$ -1,2) grâce à l'introduction d'un gène d'isomérase bactérien qui réalise sa conversion en isomaltulose (liaison  $\alpha$ -1,6)<sup>247</sup>.

<sup>245</sup> Cahoon, E. B., S. E. Hall, K. G. Ripp, T. S. Ganzke, W. D. Hitz, and S. J. Coughlan. 2003. Metabolic redesign of vitamin E biosynthesis in plants for tocotrienol production and increased antioxidant content. *Nature Biotechnology* 21(9):1082-87.

<sup>246</sup> Vigeolas, H., P. Waldeck, T. Zank, and P. Geigenberger. 2007. Increasing seed oil content in oil-seed rape (*Brassica napus* L.) by over-expression of a yeast glycerol-3-phosphate dehydrogenase under the control of a seed-specific promoter. *Plant Biotechnology Journal* 5(3):431-41.

- Production de poly-hydroxybutyrate (PHB) dans les plastes de racines (hairy-root) de betterave ce qui permet d'atteindre des concentrations élevées (5 % du poids sec)<sup>248</sup>.
- Multiples modifications quantitatives et qualitatives des voies de synthèse des lignines par génie génétique<sup>249</sup>.
- Amélioration de l'assimilation azotée et donc de la croissance (+21-41 %) chez le peuplier en surexprimant une glutamine synthétase<sup>250</sup>. Cette stratégie conduit simultanément à une meilleure tolérance au stress hydrique<sup>251</sup> et au traitement par un herbicide total (phosphinothricine<sup>252</sup>).
- Amélioration de l'assimilation de l'azote et de la croissance en conditions de faible apport azoté<sup>253</sup>.
- Transfert d'une voie métabolique complète de biosynthèse des caroténoïdes chez le maïs<sup>254</sup>. Il est possible d'obtenir grâce à la transgénèse des taux de caroténoïdes très supérieurs à ce qu'il est envisageable d'obtenir par sélection classique (comme décrit dans Harjes *et al.*<sup>255</sup>).

### Verrous et questions de recherche pour les méthodes conventionnelles

A partir des questions de recherche recensées précédemment, ce chapitre aborde les méthodes conventionnelles, dont l'application va certes bien au delà des bioénergies et de la chimie verte. L'amélioration des plantes consiste à exploiter la variabilité naturelle ou induite par mutation en croisant des plantes dont on va ensuite sélectionner la descendance sur la base d'un phénotype. Cette variabilité naturelle est maintenue soit *in situ* soit dans des collections publiques ou privées.

Un problème récurrent est de maintenir ces collections sur le long terme. L'apport de la biologie moléculaire permet de caractériser ces collections, d'associer un gène ou un marqueur moléculaire à un trait et d'assister la sélection. La première étape est donc de repérer les gènes et marqueurs d'intérêt. La seconde est de réaliser les croisements, quelquefois en croisant des espèces différentes. La dernière étape est la sélection proprement dite.

<sup>247</sup> Wu, L. G., and R. G. Birch. Ibid. Doubled sugar content in sugarcane plants modified to produce a sucrose isomer. (1):109-17.

<sup>248</sup> Menzel, G., H. J. Harloff, and C. Jung. 2003. Expression of bacterial poly (3-hydroxybutyrate) synthesis genes in hairy roots of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Applied Microbiology and Biotechnology* 60(5):571-76.

<sup>249</sup> Vanholme, Ruben, Kris Morreel, John Ralph, and Wout Boerjan. 2008. Lignin engineering. *Current Opinion in Plant Biology* 11(3):278-85.

<sup>250</sup> Jing, Z. P., F. Gallardo, M. B. Pascual, R. Sampalo, J. Romero, A. T. de Navarra, and F. M. Canovas. 2004. Improved growth in a field trial of transgenic hybrid poplar overexpressing glutamine synthetase. *New Phytologist* 164(1):137-45.

<sup>251</sup> El-Khatib *et al.*, 2004. Transgenic poplar characterized by ectopic expression of a pine cytosolic glutamine synthetase gene exhibits enhanced tolerance to water stress. *Tree Physiology* 24(7) 729-36.

<sup>252</sup> Pascual, M. B., Z. P. Jing, E. G. Kirby, F. M. Canovas, and F. Gallardo. 2008. Response of transgenic poplar overexpressing cytosolic glutamine synthetase to phosphinothricin. *Phytochemistry* 69(2):382-89.

<sup>253</sup> Yanagisawa, S., A. Akiyama, H. Kisaka, H. Uchimiya, and T. Miwa. 2004. Metabolic engineering with Dof1 transcription factor in plants: Improved nitrogen assimilation and growth under low-nitrogen conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101(20):7833-38.

<sup>254</sup> Zhu, C. F., S. Naqvi, J. Breitenbach, G. Sandmann, P. Christou, and T. Capell. 2008. Combinatorial genetic transformation generates a library of metabolic phenotypes for the carotenoid pathway in maize. *Ibid.* 105(47):18232-37.

<sup>255</sup> Harjes, C. E., T. R. Rocheford, L. Bai, T. P. Brutnell, C. B. Kandianis, S. G. Sowinski, A. E. Stapleton, R. Vallabhaneni, M. Williams, E. T. Wurtzel, J. B. Yan, and E. S. Buckler. 2008. Natural genetic variation in lycopene epsilon cyclase tapped for maize biofortification. *Science* 319(5861):330-33.

L'identification de gènes ou de QTL responsables des caractères recherchés, n'est qu'une première étape du processus d'amélioration des plantes. Cette démarche est le plus souvent le résultat de l'analyse de croisements entre génotypes présentant des différences phénotypiques associées à une analyse génotypique des descendants, mais elle n'est pas toujours réaliste, notamment avec des espèces à long cycle de vie (telles les arbres) ou difficiles de croiser. La détermination de QTL est un travail lourd qui demande à être complété par une validation du QTL, par exemple en isolant le caractère dans des lignées quasi isogéniques, ou/et en clonant le gène responsable par clonage positionnel ou toute autre stratégie. La création de lignées recombinantes inbred (RIL), de lignées quasi isogéniques (NIL) et de lignées de substitution de segments de chromosomes (CSSL) constitue un outil important tant pour caractériser les QTL que pour les exploiter en amélioration.

Lorsque ces analyses ne sont pas possibles, une alternative est l'exploitation de populations naturelles. On peut, dans ces cas, développer des stratégies de génétique d'association, encore peu utilisées chez les plantes car elles nécessitent des ressources moléculaires. On peut cependant présumer que ces approches vont se développer dans un futur proche avec l'acquisition des données de génomique, y compris chez les arbres. Le développement de la génomique comparative, en particulier chez les céréales conduit à la recherche de méta-QTL qui permettent d'accélérer la recherche des gènes candidats sous-jacents, et donc leur prise en compte dans les croisements. Une fois les gènes d'intérêt identifiés, il faut disposer d'une variété allélique naturelle ou induite pour laquelle le phénotype conféré par les différents allèles est connu.

Une façon de suppléer une variabilité naturelle insuffisante est de mettre en œuvre des stratégies de mutagenèse associée au TILLING (Targeted Induced Local Lesions IN Genomes). On peut ainsi repérer un mutant ponctuel dans un gène donné dont la séquence est connue. Des collections de mutants pour TILLING ont été élaborées pour de nombreuses espèces et complètent les ressources disponibles dans les centres de ressources génétiques qui existent pour pratiquement chaque grande espèce cultivée. Le TILLING est parfois présenté comme une alternative à la transgénèse. Cependant ce type de stratégie ne peut s'appliquer qu'à des gènes déjà présents dans l'espèce considérée, et elle ne dispense pas d'un lourd travail de retro-croisement pour éliminer les autres mutations présentes dans le génome.

Il reste ensuite à passer de cette information à une stratégie d'amélioration. Celle-ci va dépendre bien évidemment du mode de reproduction de l'espèce considérée et des connaissances et outils disponibles pour choisir entre une stratégie « classique » ou une stratégie de sélection assistée par marqueurs (SAM). L'application de la SAM à un problème quelconque requiert que l'on investisse sur la recherche de marqueurs aussi faciles d'utilisation que possible et pour un coût réduit, ce qui est maintenant disponible pour des espèces comme le maïs. La sélection pour des caractères complexes est difficile et il est donc indispensable de disséquer ces caractères complexes en leurs déterminants élémentaires. Ainsi pour comprendre la dégradabilité et la fermentescibilité d'une paroi végétale, il faudra d'abord comprendre comment et à partir de quoi elle se met en place et quels sont les facteurs de régulation génétique qui interviennent. A partir de là, découleront les stratégies d'amélioration et le choix des combinaisons alléliques à conserver.

La SAM s'effectue actuellement en utilisant des marqueurs de type RFLP et microsatellites ; avec l'accumulation de données de séquences, les marqueurs de type SNP vont être de plus en plus utilisés. Il va falloir disposer d'outils performants pour génotyper les individus d'une descendance : une deuxième génération d'outils est constitué par les puces de génotypage, qui pourront être supplantées par les outils de séquençage à très haut débit. La sélection pour des caractères complexes est difficile et il sera sans doute nécessaire de développer de nouveaux outils informatiques pour définir des plans

de croisement et en suivre les descendance.

Il est parfois nécessaire d'introduire des gènes à partir d'espèces sauvages ou cultivées voisines, mais souvent des barrières de stérilité existent dont les mécanismes sont mal connus. Un exemple classique est constitué par la difficulté à croiser les riz *indica* et *japonica*, ou encore les riz asiatiques (*O. sativa*) et africains (*O. glaberrima*).

Pour augmenter le rendement, on fait souvent appel à l'hétérosis et à la production d'hybrides. Pour assurer une production reproductible des hybrides, il est nécessaire de maîtriser la reproduction et d'utiliser des lignées mâles stériles. L'importance des hybrides dans la culture du maïs ou du tournesol n'est plus à souligner. Elle se développe maintenant chez le riz en Chine, sur le colza (50 % de la production française est maintenant hybride, basée sur le système de stérilité Ogura, breveté par l'INRA). Tout ce qui a trait aux systèmes de reproduction (compatibilité pollinique, barrières de stérilité, stérilité mâle cytoplasmique, contrôle des appariements en méiose, contrôle des taux de recombinaison, dioécie, monoécie, dichogamie,...) doit faire l'objet de recherches soutenues. Les recherches sur la recombinaison peuvent aussi avoir des retombées sur la transgénèse, par exemple en ciblant une région du génome.

Pour la majorité des grandes cultures, le matériel génétique utilisé par l'agriculteur est la graine, produite le plus souvent par l'industrie semencière. Cependant, d'autres situations peuvent exister comme chez des espèces avec un cycle reproducteur très long (par exemple les arbres) ou sans possibilité d'obtention de lignées recombinantes pour hybrides F1 (par exemple en cas de problèmes de dépression de consanguinité). Dans ces cas, il serait intéressant de disposer d'un outil basé sur l'apomixie pour la diffusion d'un génotype intéressant. La multiplication *in vitro* peut aussi être envisagée si elle n'est pas trop coûteuse.

#### **4.4.1. Questions spécifiques au métabolisme primaire**

##### **4.4.1.1. Plantes améliorées pour la production de biopolymères**

Plusieurs types de polymères sont actuellement produits à partir de végétaux : l'amidon, les protéines de réserve, les polysaccharides pariétaux, les lignines, le latex. La transgénèse permet également de produire dans la plante des polymères d'origine non végétale comme la soie, la cyanophycine et les polyhydroxyalkanoates (PHA). Finalement, les plantes peuvent être utilisées comme source de molécules substrats pour la fabrication de bioplastiques par voie chimique ou par biotechnologie blanche (par exemple, PHA, Acide Polylactique (PLA) ou Polyesters).

###### **4.4.1.1.1. L'amidon**

Sa production ou son extrahibilité peuvent être améliorées pour différents types d'application. A titre d'exemple :

- Le rapport amylose/amylopectine peut être modifié soit par génétique réverse (par exemple par tilling) soit par transgénèse. Chez les espèces auto-polyploïdes comme la pomme de terre, la transgénèse est la seule façon réaliste de parvenir à une telle modification.
- Il est également envisageable d'utiliser la capacité de stockage sous forme condensée du grain d'amidon, pour y introduire de nouvelles liaisons (comme la cyclodextrine) ou d'autres monomères.
- La modification de la dessiccation du grain d'amidon : l'expression de protéines (LEA, BSA,...) peut favoriser selon les usages la rétention de l'eau ou son exclusion (dans l'optique d'économies d'énergies au cours des procédés industriels).

- Les flux de carbone entre tiges et feuilles ainsi que la compartimentation intracellulaire du saccharose et/ou de l'amidon peuvent être manipulés en s'intéressant aux transporteurs de saccharose (SUT<sup>256</sup>).

#### 4.4.1.1.2. Les protéines

Le premier verrou est la réduction de l'hétérogénéité moléculaire pour simplifier les procédés d'extraction : le défi serait la suppression de certaines protéines en faveur de l'expression d'autres, sans toutefois empêcher la germination. Dans cet objectif, les protéines pourraient aussi être adressées dans des compartiments ciblés au niveau tissulaire ou cellulaire (corpuscules protéiques).

Un autre verrou est lié aux difficultés de séparation à partir d'extraits protéiques totaux, des fractions protéiques d'intérêt par des méthodes simples, facilement transposables à l'échelle industrielle. L'introduction, par voie génétique, d'étiquettes appropriées dans la séquence pourrait permettre de simplifier ces procédés.

Le dernier verrou est l'étroitesse des propriétés d'usages des protéines des variétés sauvages.

- Une première solution consiste à modifier chimiquement les chaînes latérales. Il serait avantageux de réaliser certaines de ces modifications *in planta* en favorisant des modifications post-traductionnelles comme par exemple la glycosylation. L'étude de ces modifications représente un véritable enjeu scientifique<sup>257</sup>.
- la seconde solution est l'utilisation des plantes système d'expression de protéines à usage thérapeutique<sup>258,259,260,261</sup> ou pour l'expression de protéines utilisées comme polymères dans des matériaux<sup>262,263,264</sup>. Des propriétés mécaniques uniques sont obtenues avec certains domaines de protéines, en particulier de l'élastine ou des soies. Ces propriétés sont comparables, voire supérieures à celles obtenues avec les polymères les plus performants. Des travaux récents sont engagés pour optimiser les rendements d'expression de ce type de protéines dans le grain de maïs et faciliter leur purification<sup>265,266</sup>.

<sup>256</sup> Payyavula, R., R. Sykes, M.F. Davis, C.J. Tsai, and Harding S. 2009. Down-regulation of a sucrose transporter perturbs carbon allocation, growth and phenylpropanoid homeostasis in *Populus*. in *2009 IUFRO Tree Biotechnology International Conference*, edited by Whistler. Whistler (British Columbia - Canada).

<sup>257</sup> Kermode, A. R. 2006. Plants as factories for production of biopharmaceutical and bioindustrial proteins: lessons from cell biology. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique* 84(4):679-94.

<sup>258</sup> Ramessar, K., M. Sabalza, T. Capell, and P. Christou. 2008. Maize plants: An ideal production platform for effective and safe molecular pharming. *Plant Science* 174(4):409-19.

<sup>259</sup> Ramessar, K., T. Capell, and P. Christou. 2008. Molecular pharming in cereal crops. *Phytochemistry Reviews* 7:579-92.

<sup>260</sup> Takaiwa, F., H. Takagi, S. Hirose, and Y. Wakasa. 2007. Endosperm tissue is good production platform for artificial recombinant proteins in transgenic rice. *Plant Biotechnology Journal* 5(1):84-92.

<sup>261</sup> Lienard, D., C. Sourrouille, V. Gomord, and L. Faye. 2007. Pharming in transgenic plants. *Biotechnology Annual Review* 13:115-47.

<sup>262</sup> Van Beilen, J. B., and Y. Poirier. 2008. Production of renewable polymers from crop plants. *Plant Journal* 54(4):684-701.

<sup>263</sup> Scheller, J., and U. Conrad. 2005. Plant-based material, protein and biodegradable plastic. *Current Opinion in Plant Biology* 8(2):188-96.

<sup>264</sup> Floss, D.M., K. Schallau, S. Rose-John, U. Conrad, and J. Scheller. 2009. Elastin-like polypeptides revolutionize recombinant protein expression and their biomedical application. *Trends in Biotechnology* 28(1):37-45.

<sup>265</sup> Zhang, C., C. E. Glatz, S. R. Fox, and L. A. Johnson. 2009a. Fractionation of Transgenic Corn Seed by Dry and Wet Milling to Recover Recombinant Collagen-Related Proteins. *Biotechnology Progress* 25(5):1396-401.

Tableau 37 : analyse SWOT appliquée à l'utilisation des OGM pour la production de protéines

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Diagnostic interne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilité de modifier l'équilibre des composants de réserve pour favoriser la production de protéines</li> <li>• Production en grande quantité et à faible coût</li> <li>• Possibilité d'exprimer des protéines hétérologues (optimisées par génie génétique par exemple)</li> <li>• Expression des protéines dans des compartiments ciblés (amélioration de l'extraction, réduction du risque délétère)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effet délétère possible sur la croissance</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Production d'enzymes aux propriétés catalytiques d'intérêt (exemple d'une protéine pour le TILLING)</li> <li>• Production de protéines d'intérêt thérapeutique</li> <li>• Production de protéines aux propriétés mécaniques très remarquables pour des utilisations « matériaux » par exemple dans le secteur biomédical (ex soie d'araignée, élastine, protéines chimères)</li> <li>• Besoin de protéines aux propriétés physico-chimiques particulières (ex soie d'araignée)</li> <li>• Utilisation de polypeptides comme intercalant dans les matériaux biosourcés, avec hydrolyse possible par des protéases (recyclage)</li> <li>• Perception positive des produits dérivés du végétal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque associé aux propriétés allergènes des protéines</li> <li>• Concurrence avec les autres stratégies de production de protéines hétérologues (microorganismes, animaux)</li> <li>• Perception négative des OGM</li> </ul>

### Questions de recherche

Pour répondre à cet objectif, les recherches doivent permettre de:

- Contrôler la régulation de l'expression des protéines de réserve dans les graines et leur adressage.
- Evaluer le potentiel physiologique de différentes espèces végétales (céréales, légumineuses, crucifères) à exprimer des protéines ayant des séquences définies « *de novo* » (site de clivage, tag, séquences répétées,...). Dans le cas des protéines à propriétés élastomériques, on examinera en particulier la capacité de ces espèces à exprimer des protéines à motifs plus ou moins répétés et on exploitera la séquence répétée très polymorphe des protéines de réserve des céréales (zéïnes, gliadines, gluténines).

<sup>266</sup> Zhang, C., C. E. Glatz, S. R. Fox, and L. A. Johnson. 2009b. Purification and characterization of a transgenic corn grain-derived recombinant collagen type I alpha 1. *Biotechnology Progress* 25(6):1660-68.

- Définir des constructions (promoteur, étiquette,...) optimisées dans le but de faciliter les stratégies de purification (surexpression, adressage des protéines dans des tissus/organelles cibles, fractionnement physicochimique simplifié).
- Maîtriser certaines modifications post-traductionnelles (en particulier la glycosylation).

#### 4.4.1.1.3. Les parois végétales

Il existe une grande plasticité dans la composition des parois. Leur architecture et leur composition sont très variables selon le type cellulaire et l'espèce, démontrant une grande plasticité pour assurer les fonctions de tissu de soutien et de tissu conducteur. Les analyses interspécifiques montrent qu'il existe plusieurs solutions pour obtenir des parois avec des propriétés biophysiques compatibles avec une croissance et un développement normal de plantes. Il existe donc une marge de manœuvre importante pour l'adaptation de la composition pariétale aux besoins de la bioraffinerie tout en préservant des bonnes performances agronomiques des cultures.

On peut citer des exemples de modifications de la structure moléculaire des parois :

- L'incorporation de certains polysaccharides solubles dans la paroi comme les hyaluronanes (surexpression de la glutamine-fructose-6-phosphate transaminase et de la hyaluronane synthase) permet de créer des cavités entre les microfibrilles de cellulose au cours de la saccharification (par dissolution). L'accès à la cellulose des cellulases et autres catalyseurs est ainsi facilité (jusqu'à 60 % d'amélioration de l'efficacité de la saccharification démontrée chez le tabac<sup>267,268</sup>).
- L'expression de cellulases (CBH, EG, BGL de *Trichoderma reesei*) directement dans des plantes transgéniques est possible sans affecter la croissance et le développement<sup>269</sup>. C'est l'expression inductible par l'éthanol (promoteur AlcA) de protéines virales (Rep) capables de circulariser les ARNm qui ouvre ces perspectives. Des constructions géniques encadrées par des séquences reconnues par Rep et dans lesquelles le promoteur et le terminateur sont placés entre les exons du gène de cellulase ne peuvent pas s'exprimer après intégration. En présence d'éthanol, des protéines Rep sont produites et les constructions sont alors circularisées. Ces molécules d'ADN circulaires sont alors transcrites par les cellules (production inductible de cellulases).

#### Questions de recherche

Elles se posent à plusieurs niveaux : ceux de la cellule, des tissus, de la plante entière. Les objectifs peuvent se situer aux niveaux :

- **Moléculaire**, quand il s'agit de maximiser l'accumulation de polymères d'intérêt, la production de polymères hétérologues, etc.
- **Assemblage moléculaire**, si l'on désire manipuler l'organisation supramoléculaire soit pour obtenir de nouvelles propriétés d'usage des assemblages, soit pour améliorer l'extractibilité et la digestibilité des polymères.
- **Cellulaire**, pour améliorer les propriétés des fibres textiles, papier, matériaux composites.

<sup>267</sup> Abramson, M., N. Barimboim, M. Dekel, Z. Shani, and O. Shoseyov. 2009. The Trojan horse: a novel transgenic approach to increase efficiency of cell wall saccharification. Pp. poster P34 in *2009 IUFRO Tree Biotechnology International Conference*, edited by Whistler. Whistler (British Columbia - Canada).

<sup>268</sup> Shani, Z., Dekel, M., Tsabary, G., et al. 2004. Growth enhancement of transgenic poplar plants by overexpression of *Arabidopsis thaliana* endo-1,4- $\beta$ -glucanase (*cel1*). *Molecular Breeding* 14(3):321-330.

<sup>269</sup> Coleman, H., M. Hinkema, K. Shand, B. Dugdale, and J. Dale. 2009. In plant activation of cellulose enzymes for biofuels production. Pp. poster P35 in *2009 IUFRO Tree Biotechnology International Conference*, edited by Whistler. Whistler (British Columbia - Canada).



- **Supracellulaire**, quand la modification porte sur les propriétés du bois.

### **La cellulose**

Des variations importantes de teneur en cellulose peuvent être observées selon l'espèce et le type cellulaire allant de 10 % (albumen du blé) jusqu'à 85-95 % (la fibre de coton, les fibres de phloème du chanvre, du ramis ou du lin, le bois de tension, etc). La teneur en cellulose de la biomasse reflète à la fois la teneur en cellulose dans les types cellulaires la constituant et la proportion de ces différents types cellulaires au sein des tissus. Des études principalement sur *Arabidopsis* montrent que différentes combinaisons de facteurs de transcription (de véritables réseaux, une quarantaine de facteurs impliqués, Ko *et al.*<sup>270</sup> contrôlent le dépôt de la paroi secondaire dans différents types cellulaires<sup>271</sup>. Il est donc envisageable de transposer une paroi secondaire avec une composition donnée à un autre type cellulaire et de manipuler ainsi la composition de la biomasse.

La manipulation de la teneur en cellulose d'une cellule donnée est compliquée par le fait que les complexes cellulose synthase (CSC) comprennent au moins 3 sous-unités, qui sont régulées aux niveaux transcriptionnel et post-transcriptionnel. Les microfibrilles de cellulose sont constituées de chaînes parallèles de  $\beta$ -1,4 glucanes (probablement 36). Le déterminisme de la cristallinité des microfibrilles reste mal compris et peut être influencé par les propriétés des CSC et/ou la présence d'autres polysaccharides pendant l'association des microfibrilles. L'orientation de microfibrilles est contrôlée par l'orientation des microtubules corticaux. Le contrôle de l'orientation de ces derniers est encore mal compris, mais fait intervenir une perception des stress mécaniques au sein des tissus<sup>272</sup>. Une meilleure compréhension de ces processus cellulaires est indispensable pour la manipulation raisonnée de l'accumulation de cellulose dans les parois. Des stratégies de type micropuce pour examiner les différences entre bois de tension et bois normal (teneurs et propriétés des celluloses très différentes) ou des méthodes VIGS (Virus Induced Gene Silencing) doivent permettre d'identifier et de mieux comprendre le rôle des multiples gènes impliqués<sup>273</sup>. L'intérêt des EGases (endo-1,4- $\beta$ -glucanases) et des CBDs (Cellulose-Binding Domain) dans ce domaine est grandissant. La répression du gène *Korrigan* chez le peuplier et l'épicéa conduit ainsi à diminuer la teneur des parois en cellulose mais celle-ci est beaucoup plus cristalline<sup>274</sup>.

La transformation de la cellulose en sucres fermentescibles nécessite la production en masse de cellulase qui présente un coût énergétique et financier. Une alternative est la production par la plante elle-même, après transformation, de ces enzymes qui peuvent être accumulées dans le réticulum endoplasmique ou les mitochondries<sup>275,276</sup>.

---

<sup>270</sup> Ko, J.H., W. Kim, H.T. Kim, H.G. Mang, and K.H. Han. Ibid. Hierarchical transcriptional regulatory network that controls secondary wall biosynthesis.

<sup>271</sup> Zhong, R. Q., C. H. Lee, J. L. Zhou, R. L. McCarthy, and Z. H. Ye. 2008. A Battery of Transcription Factors Involved in the Regulation of Secondary Cell Wall Biosynthesis in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 20(10):2763-82.

<sup>272</sup> Hamant, O., M. G. Heisler, H. Jonsson, P. Krupinski, M. Uyttewaal, P. Bokov, F. Corson, P. Sahlin, A. Boudaoud, E. M. Meyerowitz, Y. Couder, and J. Traas. 2008. Developmental Patterning by Mechanical Signals in *Arabidopsis*. *Science* 322(5908):1650-55.

<sup>273</sup> Chandrasekhar, J. 2009. Genetic engineering of poplars for biofuel production via altered synthesis of cellulose. in *2009 IUFRO Tree Biotechnology International Conference*, edited by Whistler. Whistler (British Columbia - Canada).

<sup>274</sup> Maloney, V.J., and S. D. Mansfield. 2009. Characterization and varied expression of a membrane-bound endo-beta-1,4-glucanase in hybrid poplar and white spruce. in *2009 IUFRO Tree Biotechnology International Conference*, edited by Whistler. Whistler (British Columbia - Canada).

<sup>275</sup> Mei, C., S.H. Park, R. Sabzikar, C. Qi, C. Ransom, and M. Sticklen. 2008. Green tissue-specific production of a microbial endo-cellulase in maize (*Zea mays* L.) endoplasmic-reticulum and

## **Les hémicelluloses**

Les hémicelluloses sont souvent O-acétylés. L'acétyl, libéré pendant la dégradation de la paroi, inhibe l'activité microbienne pendant la fermentation des hydrolysats. Le degré d'acétylation des hémicelluloses est donc une autre cible importante. On peut soit envisager de manipuler les acétyltransférases dans l'appareil de Golgi, soit d'exprimer des acétylsterases dans la paroi.

Les pentoses ne sont fermentés par les levures utilisées pour la production d'éthanol qu'après transformation génétique. Il serait cependant intéressant de réduire la teneur en pentoses en remplaçant les xylanes par les mannanes dans les parois. Ceci nécessiterait d'exprimer les enzymes de biosynthèse de mannanes dans un fond génétique mutant pour la synthèse de xylanes.

Avec leurs propriétés physicochimiques intéressantes, les galactomannanes ont de nombreuses applications agroalimentaires et non alimentaires. Elles sont normalement extraites à partir de graines de légumineuses. La production de galactomannanes à grande échelle dans des espèces cultivées comme le soja, par la surexpression des enzymes de biosynthèse, est envisageable (ex. Pioneer Hybrid<sup>277</sup>).

## **Les pectines et les AGP**

Les pectines sont largement utilisées dans l'industrie agroalimentaire. Les pectines à partir d'agrumes sont en général de haute qualité grâce au faible taux d'acétylation et de branchement avec des chaînes latérales neutres. En revanche, d'autres espèces comme la betterave produisent des pectines de faible qualité sans valeur marchande. La modification du taux d'acétylation ou de branchement des pectines dans ces espèces permettrait de valoriser les déchets des sucreries.

Les « Arabinogalactan proteins » (AGP) sont des protéoglycanes avec des structures glycanes complexes mais très stéréotypées. Par exemple, la gomme arabique a une structure 3D en disque avec des propriétés physicochimiques intéressantes pour la production de colle, d'encre et éventuellement d'autres applications industrielles. Actuellement la gomme arabique est récoltée à partir d'Acacia. Il est envisageable de produire ces AGP en grande quantité dans des espèces cultivées mais ceci nécessitera une meilleure connaissance de leur biosynthèse.

## **Les lignines**

La manipulation de la quantité et/ou de la qualité est possible avec ou sans effets négatifs sur la croissance et le développement de la plante selon la nature de la modification. Ainsi la réduction du niveau d'expression de l'enzyme Cinnamyl Alcohol Dehydrogénase chez le peuplier a permis de modifier la composition et d'augmenter l'extractibilité de la lignine sans affecter la croissance et la résistance aux pathogènes des arbres<sup>278</sup>. La teneur en lignine et en hémicelluloses a également pu être

---

mitochondria converts cellulose into fermentable sugars. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 84:689-95.

<sup>276</sup> Sticklen, M. B. 2008. Plant genetic engineering for biofuel production: towards affordable cellulosic ethanol. *Nature Reviews Genetics* 9(6):433-43.

<sup>277</sup> Dhugga, K. S. 2004. Golgi polysaccharide synthesis in plants: Roles in feed, food, and industrial applications. *Abstracts of Papers of the American Chemical Society* 227:U277-U77.

<sup>278</sup> Pilate, G., E. Guiney, K. Holt, M. Petit-Conil, C. Lapiere, J. C. Leple, B. Pollet, I. Mila, E. A. Webster, H. G. Marstorp, D. W. Hopkins, L. Jouanin, W. Boerjan, W. Schuch, D. Cornu, and C. Halpin.

réduite en réprimant l'expression de la CCR (cinnamoyl-CoA-reductase). Les procédés de délignification pour la pâte<sup>279</sup> et de saccharification pour le bioéthanol<sup>280</sup> sont plus efficaces mais la croissance est perturbée. On peut aussi citer les travaux de Chapple et al.<sup>281</sup> et de Weng et al.<sup>282</sup>

La majorité des enzymes de biosynthèse est connue. En revanche, les mécanismes de régulation des voies restent largement inconnus ainsi que le rapport avec d'autres voies métaboliques et le développement de la plante. Les verrous dans ce domaine sont la régulation du dépôt de lignine et la spécificité cellulaire, le transport de monolignols et la polymérisation par l'intermédiaire des laccases et peroxydases, ainsi que les méthodes permettant la modification de la quantité et de la composition de lignine. La grande plasticité du polymère laisse penser qu'il devrait être possible à terme d'introduire de nouveaux monomères afin de produire des lignines avec de nouvelles propriétés chimiques, par exemple des lignines plus faciles à dépolymériser. L'incorporation de peptides dans la lignine pour que les protéases l'utilise comme substrat est également une approche intéressante. La dégradation de la lignine est ainsi facilitée par expression de peptides (sous le contrôle du promoteur PAL2 exprimé dans le bois) riches en tyrosine qui créent des liens entre résidus monolignols<sup>283</sup>. Dans cette stratégie, les teneurs globales en lignine, cellulose et hémicelluloses sont conservées. La croissance des plantes ainsi que leur résistance à certains pathogènes est normale.

Il serait également intéressant d'étudier la possibilité d'obtenir des lignines plus linéaires, d'étudier les interactions acide férulique / hémicelluloses. L'incorporation de ferulates (coniferyl et sinapyl) dans la lignine permet également de créer des ponts esters. Cette modification permettrait de réduire considérablement l'énergie nécessaire pour éliminer la lignine. Avec seulement 25 % de ces monolignols dans la lignine, la délignification est obtenue à 100°C au lieu de 160°C<sup>284</sup>.

### **Propriétés des fibres**

Une méthode originale pour faciliter la fonctionnalisation des fibres est de produire des polymères chargés dans la fibre. Par exemple, Bayer a réussi à produire de la chitine dans la fibre de coton par l'expression d'une chitine synthase fongique. La réactivité de ces fibres avec des colorants a été ainsi améliorée. Il est envisageable d'exprimer d'autres polymères dans des fibres.

---

2002. Field and pulping performances of transgenic trees with altered lignification. *Nature Biotechnology* 20(6):607-12.

<sup>279</sup> Leple, J. C., R. Dauwe, K. Morreel, V. Storme, C. Lapierre, B. Pollet, A. Naumann, K. Y. Kang, H. Kim, K. Ruel, A. Lefebvre, J. P. Joseleau, J. Grima-Pettenati, R. De Rycke, S. Andersson-Gunneras, A. Erban, I. Fehrle, M. Petit-Conil, J. Kopka, A. Polle, E. Messens, B. Sundberg, S. D. Mansfield, J. Ralph, G. Pilate, and W. Boerjan. 2007. Downregulation of cinnamoyl-coenzyme a reductase in poplar: Multiple-level phenotyping reveals effects on cell wall polymer metabolism and structure. *Plant Cell* 19(11):3669-91.

<sup>280</sup> Boerjan, W., R. Vanholme, R. Van Acker, V. Storme, G. Goeminne, A. Rhode, E. Messens, and K. Morrell. 2009. Systems biology of lignification and relevance for biofuels. in *2009 IUFRO Tree Biotechnology International Conference*, edited by Whistler. Whistler (British Columbia - Canada).

<sup>281</sup> Chapple, C., M. Ladisch, and R. Meilan. 2007. Loosening lignin's grip on biofuel production. *Nature Biotechnology* 25(7):746-48.

<sup>282</sup> Weng, J. K., X. Li, N. D. Bonawitz, and C. Chapple. 2008. Emerging strategies of lignin engineering and degradation for cellulosic biofuel production. *Current Opinion in Biotechnology* 19(2):166-72.

<sup>283</sup> Liang, H., C.F. Chen, Y. Xu, C. Frost, F. Cong, M. Marshall, J.E. Carlson, N.R. Brown, and M. Tien. 2009. Improving lignin degradation by protein-cross linking in poplar. in *2009 IUFRO Tree Biotechnology International Conference*, edited by Whistler. Whistler (British Columbia - Canada).

<sup>284</sup> Ralph, J., J.H. Grabber, F. Lu, H. Kim, J.M. Marita, and R.D. Hatfield. Ibid. Incorporation of monolignol conjugates into lignin for improved processing.

Tableau 38 : analyse SWOT appliquée à l'utilisation des OGM pour la production de polymères pariétaux

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Diagnostic interne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Composés abondants, polyvalents et stockables</li> <li>• Il est possible de modifier la composition des parois rapidement (selon les espèces) et avec un facteur d'amélioration significatif</li> <li>• Possibilité de coupler la transgénèse et la diversité naturelle pour atteindre un objectif de composition pariétale, en minimisant les modifications apportées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effet délétère possible sur la croissance</li> <li>• Connaissance incomplète des voies de biosynthèse des polymères pariétaux et de leur régulation spatio-temporelle (impact des conditions culturales et de l'environnement sur la structure des parois ?)</li> <li>• Connaissance incomplète de l'assemblage des polymères pariétaux</li> <li>• Verrous technologiques / transformation génétique</li> <li>• Risque potentiel d'augmenter la sensibilité aux bio-agresseurs en modifiant la paroi</li> <li>• Corrélation mal définie entre la composition pariétale et les propriétés physico-chimiques ciblées</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besoins en biocarburants, synthons et matériaux biosourcés (substitution du C fossile)</li> <li>• La valorisation des polymères pariétaux bénéficie d'une filière organisée, de la production à la transformation</li> <li>• Connaissances acquises sur des espèces modèles (<i>Brachypodium</i>, <i>Arabidopsis</i>,...)</li> <li>• Développer la connaissance sur le rôle des parois végétales dans la résistance aux bio-agresseurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autres stratégies de modification des parois végétales en utilisant la diversité naturelle</li> <li>• Autres sources végétales.</li> </ul>

### Questions de recherche

- Mieux connaître les corrélations entre composition pariétale et propriétés physico-chimiques pour rationaliser la stratégie OGM, en explorant la diversité naturelle.
- Meilleure connaissance des voies de biosynthèse des composants d'intérêt pour pouvoir construire des OGM répondant à un besoin donné.
- Caractériser les variants du point de vue cultural, résistance aux stress.
- Développer des technologies de transgénèse très performantes pour pouvoir coupler efficacement transgénèse et exploitation de la diversité naturelle ou des variétés élites.

**Pour résumer**, les connaissances fondamentales manquantes sur la paroi (verrous) pour définir des stratégies de modification par transgénèse performantes, concernent :

- Le déterminisme d'élongation des fibres (relation avec la longueur des fibres : par exemple, rapprocher les fibres de dicotylédones de celles des conifères). Le rôle des gibbérellines semble très important<sup>285</sup>.

<sup>285</sup> Moritz, T., and M. Mauriat. Ibid. Role of gibberellins in tree growth and development.

- La compréhension du timing de changement d'expression des gènes conduisant aux parois primaire/secondaire (celles-ci étant très différentes dans leur composition).
- L'utilisation des données génomiques de différentes plantes à fibres (lin, chanvre, ramie, jute) pour comprendre leurs mécanismes de formation et utiliser ces données afin de faire produire des fibres à d'autres plantes, comme le maïs.

#### 4.4.1.2. Plantes améliorées pour la production de lipides

##### 4.4.1.2.1. Cible biocarburants

Accroître la quantité d'huile obtenue à l'hectare est la cible prioritaire par l'augmentation de la productivité de l'espèce, de la richesse en huile de la graine, en agissant au niveau de sa synthèse et de son accumulation et finalement du rendement net de l'extraction. On peut lever un des facteurs limitants de la teneur en huile de la graine en augmentant le pool de glycérol<sup>286</sup> ce qui était un résultat difficile à anticiper avant des études précises des flux du métabolisme carboné de la graine en développement. On peut également penser à diminuer le puits protéique de la graine en cherchant les gènes qui modulent le rapport quantitatif entre les différentes réserves et qui déterminent ces variations quantitatives entre variétés ou accessions.

L'extractibilité de l'huile est fonction des caractéristiques physico-chimiques des corps lipidiques et des caractéristiques des parois des cellules de la graine. Se pose ainsi la problématique du comportement mécanique des parois, en relation avec le comportement de plasticité mécanique de l'albumen, à considérer comme un matériau complexe. Ce comportement reste étroitement lié à la structure des vésicules lipidiques, à la composition chimique des mucilages, à la présence de phospholipides. Ces caractéristiques sont contrôlées au niveau de la cellule par des familles de gènes (exemple des oléosines), par leur régulation et par la spécificité des enzymes synthétisées.

Le bilan énergétique de ces cultures est évidemment le point critique pour les justifier. En particulier la réduction des intrants azotés dans le cas de la culture des crucifères est à rechercher. L'exemple de l'amélioration de l'utilisation des engrais azotés obtenue en surexprimant un gène d'alanine aminotransférase dans la racine de colza<sup>287</sup> est, une fois de plus, un résultat qu'il était difficile de prévoir et dont on ne comprend pas exactement le mécanisme. Dans d'autres cas, de telles modifications peuvent entraîner des déséquilibres inattendus comme par exemple des modifications des pools d'acides aminés consécutives à une action sur la production d'acides gras. On voit bien alors l'importance de développer des études sur les réseaux métaboliques, non seulement au niveau de la plante entière mais aussi aux niveaux inférieurs jusqu'à celui de la compartimentation intracellulaire. Ces développements ne sont possibles que sur des espèces modèles où l'on dispose de mutants et de données de génomique exhaustives en transcriptome, protéome et métabolome. *Arabidopsis* (le riz et le maïs) est donc l'objet d'étude le mieux adapté actuellement. Il faudrait être capable d'aboutir à une prédiction *in silico* des conséquences directes et indirectes des modifications introduites dans les voies métaboliques par transgénèse. On devra alors valider ou infirmer ces prédictions sur des espèces d'application.

La graine mature est-elle le meilleur contenant : il semble bien que des graines immatures soient plus

<sup>286</sup> Vigeolas, H., P. Waldeck, T. Zank, and P. Geigenberger. 2007. Increasing seed oil content in oil-seed rape (*Brassica napus* L.) by over-expression of a yeast glycerol-3-phosphate dehydrogenase under the control of a seed-specific promoter. *Plant Biotechnology Journal* 5(3):431-41.

<sup>287</sup> Good, A. G., S. J. Johnson, M. De Pauw, R. T. Carroll, and N. Savidov. 2007. Engineering nitrogen use efficiency with alanine aminotransferase. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique* 85(3):252-62.

favorables vis à vis de l'extraction pour certaines plantes. On en arrive au concept de production de graines dont la composition serait différente de celle des semences, ce qui ne peut s'envisager que par génie génétique.

#### 4.4.1.2.2. Cible acides gras exotiques

S'il est possible de stocker en grande quantité des acides gras linéaires dans les triglycérides des plantes agronomiques standardisées, il est plus difficile d'accumuler des structures inhabituelles (chaînes très courtes ou très longues ; acides gras branchés, cycliques,...) dans ces plantes. L'enrichissement des TAG en ces structures inhabituelles reste lié à des problèmes d'encombrement stérique (acides gras portant des branchements ou des cycles). Cette problématique est décrite par exemple dans plusieurs publications<sup>288,289,290,291</sup>.

Cependant des plantes exotiques et/ou non domestiquées peuvent accumuler des acides gras inhabituels jusqu'à des teneurs de 90 %. Il serait par conséquent intéressant d'étudier les mécanismes mis en place par ces plantes pour réaliser ces synthèses et les enzymes impliquées. En effet, de nombreux exemples de transfert de gènes sont répertoriés depuis près de 20 ans (voir tableau 37). Ces exemples montrent que la manipulation est possible mais qu'en général les teneurs sont plus faibles dans la plante transformée (le plus souvent d'une espèce oléagineuse colza, soja, coton, *A. thaliana*) que dans l'espèce source. La sous-production de l'acide gras recherché rend ces transformants inexploitable. On sait maintenant qu'il ne suffit pas de transférer un gène codant pour une protéine capable d'insérer un acide gras particulier à la position voulue, par exemple une LPAT (lysophosphatidic acyl transferase) capable d'insérer l'acide érucique en position 2 du glycérol, pour obtenir de la trierucine chez le colza, il faut aussi inactiver la (ou les) LPAT de colza compétitrice qui elle, insère avec une très grande efficacité de l'acide oléique.

Les sources de gènes provenant d'espèces peu connues, non séquencées, nécessitent de conduire des recherches sur ces espèces exotiques et sur des microorganismes pour définir parmi des familles de gènes ciblés ceux qui doivent être transférés. Il y a une nécessité d'étudier des facteurs de régulation simultanément. Il faut avoir également une idée des potentialités de ces espèces pour gérer de telles molécules dans leur métabolisme général et connaître les mécanismes de compartimentation y compris à l'échelle d'une membrane donnée.

#### Questions de recherche

- Exploiter la diversité existante des plantes pour comprendre les mécanismes de synthèse des lipides et acides gras / composés inhabituels, et leur potentialité de stockage (organes, type de structures,...).
- Comprendre la spécificité de chacune des enzymes, pour explorer la redondance fonctionnelle. Par exemple, il existe plus de 21 keto acyl synthases nécessaires à l'élongation des acides gras chez

<sup>288</sup> Napier, J. A., R. Haslam, M. V. Caleron, L. V. Michaelson, F. Beaudoin, and O. Sayanova. 2006. Progress towards the production of very long-chain polyunsaturated fatty acid in transgenic plants: plant metabolic engineering comes of age. *Physiologia Plantarum* 126(3):398-406.

<sup>289</sup> Napier, J. A. 2007. The production of unusual fatty acids in transgenic plants. *Annual Review of Plant Biology* 58:295-319.

<sup>290</sup> Singh, S. P., X. R. Zhou, Q. Liu, S. Stymne, and A. G. Green. 2005. Metabolic engineering of new fatty acids in plants. *Current Opinion in Plant Biology* 8(2):197-203.

<sup>291</sup> Bursal, J., J. Shockey, C. F. Lu, J. Dyer, T. Larson, I. Graham, and J. Browse. 2008. Metabolic engineering of hydroxy fatty acid production in plants: RcDGAT2 drives dramatic increases in ricinoleate levels in seed oil. *Plant Biotechnology Journal* 6(8):819-31.

*Arabidopsis* (probablement plus chez le colza) et seulement 4 ont été caractérisées avec des spécificités catalytiques différentes. Les lipides présentent aussi la caractéristique d'être fortement compartimentés (oléosomes, membranes, cires) et les mécanismes de distribution/canalisation de ces molécules très hydrophobes sont très peu explorés. Un intérêt appliqué de ce type de recherche serait de compartimenter différents lipides dans des types cellulaires ou organes indépendants pour en optimiser le rendement et l'extractabilité. Par exemple l'expression ectopique de LEC2<sup>292</sup> permet l'accumulation de tri-acyl-glycerol de réserve dans les feuilles.

Tableau 39 : acides gras d'intérêt commercial synthétisés par des plantes oléagineuses transgéniques (d'après Drexler *et al.*<sup>293</sup>)

Acide	Plante non domestiquée	%	Transformant	%	Gène	Références
Stéarique	Canarium schweinfurthii	84	H. annuus	37	18:0 $\Delta^9$ désaturase (anti-sens)	Kinney <sup>294</sup> , Fernandez-Moya <i>et al.</i> <sup>295</sup>
			G.max	20-30		Knutzon <i>et al.</i> <sup>296</sup> , Kinney <sup>297</sup>
			B. napus	40		Liu <i>et al.</i> <sup>298</sup>
			G. hirstum	38		
Oléïque	Garcinia multiflora	89	H. annuus	88-92	18:1 $\Delta^{12}$ désaturase (anti-sens)	Cole <i>et al.</i> <sup>299</sup>
			G.max	85		Kinney <sup>300</sup>
			B. napus	89		Auld <i>et al.</i> <sup>301</sup>
			G. hirstum	77		Liu <i>et al.</i> <sup>302</sup>
Linoléïque	Myrianthus	94	B. napus	46	18:1 $\Delta^{12}$ désaturase	Liu <i>et al.</i> <sup>303</sup>

<sup>292</sup> Mendoza, M.S., Dubreucq, M., Miquel, M. *et al.* 2005. LEAFY COTYLEDON 2 activation is sufficient to trigger the accumulation of oil and seed specific mRNAs in *Arabidopsis* leaves *Febs Letters* 579(21):4666-4670

<sup>293</sup> Drexler, H., P. Spiekermann, A. Meyer, F. Domergue, T. Zank, P. Sperling, A. Abadi, and E. Heinz. 2003. Metabolic engineering of fatty acids for breeding of new oilseed crops: strategies, problems and first results. *Journal of Plant Physiology* 160(7):779-802.

<sup>294</sup> Kinney, A. J. 1998. Plants as industrial chemical factories - new oils from genetically engineered soybeans. *Fett-Lipid* 100(4-5):173-76.

<sup>295</sup> Fernandez-Moya, V., E. Martinez-Force, and R. Garces. 2002. Temperature effect on a high stearic acid sunflower mutant. *Phytochemistry* 59(1):33-37.

<sup>296</sup> Knutzon, D. S., G. A. Thompson, S. E. Radke, W. B. Johnson, V. C. Knauf, and J. C. Kridl. 1992. Modification of Brassica seed oil by antisense expression of a steraoyl-acyl carrier protein desaturase gene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 89(7):2624-28.

<sup>297</sup> Kinney, A. J. 1998. Plants as industrial chemical factories - new oils from genetically engineered soybeans. *Fett-Lipid* 100(4-5):173-76.

<sup>298</sup> Liu, H., Hu, C., Sun, X. *et al.* 2009. *J. Food Agriculture and Environment* 7(3-4):266-269.

<sup>299</sup> Cole, G., S. Coughlan, N. Frey, J. Hazebroek, and C. Jennings. 1998. New sunflower and soybean cultivars for novel vegetable oil types. *Fett-Lipid* 100(4-5):177-81.

<sup>300</sup> Kinney, A. J. *Ibid.* Plants as industrial chemical factories - new oils from genetically engineered soybeans. 173-76.

<sup>301</sup> Auld, D. L., M. K. Heikkinen, D. A. Erickson, J. L. Sernyk, and J. E. Romero. 1992. Rapeseed mutants with reduced levels of polyunsaturated fatty-acids and increased levels of oleic-acid *Crop Science* 32(3):657-62.

<sup>302</sup> Yan, X.Y., Li, J.N., Wang, R. *et al.* 2011. *Genes and Genomics* 33(4):365-371.

<sup>303</sup> Liu, J.W., Y.S. Huang, S. DeMichele, M. Bergana, E. Bobik, C. Hastilow, L.T. Chuang, P. Mukerji, and D. Knutzon. 2001. Evaluation of the seed oils from a canola plant genetically transformed to

	arboreus					
g-Linolénique	Borago pygmea	28	B. napus	43	18:2 $\Delta$ -6 et 18:1 $\Delta$ -12 désaturases	Liu et al. <sup>304</sup>
Caprilique	Cuphea painteri	73	B. napus	11	8:0-ACP thioestérase	Dehesh et al. <sup>305</sup>
Caprique	Cuphea lanceolata	95	B. napus	27	10:0-ACP thioestérase	Dehesh et al. <sup>306</sup>
Laurique	Actinodaphne hookeri	96	A. thaliana	24	12:0-ACP thioestérase	Voelker et al. <sup>307</sup>
			B. napus	50-60		Voelker et al. <sup>308</sup>
Erucique	B. napus	55	B. napus	60	KCS, 22:1 LPAAT	Han et al. <sup>309</sup>
D5 Eicosanoïque	Limnanthes alba	60	G. max	18	KCS, 20:0 $\Delta$ -5 désaturase	Cahoon et al. <sup>310</sup>
Ricinoléique	Ricinus communis	89	A. Thaliana	42	18:1 C12 hydroxylase	Smith et al. <sup>311</sup>
	Lesquerella gracilis	78	B. napus	16		Broun et al. <sup>312</sup>
Pétrosélinique	Apium leptophyllum	87	N. tabacum	4	16:0 $\Delta$ -4 désaturase	Cahoon et al. <sup>313</sup>
Crépénynique	Crepis alpina	70	A. thaliana	25	18:2 $\Delta$ -12 acétylénase	Lee et al. <sup>314</sup>

produce high levels of  $\gamma$ -linolenic acid. in *Gamma-Linolenic Acid : Recent Advances in Biotechnology and Clinical Applications*, edited by Y.S. Hunag and V.A. Ziboj. Champaign (USA): AOCS Press.

<sup>304</sup> Yan, X.Y., Li, J.N., Wang, R. et al. 2011. *Genes and Genomics* 33(4):365-371.

<sup>305</sup> Dehesh, K., P. Edwards, T. Hayes, A. M. Cranmer, and J. Fillatti. 1996a. Two novel thioesterases are key determinants of the bimodal distribution of acyl chain length of Cuphea palustris seed oil. *Plant Physiology* 110(1):203-10.

<sup>306</sup> Dehesh, K., A. Jones, D. S. Knutzon, and T. A. Voelker. 1996b. Production of high levels of 8:0 and 10:0 fatty acids in transgenic canola by overexpression of Ch FatB2, a thioesterase cDNA from Cuphea hookeriana. *Plant Journal* 9(2):167-72.

<sup>307</sup> Voelker, T. A., A. C. Worrell, L. Anderson, J. Bleibaum, C. Fan, D. J. Hawkins, S. E. Radke, and H. M. Davies. 1992. Fatty-acid biosynthesis redirected to medium chains in transgenic oilseed plants. *Science* 257(5066):72-74.

<sup>308</sup> Voelker, T. A., T. R. Hayes, A. M. Cranmer, J. C. Turner, and H. M. Davies. 1996. Genetic engineering of a quantitative trait: Metabolic and genetic parameters influencing the accumulation of laurate in rapeseed. *Plant Journal* 9(2):229-41.

<sup>309</sup> Han, J. X., W. Luhs, K. Sonntag, U. Zahringer, D. S. Borchardt, F. P. Wolter, E. Heinz, and M. Frentzen. 2001. Functional characterization of beta-ketoacyl-CoA synthase genes from Brassica napus L. *Plant Molecular Biology* 46(2):229-39.

<sup>310</sup> Cahoon, E. B., E. F. Marillia, K. L. Stecca, S. E. Hall, D. C. Taylor, and A. J. Kinney. 2000. Production of fatty acid components of meadowfoam oil in somatic soybean embryos. *Plant Physiology* 124(1):243-51.

<sup>311</sup> Smith, M., H. Moon, and L. Kunst. 2000. Production of hydroxy fatty acids in the seeds of Arabidopsis thaliana (14th International Symposium on Plant Lipids, Cardiff Wales, 2000/07/23-28 ). *Biochemical Society Transactions* 28:947-50.

<sup>312</sup> Broun, P., J. Shanklin, E. Whittle, and C. Somerville. 1998. Catalytic plasticity of fatty acid modification enzymes underlying chemical diversity of plant lipids. *Science* 282(5392):1315-17.

<sup>313</sup> Cahoon, E. B., J. Shanklin, and J. B. Ohlrogge. 1992. Expression of a Coriander Desaturase Results in Petroselinic Acid Production in Transgenic Tobacco. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 89(23):11184-88.

<sup>314</sup> Lee, M., M. Lenman, A. Banas, M. Bafor, S. Singh, M. Schweizer, R. Nilsson, C. Liljenberg, A. Dahlqvist, P. O. Gummesson, S. Sjodahl, A. Green, and S. Stymne. 1998. Identification of non-heme diiron proteins that catalyze triple bond and epoxy group formation. *Science* 280(5365):915-18.



Vernolique	Vernonia galamensis	80	A. thaliana	15	18 :2 12,13 époxygénase	Lee et al. <sup>315</sup>
Eléostéarique	Aleurites fordii	86	G. max	18	18 :2/18 :3 conjugase	Cahoon et al. <sup>316</sup>
Calendique	Calendulas officinalis	60	G.max	22	18 :2 19 conjugase	Cahoon et al. <sup>317</sup>
Cires	Simmondsia chnensis	60	A. thaliana	70	KCS,FAR,WS	Lardizabal et al. <sup>318</sup>

Tableau 40 : analyse SWOT appliquée à l'utilisation des OGM pour la production d'acides gras particuliers

	Forces	Faiblesses
Diagnostic interne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enorme diversité d'acides gras dans la nature</li> <li>• Voies enzymatiques de synthèse assez bien connues (élongases, désaturases, hydroxylase, etc.)</li> <li>• <i>A priori</i> la transgénèse devrait permettre de faire produire ces acides gras particuliers dans des oléagineux adaptés à la production en masse</li> <li>• Opérationnel pour l'acide gamma linoléique (J. Napier), acides gras de poisson (PUFA) dans le soja (A. Kinney/Dupont)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teneur assez faible du synthon dans la plante modèle ou l'oléagineux cultivé (Ac ricinoléique ; Bural et al. par exemple<sup>319</sup>)</li> <li>• Nécessité de comprendre non seulement les voies de synthèse mais aussi les mécanismes de stockage des acides gras particuliers afin qu'ils n'aient pas d'effet sur la croissance de la plante (en étant par exemple intégrés dans les lipides membranaires et y jouer un rôle délétère).</li> <li>• Dans certains cas, après avoir compris le mode d'accumulation et de stockage de l'acide gras particulier dans l'espèce sauvage, il sera nécessaire de transférer plusieurs gènes dans l'espèce cultivée, ce qui reste encore compliqué.</li> </ul>
	Opportunités	Limitations
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrence,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besoins en synthons et matériaux biosourcés (substitution du carbone fossile)</li> <li>• Valorisation <i>via</i> tritrateur et/ou l'industrie pétrolière</li> <li>• Connaissances acquises sur des espèces modèles (<i>Arabidopsis</i>,...)</li> <li>• Développer la prospection de la biodiversité pour découvrir de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chimie issue du pétrole encore « bon marché »</li> <li>• Faible compétitivité économique compte tenu des quantités produites</li> <li>• Concurrence à terme ou pour certains acides gras, avec les biotechnologies blanches ?</li> </ul>

<sup>315</sup> Singh, S. Thomaeus, S., Lee M. et al. 2011. *Planta* 212(5-6):872-879.

<sup>316</sup> Cahoon, E. B., T. J. Carlson, K. G. Ripp, B. J. Schweiger, G. A. Cook, S. E. Hall, and A. J. Kinney. 1999. Biosynthetic origin of conjugated double bonds: Production of fatty acid components of high-value drying oils in transgenic soybean embryos. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96(22):12935-40.

<sup>317</sup> Cahoon, E. B., K. G. Ripp, S. E. Hall, and A. J. Kinney. 2001. Formation of conjugated Delta(8),Delta(10)-double bonds by Delta(12)-oleic-acid desaturase-related enzymes - Biosynthetic origin of calendic acid. *Journal of Biological Chemistry* 276(4):2637-43.

<sup>318</sup> Lardizabal, K. D., J. G. Metz, T. Sakamoto, W. C. Hutton, M. R. Pollard, and M. W. Lassner. 2000. Purification of a jojoba embryo wax synthase, cloning of its cDNA, and production of high levels of wax in seeds of transgenic *Arabidopsis*. *Plant Physiology* 122(3):645-55.

<sup>319</sup> Bural, J., J. Shockey, C. F. Lu, J. Dyer, T. Larson, I. Graham, and J. Browse. 2008. Metabolic engineering of hydroxy fatty acid production in plants: RcDGAT2 drives dramatic increases in ricinoleate levels in seed oil. *Plant Biotechnology Journal* 6(8):819-31.

### Questions de recherche

- Mieux explorer la diversité naturelle pour découvrir d'autres acides gras intéressants.
- Meilleure connaissance et compréhension des voies de biosynthèse et des mécanismes de stockage des acides gras dans les espèces sauvages afin d'isoler les gènes responsables pour les transférer aux oléagineux cultivés.
- Développer des technologies de transgénèse très performantes, permettant de transférer efficacement plusieurs gènes.

#### 4.4.3. Questions spécifiques au métabolisme secondaire

En combinaison avec les méthodes de modélisation des voies métaboliques qui sont en progrès, la modification des facteurs de régulation devrait permettre d'augmenter la production de produits naturels et la synthèse de nouvelles molécules<sup>320,321,322,323</sup>. D'énormes progrès ont été réalisés dans la connaissance des gènes intervenant dans la production des composés volatiles et des exemples<sup>324</sup> d'amélioration des défenses des plantes, du parfum des fleurs et de la qualité des fruits ont été obtenus. L'exemple de la production de dhurrin par transfert chez *Arabidopsis* de la voie métabolique du sorgho (3 gènes pour la synthèse de ce glucoside cyanogénique dérivé de la tyrosine) est extrêmement encourageant<sup>325</sup>.

L'exemple des terpènes peut être pris pour illustrer la problématique du transfert de voies métaboliques concernant ces métabolites d'une espèce source à une espèce cible. Les voies de biosynthèse se déroulent dans des organes, des cellules spécialisées telles que les trichomes. Ceci implique des mécanismes de différenciation et de spécialisation cellulaires. La production dans d'autres espèces suppose des organes ou cellules cibles de stockage possédant des propriétés identiques pour séquestrer ces molécules volatiles. Cela conduit à développer des technologies particulières pour accéder à l'analyse de transcriptomes très spécifiques de quelques cellules.

Les structures naturelles de drainage et de concentration de certains composés comme les laticifères doivent retenir l'attention. C'est sur des espèces à finalité thérapeutique que des études commencent à être réalisées et des voies de biosynthèse caractérisées. Un exemple est le pavot chez lequel des facteurs de transcription d'*Arabidopsis* ont été utilisés en transgénèse pour augmenter la production d'alcaloïdes (codéïne, thébaïne).

Diverses stratégies de transgénèse pour la production de terpènes et huiles essentielles dans des

<sup>320</sup> Capell, T., and P. Christou. 2004. Progress in plant metabolic engineering. *Current Opinion in Biotechnology* 15(2):148-54.

<sup>321</sup> Grotewold, E. 2003. *Plant Functional Genomics: Methods and Protocols*. Totowa (USA): Humana Press.

<sup>322</sup> Kutchan, T. M. 2005. Predictive metabolic engineering in plants: still full of surprises. *Trends in Biotechnology* 23(8):381-83.

<sup>323</sup> Oksman-Caldentey, K. M., and K. Saito. 2005. Integrating genomics and metabolomics for engineering plant metabolic pathways. *Current Opinion in Biotechnology* 16(2):174-79.

<sup>324</sup> Dudareva, N., and E. Pichersky. 2008. Metabolic engineering of plant volatiles. *Ibid.* 19:181-89.

<sup>325</sup> Kristensen, C., M. Morant, C. E. Olsen, C. T. Ekstrom, D. W. Galbraith, B. L. Moller, and S. Bak. 2005. Metabolic engineering of dhurrin in transgenic *Arabidopsis* plants with marginal inadvertent effects on the metabolome and transcriptome. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102(5):1779-84.

espèces non domestiquées ont déjà donné des résultats encourageants<sup>326,327,328</sup>.

L'utilisation des voies de biosynthèse de composés qui peuvent être toxiques pour certains prédateurs comme des insectes dans une stratégie de protection croisée entre espèces végétales a été proposée: par exemple des gènes conduisant à des glycosides cyanogènes du sorgho (3-4 gènes) pourraient être transférés au colza et la biosynthèse de glucosinolates du colza vers le maïs.

#### 4.4.4. Questions spécifiques aux aptitudes technologiques

Il serait intéressant de faire démarrer le processus de fractionnement des édifices moléculaires dès la phase de trituration, de broyage des graines par exemple. Cela conduit à imaginer la production de systèmes enzymatiques réactifs dans des compartiments tissulaires différents de ceux qui contiennent les substrats macromoléculaires. Par exemple d'un côté l'albumen, de l'autre l'embryon, ou bien des cultures dédiées portant chacune l'un des composants qui seront mis en présence par trituration du mélange des récoltes.

Sont à citer : activation inductible *in planta* de cellulase<sup>329</sup>.

#### 4.4.5. Questions spécifiques au développement de nouvelles fonctionnalités

##### 4.4.5.1. Production de polymères hétérologues

Une première cible est d'abord la modification de la structure primaire des biopolymères usuels. La production de protéines à motifs répétitifs a été évoquée précédemment. Ensuite il peut être envisagé de faire exprimer des biopolymères unusuels.

Des bioplastiques, par exemple des Poly-Hydroxy-Alkanes ont été produits chez la betterave, la canne à sucre et le switchgrass en exprimant 3 enzymes bactériennes. La production de ces polymères hétérologues peut être augmentée de manière très significative par l'insertion du gène dans le génome du plaste (plantes transplastomiques). Il se pose alors une question de compatibilité avec le fonctionnement cellulaire, la croissance et la reproduction de la plante<sup>330</sup>. La production de polyhydroxybutyrate (PHB) dans les plastides de racines (hairy-root) de betterave permet d'atteindre des concentrations élevées (5 % du poids sec)<sup>331</sup>.

Il serait intéressant de dresser un inventaire des biopolymères chez les plantes terrestres, algues, microorganismes et animaux et d'évaluer la possibilité de les produire dans des plantes cultivées. Toutefois il est nécessaire de poser cette problématique technologique à la lumière de trois conditions

---

<sup>326</sup> Munoz-Bertomeu, J., I. Arrillaga, R. Ros, and J. Segura. 2006. Up-regulation of 1-deoxy-D-xylulose-5-phosphate synthase enhances production of essential oils in transgenic spike lavender. *Plant Physiology* 142(3):890-900.

<sup>327</sup> Wildung, M., and R. B. Croteau. 2005. Genetic engineering of peppermint for improved essential oil composition and yield. *Transgenic Research* 14(4):365-72.

<sup>328</sup> Aharoni, A., M. A. Jongsma, and H. J. Bouwmeester. 2005. Volatile science? Metabolic engineering of terpenoids in plants. *Trends in Plant Science* 10(12):594-602.

<sup>329</sup> Coleman, H., M. Hinkema, K. Shand, B. Dugdale, and J. Dale. 2009. In plant activation of cellulose enzymes for biofuels production. Pp. poster P35 in *2009 IUFRO Tree Biotechnology International Conference*, edited by Whistler. Whistler (British Columbia - Canada).

<sup>330</sup> Lössl A, *et al.* 2003. Polyester synthesis in transplastomic tobacco (*Nicotiana tabacum* L.): significant contents of polyhydroxybutyrate are associated with growth reduction *Plant Cell Rep* 21(9):891-899.

<sup>331</sup> Menzel *et al.* 2003. Expression of bacterial poly (3-hydroxybutyrate) synthesis genes in hairy roots of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Appl Microbial Biotech* 60(5):571-576

d'existence :

- Le choix des couples espèce et organe compatibles avec une production à grande échelle.
- Les usages du coproduit au delà de la thermochimie bien entendu.
- La compétitivité face à la voie microbienne, surtout en considérant les délais importants pour la création et l'évaluation de nouvelles variétés transgéniques. Ainsi les PHA sont produits très efficacement par des microorganismes qui peuvent jusqu'à accumuler jusqu'à 85 % du poids sec.

#### 4.4.5.2. Production d'énergie lumineuse

L'objectif est ici de faire produire en période nocturne par des plantes, des molécules fluorescentes ou phosphorescentes, ou bien directement de la lumière (bioluminescence). Les applications pourront se décliner en fonction des caractéristiques des deux systèmes majeurs de photoproduction.

##### **Fluorescence et phosphorescence**

La transgénèse permet ici de produire dans la plante une protéine qui, lorsqu'elle est excitée, réémet de la lumière directement (fluorescence). Ce système serait idéal pour le balisage du bord des routes, l'excitation étant réalisée par la lumière des phares des voitures, la réémission devant être calée pour se réaliser dans le visible. Dans le cas où, après l'excitation, la réémission se fait de façon plus ou moins retardée (phosphorescence), il doit être possible d'obtenir pendant quelques heures une luminosité résultant de l'excitation par la lumière du jour.

A la différence de la production directe de lumière, il n'y a que l'apport d'énergie nécessaire à la synthèse de la protéine. Pour être optimum, cette dernière devra être réalisée dans les chloroplastes. Les systèmes de gènes reporters utilisant la GFP (Green Fluorescent Protein) et ses dérivés ont été largement développés pour des applications de recherche<sup>332</sup>. Des applications commerciales en aquariophilie ont même vu le jour aux Etats-Unis (Poissons d'aquarium fluorescents GloFish™ exprimant la DsRed de corail). Stewaert rapporte que l'expression de la protéine fluorescente est suffisamment importante chez ce poisson pour que la fluorescence soit visible même sous excitation par une lumière domestique standard. De plus, l'éclairage « végétal » étant ponctuel, il ne devrait pas y avoir de perturbation des écosystèmes. La production massive dans les feuilles d'arbustes pérennes à feuillage persistant (buis) pourrait ici servir de modèle.

##### **Bioluminescence**

Un système mettant en jeu une voie métabolique productrice de lumière à partir d'énergie chimique (bioluminescence) pourrait être basé sur l'utilisation de promoteurs spécifiques de la période nocturne chez des plantes pérennes présentant un feuillage persistant (buis, laurier, bambou). Le problème majeur de ce système est de trouver une adéquation entre une production suffisante de lumière pour qu'elle soit détectable, une disponibilité suffisante d'énergie chimique pour assurer cette production et la viabilité de la plante sur le long terme. Le système le plus utilisé en recherche met en jeu l'activité de l'enzyme luciférase<sup>333,334</sup>. Différentes applications peuvent être envisagées : (i) *Balisage*, si le fonctionnement continu est nécessaire. La faible restitution lumineuse qui peut être attendue pour des

<sup>332</sup> Halfill, M.D., Millwood, R.J., Stewart, C.N., 2005. *Methods in Molecular Biology* 286:215-226.

<sup>333</sup> Branchini, B. R., T. L. Southworth, J. P. DeAngelis, A. Roda, and E. Michelini. 2006. Luciferase from the Italian firefly *Luciola italica*: Molecular cloning and expression. *Comparative Biochemistry and Physiology B-Biochemistry & Molecular Biology* 145(2):159-67.

<sup>334</sup> Chen, H. M., Y. Zou, Y. L. Shang, H. Q. Lin, Y. J. Wang, R. Cai, X. Y. Tang, and J. M. Zhou. 2008. Firefly luciferase complementation imaging assay for protein-protein interactions in plants. *Plant Physiology* 146(2):368-76.

raisons énergétiques pourra être compensée par des fortes densités de plantation et modulée par une expression différentielle ou inductible du système (promoteurs spécifiques de la période nocturne) ; (ii) *Eclairage public*, à partir du système « luciférase » en termes d'intensité lumineuse restituée dans des plantes ornementales pérennes ou annuelles ; (iii) *Eclairage ornemental*, avec des protéines phosphorescentes (émission de la lumière quelques minutes ou quelques heures après l'excitation) serait envisageable, de même que des variations de couleurs ou des productions de lumière par les fleurs.

Certaines plantes sont aussi capables de produire de la chaleur en quantité significative (*H. muscivorus*<sup>335</sup> ; *V. amazonica*<sup>336</sup>). Les mécanismes conduisant à cette production de chaleur pourraient être étudiés avec des objectifs d'acclimatation d'espèces tropicales et de résistance au froid d'espèces gélives (vigne, fruitiers).

#### 4.4.6. Résolution de questions génériques

Les plantes d'intérêt pour les bioénergies et la chimie verte présentent des verrous agronomiques génériques qui pourraient être surmontés. La stratégie OGM permettrait de surmonter plusieurs facteurs limitants, qui sont résumés dans le tableau 39.

Tableau 41 : facteurs génériques limitants dans les plantes d'intérêt agronomique, les solutions technologiques apportées par la voie OGM et leurs auteurs.

Facteur limitant agronomique	Solution technologique	Auteurs
Bioindicateurs de l'état d'une culture	Identifier un promoteur ( <i>a priori</i> actif dans les feuilles pour faciliter l'application agronomique) dont l'activité est régulée par le statut N	2 difficultés : <ul style="list-style-type: none"> <li>• spécificité,</li> <li>• activation au moment adéquat.</li> </ul>
Résistance aux insectes	Surexpression d'une polyphénol oxydase	Wang et Constabel <sup>337</sup>
Résistance aux bactéries et champignons	Surexpression de la bactério-opsine	Mohamed <i>et al.</i> <sup>338</sup>
	Surexpression de peptides antimicrobiens	D4E1, Mentag <i>et al.</i> <sup>339</sup>
	Pinosylvine synthase chez le tremble	Seppanen <i>et al.</i> <sup>340</sup>

<sup>335</sup> Seymour, R. S., M. Gibernau, and K. Ito. 2003. Thermogenesis and respiration of inflorescences of the dead horse arum *Heliconia muscivora*, a pseudo-thermoregulatory aroid associated with fly pollination. *Functional Ecology* 17(6):886-94.

<sup>336</sup> Seymour, R. S., and P. G. D. Matthews. 2006. The role of thermogenesis in the pollination biology of the Amazon waterlily *Victoria amazonica*. *Annals of Botany* 98(6):1129-35.

<sup>337</sup> Wang, J. H., and C. P. Constabel. 2004. Polyphenol oxidase overexpression in transgenic *Populus* enhances resistance to herbivory by forest tent caterpillar (*Malacosoma disstria*). *Planta* 220(1):87-96.

<sup>338</sup> Mohamed, R., R. Meilan, M. E. Ostry, C. H. Michler, and S. H. Strauss. 2001. Bacterio-opsin gene overexpression fails to elevate fungal disease resistance in transgenic poplar (*Populus*). *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 31(2):268-75.

<sup>339</sup> Mentag, R., M. Luckevich, M. J. Morency, and A. Seguin. 2003. Bacterial disease resistance of transgenic hybrid poplar expressing the synthetic antimicrobial peptide D4E1. *Tree Physiology* 23:405-11.

<sup>340</sup> Seppanen, S. K., L. Syrjala, K. von Weissenberg, T. H. Teeri, L. Paajanen, and A. Pappinen. 2004. Antifungal activity of stilbenes in in vitro bioassays and in transgenic *Populus* expressing a gene encoding pinosylvin synthase. *Plant Cell Reports* 22(8):584-93.

	Surexpression d'un facteur de transcription impliqué dans la réponse aux stress biotiques et abiotiques (ERF/AP2)	Tang <i>et al.</i> <sup>341</sup>
Résistance aux contraintes abiotiques		
Tolérance au sel		Zhang H-X & Blumwald E <sup>342</sup> Tang <i>et al.</i> <sup>343</sup>
Contrainte hydrique	Métabolites protecteurs glycine bêtaïne fructose, de sorbitol et de tréhalose de la dessiccation par sur-production d'enzyme de leur métabolisme	Karim S. <i>et al.</i> <sup>344</sup> Rivero RM <i>et al.</i> <sup>345</sup>
	Activer la pompe à proton	Park S, <i>et al.</i> <sup>346</sup>
	Régulation d'un facteur de transcription sous-unité du facteur nucléaire Y (AtNF-YB1), dont le gène correspondant de maïs (ZmNF-YB2) a été identifié et sur-exprimé chez le maïs	Nelson DE, <i>et al.</i> <sup>347</sup>
	Facteur de transcription AtP2/ERF type épaissement du parenchyme palissadique et développement important du système racinaire	riz : Karaba A, <i>et al.</i> <sup>348</sup>
	Surexpression chez le riz de la protéine SNAC, un facteur de transcription qui est induit par le stress hydrique dans les cellules de garde des stomates	Hu H, <i>et al.</i> <sup>349</sup>
Tolérance au froid	<i>Solanum tuberosum</i> : expression de la séquence codante du gène AtCBF d' <i>Arabidopsis thaliana</i> sous le contrôle d'un promoteur inductible par le	Pino MT <i>et al.</i> <sup>350</sup>

<sup>341</sup> Tang, W., Charles, T.M., Newton, R.J. 2005. *Plant Molecular Biology* 59(4):603-617.

<sup>342</sup> Zhang, H. X., and E. Blumwald. 2001. Transgenic salt-tolerant tomato plants accumulate salt in foliage but not in fruit. *Nature Biotechnology* 19(8):765-68.

<sup>343</sup> Tang, D.Q., Qian, H.M., Zhao, L.X. *et al.* 2005. Transgenic tobacco plants expressing BoRS1 gene from Brassica oleracea var. acephala show enhanced tolerance to water stress. *Journal of Biosciences* 30(5):647-655.

<sup>344</sup> Karim, S., H. Aronsson, H. Ericson, M. Pirhonen, B. Leyman, B. Welin, E. Mantyla, E. T. Palva, P. Van Dijck, and K. O. Holmstrom. 2007. Improved drought tolerance without undesired side effects in transgenic plants producing trehalose. *Plant Molecular Biology* 64(4):371-86.

<sup>345</sup> Rivero, R. M., M. Kojima, A. Gepstein, H. Sakakibara, R. Mittler, S. Gepstein, and E. Blumwald. 2007. Delayed leaf senescence induces extreme drought tolerance in a flowering plant. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(49):19631-36.

<sup>346</sup> Park, S., J. S. Li, J. K. Pittman, G. A. Berkowitz, H. B. Yang, S. Undurraga, J. Morris, K. D. Hirschi, and R. A. Gaxiola. 2005. Up-regulation of a H<sup>+</sup>-pyrophosphatase (H<sup>+</sup>-PPase) as a strategy to engineer drought-resistant crop plants. *Ibid.* 102(52):18830-35.

<sup>347</sup> Nelson, D. E., P. P. Repetti, T. R. Adams, R. A. Creelman, J. Wu, D. C. Warner, D. C. Anstrom, R. J. Bensen, P. P. Castiglioni, M. G. Donnarummo, B. S. Hinchey, R. W. Kumimoto, D. R. Maszle, R. D. Canales, K. A. Krolkowski, S. B. Dotson, N. Gutterson, O. J. Ratcliffe, and J. E. Heard. 2007. Plant nuclear factor Y (NF-Y) B subunits confer drought tolerance and lead to improved corn yields on water-limited acres. *Ibid.* 104(42):16450-55.

<sup>348</sup> Karaba, A., S. Dixit, R. Greco, A. Aharoni, K. R. Trijatmiko, N. Marsch-Martinez, A. Krishnan, K. N. Nataraja, M. Udayakumar, and A. Pereira. *Ibid.* Improvement of water use efficiency in rice by expression of HARDY, an Arabidopsis drought and salt tolerance gene. *PNAS* 134(39):15270-75.

<sup>349</sup> Hu, H. H., M. Q. Dai, J. L. Yao, B. Z. Xiao, X. H. Li, Q. F. Zhang, and L. Z. Xiong. 2006. Overexpressing a NAM, ATAF, and CUC (NAC) transcription factor enhances drought resistance and salt tolerance in rice. *Ibid.* 103(35):12987-92.

<sup>350</sup> Pino, M. T., J. S. Skinner, E. J. Park, Z. Jeknic, P. M. Hayes, M. F. Thornashow, and T. H. H. Chen. 2007. Use of a stress inducible promoter to drive ectopic AtCBF expression improves potato freezing tolerance while minimizing negative effects on tuber yield. *Plant Biotechnology Journal* 5(5):591-604.

	froid	
Meilleure utilisation de l'azote	Surexpression de plusieurs enzymes catalysant des étapes avales du métabolisme azoté (notamment celles impliquées dans le métabolisme des acides aminés)	sur-expression des formes cytoplasmiques de la glutamine synthétase (GS1) chez le blé, le tabac, le peuplier, le lotier, et le maïs provoque une accumulation accrue d'azote, une croissance stimulée ou un rendement en grain augmenté <sup>351,352,353</sup>
	Mécanismes de signalisation sur-expression du facteur de transcription DOF1 de maïs, phospholipase Dε (PLDε)	Yanagisawa <i>et al.</i> <sup>354</sup> Hong <i>et al.</i> <sup>355</sup>
Phosphate	Conversion des phospholipides en galacto- et sulfolipides chez <i>Arabidopsis thaliana</i>	Misson, J. <i>et al.</i> <sup>356</sup>

#### 4.4.7. La transgénèse comme stratégie pour accélérer la domestication des espèces sauvages

Les techniques conventionnelles d'amélioration sont performantes dès lors qu'un programme d'amélioration est en cours depuis plusieurs cycles pour un caractère donné. En revanche la transgénèse est compétitive chaque fois que de nouveaux caractères doivent être rapatriés dans la population d'amélioration ou lorsque des développements sont envisagés pour une espèce sauvage (domestication plus rapide en particulier chez les arbres).

Il y a un intérêt évident de travailler à l'induction de la floraison précoce chez les arbres pour réduire la phase juvénile et accéder plus rapidement au croisement contrôlé et *in fine* raccourcir les cycles d'amélioration. L'expression chez le pommier du gène MADS4 de *B. pendula* induit la formation de fleurs fertiles<sup>357</sup>. Chez le peuplier, des constructions exprimant les gènes FT (flowering locus T) ou LFY (leafy) permettent de réduire la phase végétative juvénile de plusieurs années à 1 mois seulement. Cependant les fleurs ne sont fertiles qu'après 1 à 2 années de culture. Les problèmes de croissance généralement associés avec ces phénotypes à floraison précoce sont plus prononcés pour LFY comparé à FT<sup>358</sup>. L'accélération de la floraison du peuplier vient également d'être obtenue chez le

<sup>351</sup> Gallardo, F., Fu, J.M., Canton F.R. et al. 1999. *Planta* 210(1):19-26.

<sup>352</sup> Habash, D.Z., Massiah, A.J., Rong, H.L. et al. 2001. *Annals of Applied Biology* 138(1):83-89.

<sup>353</sup> Martin, A., Lee, J., Kicker, T. 2006. *Plant Cell* 18(11):3252-3274.

<sup>354</sup> Yanagisawa, S., A. Akiyama, H. Kisaka, H. Uchimiya, and T. Miwa. 2004. Metabolic engineering with Dof1 transcription factor in plants: Improved nitrogen assimilation and growth under low-nitrogen conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101(20):7833-38.

<sup>355</sup> Hong, Y. Y., S. P. Devaiah, S. C. Bahn, B. N. Thamasandra, M. Y. Li, R. Welti, and X. M. Wang. 2009. Phospholipase D epsilon and phosphatidic acid enhance Arabidopsis nitrogen signaling and growth. *Plant Journal* 58(3):376-87.

<sup>356</sup> Misson, J., K. G. Raghothama, A. Jain, J. Jouhet, M. A. Block, R. Bligny, P. Ortet, A. Creff, S. Somerville, N. Rolland, P. Doumas, P. Nacry, L. Herrerra-Estrella, L. Nussaume, and M. C. Thibaud. 2005. A genome-wide transcriptional analysis using Arabidopsis thaliana Affymetrix gene chips determined plant responses to phosphate deprivation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102(33):11934-39.

<sup>357</sup> Flachowsky, H., A. Peil, T. Sopanen, A. Elo, and V. Hanke. 2007. Overexpression of BpMADS4 from silver birch (*Betula pendula* Roth.) induces early-flowering in apple (*Malus x domestica* Borkh.). *Plant Breeding* 126(2):137-45.

<sup>358</sup> Hoenicka, H., D. Lehnhardt, A. Nowitski, and M. Fladung. 2009. Evaluation of gene containment strategies under greenhouse conditions using early flowering poplar. in *2009 IUFRO Tree Biotechnology International Conference*, edited by Whistler. Whistler (British Columbia - Canada).

peuplier en réprimant le gène CEN1 (centroradialis<sup>359</sup>).

Les axes de recherche visant à raccourcir les cycles de croissance chez les arbres (= doper la croissance, cf. surexpression de la glutamine synthétase chez le peuplier<sup>360</sup>), à réorienter les flux de carbone vers la croissance plutôt que la floraison et plus généralement à comprendre la régulation des développements végétatif et reproductif ainsi que les changements de phase sont très importants. La compréhension des voies métaboliques liées à l'acide gibbérellique apparaît très importante pour accélérer le développement végétatif. Différents gènes candidats (GA20ox, PHOR-1) ont déjà été testés chez le peuplier avec des résultats très encourageants pour la croissance juvénile en serre et au champ<sup>361</sup>. A noter que la modification des promoteurs natifs semble nécessaire pour obtenir des effets très spectaculaires (> 60 % d'amélioration de la croissance en volume contre 10 % avec les promoteurs natifs).

Il existe aussi une forte demande, chez les espèces récalcitrantes, pour stimuler/induire la multiplication végétative (bouturage, microbouturage, embryogenèse somatique, etc.) des génotypes élites sélectionnés dans les programmes d'amélioration. Les questions portant sur l'enracinement de boutures/microboutures et l'induction de l'embryogenèse somatique à partir de tissus matures sont ainsi cruciales pour déployer de nouvelles variétés offrant des gains génétiques supérieurs à chaque cycle. Les gènes impliqués sont encore peu connus (cas de la carotte<sup>362</sup>) et doivent être recherchés dans les espèces d'intérêt. Il y a nécessité de mieux comprendre comment l'expression de tous ces gènes peut conduire à initier le processus d'embryogenèse (profils d'expression à chaque étape, dans différents tissus, etc.).

#### 4.4.8. La transgénèse comme stratégie pour autoriser ou accélérer l'acclimatation d'espèces tropicales

Une stratégie alternative pourrait consister à faire porter l'effort de recherche sur l'acclimatation de plantes à haute valeur de production énergétique et à haute qualité environnementale (bilan carbone). L'exemple type est la canne à sucre (bilan carbone positif). L'effort de recherche pourrait porter sur la sélection de fonds génétique adaptés pour l'amélioration de la résistance au froid et à la sécheresse (par transgénèse). Cette thématique est par exemple active en France chez d'autres espèces exotiques d'intérêt pour la biomasse comme *Eucalyptus gunnii*<sup>363,364</sup>.

Tableau 42 : analyse SWOT appliquée à l'amélioration des propriétés agronomiques par transgénèse : cas des cultures intensives

	Forces	Faiblesses
--	--------	------------

<sup>359</sup> Brunner, A., C.T. Wang, T. Fujino, X. Sheng, G. Page, R. Mohamed, and S. Strauss.

Ibid. Regulation of shoot meristem identity and activity in poplar.

<sup>360</sup> Zhong P.J., Gallardo, F., Pascual, M.B. et al. 2004. *New Phytologist* 164(1):145.

<sup>361</sup> Hinchee, M., Rottmann, W., Mullinax, L. et al. 2009. *In Vitro Cellular and Development Biology Plant* 45(6):619-629.

<sup>362</sup> Tanaka, M., A. Kikuchi, and H. Kamada. 2009. Isolation of putative embryo-specific genes using stress induction of carrot somatic embryos. *Breeding Science* 59(1):37-46.

<sup>363</sup> Marque, G., M. Navarro, S. Levêque, J.P. Borges, C. Teulière, and C. Marque. 2009. Structural analysis of *Eucalyptus gunnii* family of CBF transcription factor genes involved in cold tolerance. in *2009 IUFRO Tree Biotechnology International Conference*, edited by Whistler. Whistler (British Columbia - Canada).

<sup>364</sup> Trontin, J.F., Harvengt, L. 2002. *Informations – Forêt – Afocel*, 6 pp.



Diagnostic interne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilité d'adapter les variétés déjà améliorées à des pressions biotiques (ravageurs, maladies) et abiotiques (stress hydrique, salin, pollution des sols, etc.)</li> <li>• Domestication rapide des espèces sauvages, comparativement aux techniques conventionnelles</li> <li>• Rapatriement rapide de nouveaux caractères dans les populations d'amélioration et sources de gènes multiples (cisgénèse, gènes synthétiques, etc.)</li> <li>• Production ciblée de molécules d'intérêt</li> <li>• Possibilité de raccourcir les cycles de développement (rotations plus rapides chez les arbres : modification de la floraison, de la croissance)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retard considérable en France de la recherche en transgénèse (moyens faibles des agences de financement, absence de soutien des organismes de recherche, essais au champ systématiquement détruits)</li> <li>• Aspects dissuasifs du coût de la protection industrielle et surtout du coût de la réglementation des événements de transgénèse</li> <li>• Difficulté de démontrer la stabilité d'expression à long terme des transgènes chez les espèces à cycle long ou à reproduction végétative.</li> <li>• Difficulté d'apprécier des effets pléiotropiques chez ces mêmes espèces</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques, concurrences, etc).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendements économiques plus importants à partir d'aires de plantation restreintes</li> <li>• Préservation des populations naturelles, mise en place de réservoirs de biodiversité</li> <li>• Amélioration de la compétitivité des ressources (sources d'énergie renouvelable, réduction de l'effet de serre, phytoremédiation)</li> <li>• Réduction des pollutions liées à l'exploitation (émissions de CO<sub>2</sub>, économies d'énergie et de produits chimiques)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le lobbying anti agriculture intensive, anti OGM, anti progrès</li> <li>• Multiples brevets à l'étranger (promoteurs et construits, techniques de transformations, souches <i>Agrobacterium</i>).</li> <li>• Difficulté de coexistence en raison de seuil de présence fortuite pour l'étiquetage des produits arbitrairement bas.</li> </ul>

Tableau 43 : analyse SWOT appliquée à l'amélioration des propriétés agronomiques par transgénèse : cas des cultures extensives

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Diagnostic interne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• « Thérapie génique » des populations « naturelles » face à des ravageurs qui mettent en danger une espèce</li> <li>• Adaptation de nos variétés aux changements climatiques brusques (stress hydrique en particulier)</li> <li>• Amélioration d'espèces à long cycle de vie pour lesquelles les programmes conventionnels sont très lents (arbres).</li> <li>• Amélioration des espèces diffuses, impossibles à gérer en plantation ouverte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mêmes items que ci-dessus.</li> </ul>
	<b>Opportunités</b>	<b>Limitations</b>
Caractéristiques externes (marchés, politiques publiques,	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adaptation de nos cultures à des objectifs encore lointains exprimés par des politiques publiques (bioénergie, CO<sub>2</sub>,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cultures extensives considérées comme un patrimoine « intouchable » (variétés « anciennes », forêts « naturelles », espaces « récréatifs », etc.) conduisant au rejet de variétés améliorées par génie</li> </ul>

concurrences, etc).	ressources en eau, etc.)	génétique. • Retour sur investissement à long terme
---------------------	--------------------------	--

#### 4.4.9. Conclusions

Finalement nous constatons que si nous avons en gros connaissance des gènes impliqués dans les voies de synthèse de la majorité des constituants intéressants, nous connaissons mal les systèmes de régulation de ces voies métaboliques et de mise en place de ces constituants dans les systèmes biologiques plus complexes, organites (cytosol, vacuole, chloroplaste, réticulum, etc.) cellulaires, paroi, etc.

De plus, nous observons que cette méconnaissance des systèmes de régulation des grandes voies métaboliques *in planta* nous interdit pour le moment toute modification des rapports amidon/protéines, amidon/lipides, amylose/amylopectine, cellulose/ lignine, etc. Il faut rappeler qu'il est souvent observé que l'accumulation de certains produits peut inhiber toute croissance et tout développement. La notion d'organe est importante à prendre en compte : potentialité des organes à stocker sans risque pour la plante des molécules d'intérêt pour la chimie et possibilité de récolter facilement ces organes.

Trois objectifs en lien avec l'efficacité et l'efficience de la chimie verte sont discernables :

- Produire en quantité des produits bio-sourcés aux caractéristiques recherchées par l'industrie, concentrés dans des organes facilement récoltables (graines, feuilles) et facilement extractibles sans détérioration. Assurer une régularité dans les rendements.
- Réduire l'hétérogénéité intra-spécifique et intra-génotypique des molécules stockées dans des organes récoltables en sélectionnant les constituants exprimés sur une base structurale et techno-fonctionnelle.

Dans un vision intégrée de la production et de la transformation, certaines technologies de modifications des produits bio-sourcés pourraient être revues pour répondre aux exigences des biotechnologies blanches et de la chimie verte, par exemple passage de modifications chimiques à des modifications enzymatiques (acylation de peptides dérivés des albumines du colza ou du tournesol, fonctionnalisation de peptides dérivés du gluten). Dans le même esprit, certaines techniques de fractionnement de la matière première devraient être reconsidérées pour préserver les structures et les fonctionnalités des produits bio-sourcés et faciliter leur valorisation ultérieure pour des usages techniques ; c'est en particulier le cas des fractions protéines de réserve des graines oléagineuses qui sont difficilement exploitables à partir des classiques tourteaux d'huilerie. Cette question doit être traitée en liaison avec l'amélioration de la fractionnabilité des graines.

#### Questions de recherche

- Acquérir des connaissances sur les voies de synthèse de certaines molécules, sur leur stockage et leur effet en retour sur les grandes fonctions physiologiques de croissance et de développement des plantes. Nous avons également à développer nos connaissances sur la mise en place des grandes structures cellulaires, paroi, fibres, organes de stockage (oléosomes). Il y a encore un gouffre d'ignorance entre l'expression des gènes et les structures macromoléculaires mises en place dans un organe donné et la viabilité des plantes aux champs.
- Développer des études de design *de novo* ou biomimétique (molécules fondées en partie sur des structures biologiques), de modélisation et de caractérisations structurale et fonctionnelle des polypeptides, guidées par une démarche d'ingénierie réverse.

## 5. Conception, évaluation et mise en perspective de systèmes de production durables

La conception et l'évaluation des systèmes de production végétale dédiés à des valorisations énergétiques ou chimiques de la biomasse constituent un enjeu considérable dont témoignent les controverses qui traversent aussi bien la communauté scientifique que les médias. De nombreuses dimensions sont en effet en jeu dans ces approches qui sont par essence systémiques : la définition d'itinéraires techniques adaptés aux espèces et variétés utilisées, l'étude des impacts environnementaux (biodiversité, gaz à effets de serre, eau), l'évaluation de l'efficacité énergétique, l'évaluation de la compétitivité économique des nouvelles filières, leur organisation et leur intégration territoriale, etc.

L'optimisation ou l'adaptation de systèmes de production existants et la création de nouveaux systèmes, qu'il s'agisse de cultures de plein champ, de plantations forestières ou de productions d'algues, posent des questions multiples à plusieurs échelles d'espace (la parcelle, le paysage, le bassin de production, le transport à longue distance des produits) et de temps (itinéraires techniques au cours d'une année, succession des cultures annuelles, durée des rotations, stockage des produits, renouvellement des cultures pérennes, entretien des installations confinées).

Dans la plupart des cas, ces filières pourront produire de nouveaux co-produits dont il faut analyser les utilisations possibles.

Au-delà du système de culture et de la valorisation des produits, les filières de production dédiées à des valorisations énergétiques ou chimiques de la biomasse posent plusieurs questions à l'échelle du territoire :

- Ces filières vont-elles contribuer à étendre les territoires agricoles et diversifier les mosaïques paysagères ?
- Comment organiser la coexistence avec les filières alimentaires ?
- Quels modes de gouvernance pour favoriser les coordinations territoriales ?

Enfin, comme pour tous les systèmes innovants, une solide évaluation *ex ante* doit être mise en place afin d'anticiper les conséquences et les impacts de leur éventuelle mise en place. Cette évaluation doit être multi-acteurs et multi-échelles et doit prévoir un suivi *ex-post* (réseaux, observatoires). Cette évaluation doit également prendre en compte les évolutions de contexte (voir éléments de prospective et tâche 11).

L'objectif de ce chapitre est d'identifier les questions de recherche posées (i) par la conception de nouveaux systèmes de production agricole et forestière liés à l'introduction de nouvelles espèces et variétés à finalités chimiques ou énergétiques, (ii) par la mise en place d'installations, confinées ou non, dédiées à la production d'algues.

Dans un premier temps, ce rapport effectue un état des lieux des caractéristiques des principaux systèmes de production envisagés pour la production de biomasse à finalités chimiques ou énergétiques ainsi qu'une analyse des facteurs limitants de ces systèmes.

Cet état des lieux dégage un certain nombre de points critiques portant notamment sur :

- la maîtrise technique de la production ;
- la maîtrise de la filière ;
- l'adaptation au milieu / aux espaces ;
- les services environnementaux associés à la filière ;

- les différents impacts environnementaux : sol (MO, fertilité, érosion), eau, GES, biodiversité ;
- les ressources nécessaires (azote, énergie, etc.)
- la compétitivité.

Dans une seconde partie, ce chapitre aborde quelques questions transversales aux filières :

- Quels sont les principaux facteurs à prendre en compte dans la conception et l'évaluation de tels systèmes de production ?
- Les méthodes de conception et d'évaluation (outils multi-critères, analyses de cycle de vie) de systèmes de production actuelles sont-elles adaptées ou adaptables à ces systèmes spécifiques ou mixtes ? Quels dispositifs de suivi mettre en place ?
- Ces filières vont-elles contribuer à étendre les territoires agricoles et diversifier les mosaïques paysagères ?

D'autres questions transversales ont été évoquées brièvement mais sont plus particulièrement abordées dans d'autres tâches de l'ARP :

- Quel éclairage la conception de systèmes de production peut apporter au choix de la stratégie en termes d'espèces : transfert de gènes vers des cultures déjà présentes ou domestication ?
- Quelle gouvernance et politiques publiques pour accompagner ces systèmes ?

Enfin, ce chapitre synthétise des pistes de recherche possibles pour accompagner le développement de tels systèmes de production : les cibles d'amélioration des systèmes de production, l'intégration dans des filières territorialisées (associations, mosaïques) et sur la gouvernance et les politiques publiques.

Les questions de recherche plus spécifiques à une filière donnée ont été reportées en annexe.

### 5.1. Etat des lieux des systèmes considérés et des connaissances associées

Cet état des lieux ne prétend donc pas être exhaustif des espèces possibles et doit permettre de couvrir les différentes questions de recherche posées. Ainsi, les plantes riches en amidon (pomme de terre, blé, maïs), dont la culture ne pose pas de questions nouvelles ou spécifiques du point de vue de la conception et de l'évaluation des systèmes de culture, ne sont pas traitées.

Tableau 44 : Familles et espèces végétales considérées

Famille	Végétaux aquatiques	Espèces pérennes	Espèces annuelles ou pluri-annuelles
Espèce	•Algues	•Forêts naturelles •TCR/TTCR •Jatropha •Miscanthus/Switchgrass •Canne énergie	•Colza •Sorgho •Triticale •Luzerne •Associations céréales/légumineuses

## 5.1.1. Utilisation/développement de systèmes de production d'algues

### 5.1.1.1. Etat de l'art des spécificités de la filière

#### *Caractéristiques des produits, co-produits, sous-produits*

La filière algue mondiale transforme actuellement 14 millions de tonnes fraîches de macro-algues marines par an qui sont essentiellement produites dans les pays asiatiques (à 80 %) par aquaculture (à 95 %) et sont majoritairement destinées au marché de l'algue alimentaire (à 75 %), consommée fraîche ou sous forme peu processée (séchée, saumurée, découpée, fragmentée, reconstituée...).

Le ¼ restant de la production mondiale, c'est-à-dire non destinée à l'alimentation humaine directe, est pour moitié utilisé par l'industrie des hydrocolloïdes, extraits des parois cellulaires des algues brunes et rouges, et destinés eux aussi en grande partie à l'industrie alimentaire mais en temps qu'additifs. L'autre moitié (12 % de la production mondiale) fait l'objet d'une variété d'usages plus restreints de la biomasse macro-algale pour la fabrication de fertilisants, d'additifs pour alimentation animale, de matières bases pour la cosmétique et la thalassothérapie. L'ensemble de ces applications industrielles génèrent normalement des sous-produits d'extraction de nature organique particulière ou solubles qui doivent entrer dans des filières de traitement.

La filière algue des pays occidentaux (Europe, Amérique du nord, Amérique du sud) repose encore sur un approvisionnement important à partir d'algue de récolte dans les champs naturels, plus ou moins complété selon le pays par de l'importation. L'aquaculture est très peu développée dans les pays occidentaux (sauf pour une algue à colloïde au Chili) et la valorisation en algue alimentaire directe est une activité marginale. Le secteur de transformation des algues est dominé en Occident par l'industrie des hydrocolloïdes et les applications industrielles non alimentaires (au sens alimentation directe). Le développement de l'aquaculture pour ces applications industrielles non alimentaires est aujourd'hui envisagé en Europe comme moyen éventuel de substitution pour les activités traditionnelles de récoltes (apparues de plus en plus « non durables » dans certains pays) et pour le développement offshore de nouvelles productions à finalité chimique ou énergétique.

Il existe une filière mondiale de production de microalgues qui, à la différence des macroalgues peuvent être d'eau douce ou marines. Ce sont des « algues fourrage » pour les premiers stades de l'aquaculture de poissons (2000 T/an), des compléments alimentaires peu à pas transformés (4 000 T/an de Spirulines, Chlorelles, Odontella,...), des algues sources de pigments (caroténoïdes), toujours pour des produits alimentaires, ou utilisées en cosmétique pour leur contenu en EPS, DHA, EPA,... Les microalgues sont aussi utilisables en traitement des eaux (type lagunage) mais avec des usages très limités des biomasses générées.

Le contenu lipidique très élevé de certaines microalgues d'eau douce place depuis longtemps ces dernières en bonne position pour des tentatives de valorisation énergétiques de type biodiesel.

#### *Caractérisation des systèmes possibles (cibles, type de systèmes, filière, etc.)*

Les macroalgues cultivées dans le monde sont soit fixées sur des lignes non flottantes (Kappaphycus et Eucheuma), soit fixées sur des dispositifs flottants ancrés dans les eaux peu profondes du proche littoral. Les algues se développent à l'état fixé sur diverses formes de substrats artificiels. De rares espèces peuvent être cultivées sur fonds sédimentaires, en milieu côtier ou en bassins de lagunes (Gracilaires). Le cycle de production de la macroalgue est généralement annuel, avec des variantes saisonnières selon le cycle de développement des espèces. Les techniques sont depuis longtemps

maitrisées à grande échelle en Asie. Elles ont été testées à une période récente et à petite échelle dans les pays occidentaux (dont la France). Les rendements atteints par ces cultures en mer sont de 10-15 tonnes sèches à l'hectare de dispositif flottant par an.

La production mondiale de microalgues est assurée de manière plus variée que celle des macroalgues, avec, selon l'espèce cultivée, divers degrés de maîtrise des paramètres de culture : bassins de lagunes, bassins à terre, bioréacteurs à circulation fermée,... Contrairement à la production en mer de macroalgues, où l'opération de récolte intervient après un cycle de croissance plus ou moins long (à l'instar des productions agricoles annuelles), les phases de production et de récolte des microalgues sont généralement associées de manière continue (particulièrement en bioréacteur fermé). Les rendements atteints par les cultures en bassins sont de plusieurs tonnes sèches à l'hectare de bassin. Le potentiel prospectif de photo bioréacteurs verticaux est annoncé pour certaines latitudes à plus 300 tonnes sèches/ha installé par an.

La production commerciale de macroalgues cultivées en suspension, c'est-à-dire avec des techniques de bases utilisées pour les microalgues, est encore très limitée dans le monde, mais a fait l'objet d'essais variés permettant d'évaluer son potentiel et ses contraintes. La production mesurée pour de telles cultures est variable selon l'espèce et le lieu, s'échelonnant de 25 à plus de 100 tonnes sèches/ha par bassin et par an.

### ***Conduite technique/ adaptation au milieu /reconversion / système de production***

Pour les cultures en mer sur dispositifs flottants, la conduite technique des différentes productions s'apparente d'une manière générale à celle des productions conchylicoles, avec les mêmes types d'écloseries à terre (ayant à pomper et rejeter de l'eau en milieu littoral), des structures de cultures fixes ou flottantes à ancrer sur estran-petits fonds < 10m, des moyens à la mer légers, impliquant aussi socio professionnellement les mêmes acteurs. Par rapport à celles des coquillages, les cultures de macroalgues se distinguent par un cycle de production dépendant de la lumière : installations des lignes de culture toujours proche de la surface et production saisonnière liée à la photopériode comme en agriculture (mais sous nos latitudes et pour de l'algue alimentaire, avec ensemencements en automne et récolte au printemps). Les secteurs géographiques recherchés pour l'algoculture sont comme pour la conchyliculture les eaux du proche littoral (appartenant au DPM pour la France), peu profondes, abritées et fertiles pour la production primaire. Si les cultures sur longues lignes devait se développer en offshore, espace beaucoup plus ouvert que le milieu littoral pour de nouvelles productions, elles nécessiteraient la mise au point d'infrastructures et de technologies adaptées aux conditions de mer du large, le développement d'un logistique adaptée à l'éloignement des côtes, et devrait sans doute s'adresser à un secteur professionnel nouveau, plus apparenté à celui de la pêche pour les conditions d'exploitation et à celui de grands groupes industriels pour leur capacité d'investissement et de maîtrise d'une nouvelle filière de production.

La conduite technique des cultures de microalgues peut, on l'a vu, s'envisager en eau douce comme en eau marine et présenter différents degrés de sophistication et de compétences techniques. Le caractère hors-sol de ces productions réduit les contraintes d'implantation ordinairement liées à une disponibilité de milieu naturel exploitable, et l'activité de production peut être rapprochée de celle de biotechnologies industrielles. Différents systèmes sont actuellement à l'étude pour être maîtrisés offshore. La production continue de microalgues sera plus ou moins saisonnière en fonction de la latitude.

### ***Ressources (azote, eau, énergie, etc.)***

- Théoriquement, pas de problème de besoins en eau.
- Fertilisation naturelle, mais zones favorables à rechercher.
- Peu d'énergie requise au niveau du « travail des parcelles » mais logistique potentiellement consommatrice en situation d'off-shore.
- Intrants d'infrastructure (cordages, bouées etc) à intégrer dans un bilan carbone.
- Accès à des surfaces cultivables potentiellement facile en offshore, avec possibilités d'intégration dans des champs d'éoliennes.
- Pour les bioréacteurs à microalgues, les utilisations d'eau pompée, de fertilisants et d'énergie sont minimisées en systèmes intensifs à circulation fermée.

### ***Bio-agresseurs***

Ils existent dans l'aquaculture intensive d'algues alimentaires. De multiples pathologies bactériennes, fongiques et virales ont été décrites dans les principales espèces cultivées en Asie. Pour certaines pathologies affectant les stades cultivées en écloséries, certains traitements prophylactiques simples ont été appliqués. La sélection de cultivars résistants aux maladies est très peu développée. Les interactions avec les organismes brouteurs sont également décrites avec des effets plus importants sur les algues rouges et vertes qui sont moins bien défendues que les algues brunes. Risques plus faibles en off-shore de part l'absence de prédateurs benthiques, mais l'état sanitaire microbiologique des plantules issues des écloséries sera déterminant. Les contraintes sur les cultures de microalgues sont identiques à celles rencontrées en écloséries de macroalgues et très dépendantes des mesures préventives. En milieu ouvert, les sources de contamination sont accrues et les interactions possibles avec des virus, des bactéries ou des protistes hétérotrophes sont assez peu documentées.

### ***Impacts environnementaux***

Pas de risques connus pour les macroalgues cultivées sur dispositifs flottants, sauf à une mauvaise gestion éventuelle de macro-déchets produits par l'exploitation (cordages, flotteurs, plastiques divers,...), ou à un défaut de maîtrise de pollutions maritimes diverses liées à la navigation. Les algues elles-mêmes ne rejettent pas de matière organique comme c'est le cas pour des productions animales. Elles peuvent même assurer un service environnemental par leur capacité épuratrice du milieu, notamment pour sa charge en sels nutritifs qui peut être à la base d'un risque d'eutrophisation (par exemple dans les périmètres de salmonicultures). Les cultures d'algues sont aussi connues comme créant des « effets de récifs » susceptible d'accroître la biodiversité naturelle des grands espaces maritimes. Les cultures d'algues sont souvent « sollicitées » dans des projets d'aquaculture intégrée, même si la polyculture n'est pas nécessairement la meilleure amie de la rentabilité industrielle.

### ***Compétitivité, concurrence vis-à-vis des autres filières***

Le développement de cultures d'algues dans les eaux littorales est généralement en concurrence potentielle avec d'autres productions aquacoles, la petite pêche côtière, les besoins de circulation maritime (qui ne sont pas liés au tourisme dans les pays producteurs actuels mais le seraient pour partie dans les pays occidentaux). Avec l'installation proche des côtes de dispositifs flottants, on doit aussi s'attendre de la part du riverain occidental à un ressenti de nuisance visuelle comparable à celui suscité par les champs d'éoliennes. Ces contraintes de nuisance visuelles et de concurrence pour l'utilisation de l'espace diminueraient vers l'offshore où il est plus facile de spécialiser de grandes zones d'intérêt économique.

## **Lacunes de connaissances**

### ***La maîtrise technique de la production***

- Les techniques sont bien maîtrisées en eaux littorales pour moins d'une dizaine d'espèces de macroalgues essentiellement valorisées en alimentation humaine et dans l'industrie des colloïdes. Le travail d'adaptation de ces techniques reste à entreprendre (1) avec des espèces plus utilisables pour de nouvelles productions à finalités chimique ou énergétique (2) pour les conditions offshore qui réclament de nouveaux types d'infrastructures et d'organisation.
- Pour les micro-algues, une quarantaine d'espèces sont potentiellement cultivables en tant qu'algue fourrage. Par contre, un criblage de nouvelles espèces ou souches d'intérêt s'avère indispensable pour adapter les connaissances actuelles de laboratoire sur quelques espèces à des performances intéressantes dans des conditions de production industrielle de micro-algues.

### ***La maîtrise de la filière***

- Manque de résultats de modélisation/démonstration aux différentes étapes (« potentiel écologique » de production de matières premières, coûts unitaires de production, de transformation, capacités du marché)
- Identification peu précise des acteurs de la filière, à commencer par ceux de la production de matières première.

### ***L'adaptation au milieu / aux espaces***

- Besoin d'une identification large de zones maritimes exploitables, c'est-à-dire à fertilité naturelle suffisante, à fonds, courantologie et hydrodynamisme favorables, permettant aussi une logistique d'exploitation à coût raisonnable.
- Besoin de cahiers des charges plus précis des nouveaux types de culture pour sélectionner plus précisément ces zones et pour aussi prévoir et gérer des conflits d'usage.

### ***Les services environnementaux***

- Besoin de mieux évaluer le potentiel de ces services dans un contexte de lutte contre l'eutrophisation des eaux littorales, celle notamment engendrée par d'autres aquacultures.

### ***Les ressources (azote, énergie, etc.)***

- En matière de fertilisation des cultures de macroalgues, la Chine procède à des enrichissements par pulvérisation de nutriments issus d'activités humaines directement sur les filières d'algues. Les essais de polyculture montrent également l'intérêt d'étudier le potentiel d'amélioration de la fertilisation.
- L'adaptabilité des systèmes de production avec les installations d'éoliennes pourrait contribuer à diminuer considérablement les coûts de transport et donc les besoins énergétiques inhérents à la maintenance des cultures et au transport des récoltes.



## 5.1.2. Mobilisation de biomasse à partir de forêts naturelles

En préambule, il est important de signaler qu'on appelle ici « forêts naturelles » à objectif de production de biomasse des écosystèmes forestiers moins anthropisés que des cultures ligneuses dédiées ou les futaies à courte rotation regroupés sous le vocable TCR .

Il s'agit ainsi des systèmes de gestion en taillis simple et taillis sous futaie (TSF), mais aussi de formations feuillues plus ou moins dégradées du fait d'une non gestion prolongée, à partir essentiellement de chêne, charme, hêtre et châtaignier. Selon Léonard<sup>365</sup>, il s'agit d'un héritage historique des forêts industrielles qui se sont répandues massivement en France à partir du XVII<sup>ème</sup> siècle pour alimenter les forges, bien avant l'apparition de la futaie réglée, et devenues progressivement des forêts énergétiques domestiques.

Aujourd'hui selon les données de l'Inventaire Forestier National (2008), 11 % de la forêt française seraient sous forme de taillis simple et 40 % sous forme de taillis sous futaie, soit la moitié de la surface forestière française. Les chênes sessile et pédonculé sont très largement majoritaires en représentant, tous régimes de gestion confondus, 36 % des surfaces, soit 5,4 M ha, un volume moyen de 166 m<sup>3</sup>/ha et une production de 5,6 m<sup>3</sup>/ha par an, soit deux à trois fois moins que les principales essences résineuses. La récolte marchande de bois énergie n'est que de 2,8 M m<sup>3</sup>, ce qui est dérisoire rapporté à la surface productive, mais il faut y rajouter la consommation domestique de bois de feu évaluée selon l'observatoire de l'énergie en 2006 à 33 M m<sup>3</sup>, dont 24 M m<sup>3</sup> récoltés en forêt de production hors haies et bosquets.

### 5.1.2.1. Premier axe : connaissances et méthodes pour évaluer des systèmes de culture durables

#### *Amélioration de l'efficacité d'utilisation des ressources*

D'une manière générale, la production de biomasse à partir des forêts françaises est supérieure à la récolte constatée. Les statistiques produites par l'Inventaire Forestier National (année 2008) et les Enquêtes Annuelles de Branches réalisées par les Services de l'Etat chaque année sont les suivantes :

Tableau 45 : Production des différents types de forêts

Production des forêts	Peuplements résineux	Peuplements feuillus	Peuplements mixtes (feuillus et résineux)
Surface (ha)	3 223 000	8 716 000	1 799 000
Volume sur pieds (m <sup>3</sup> /ha)	219	156	185
Accroissement biologique (m <sup>3</sup> /ha/an)	11,5	5,7	7,8
Production de biomasse ligneuse (millions m <sup>3</sup> /an)	37	49,7	14

<sup>365</sup> Léonard JP (2003) Forêt vivante ou désert boisé, la forêt française à la croisée des chemins. Ouvrage Ed L'Harmattan

Tableau 46 : Commercialisation du bois

Récolte commercialisée	Résineux	Feuillus	Total
Usages bois d'œuvre (millions m <sup>3</sup> /an)	16,4	6,3	22,7
Usages bois de trituration (millions m <sup>3</sup> /an)	6,9	5	11,9
Autres usages bois d'industrie et usages bois énergie (millions m <sup>3</sup> /an)	3,1 (principalement feuillus)		3,1
Total (millions m <sup>3</sup> /an)	23,3	14,4	37,7

Il convient de rajouter à ces chiffres la récolte de bois de feu pour l'autoconsommation, non déclarée dans les volumes de bois commercialisés, qui est estimée annuellement à 24 millions de m<sup>3</sup> (Observatoire de l'énergie, 2006). L'examen de ces chiffres fait ressortir un gisement potentiel important de biomasse ligneuse dans les formations forestières en place, et en particulier les peuplements de feuillus, qui pourraient être utilisés pour la production d'énergies renouvelables.

Les raisons de cette relative sous exploitation sont nombreuses mais on peut citer en priorité la structure de la propriété forestière constituée en moyenne de très petites parcelles dont le propriétaire hérite sans pour autant avoir ni l'envie ni la capacité de la gérer. Selon une enquête de la DGFAR (Ministère de l'Agriculture) en 2005, 35 % de la surface des forêts privées correspond à des propriétés de moins de 10 ha et 17 % à des propriétés d'une taille comprise entre 10 et 25 ha.

Ainsi face à ce potentiel que l'on peut aujourd'hui qualifier de « dormant », se pose la question des conditions et moyens à mettre en place pour mobiliser cette ressource supplémentaire à des fins d'usage pour la production d'énergie renouvelable. Les réponses sont de deux types : technique d'une part (méthodes de gestion et de récolte, axe 1), territoriale et socio-économique d'autre part (axe 2).

Il existe une très abondante littérature concernant la sylviculture des peuplements feuillus. Elle porte sur des schémas sylvicoles traditionnels qui ne peuvent s'appliquer que sur une partie des peuplements feuillus qui sont dits « améliorables », c'est-à-dire comportant un nombre d'arbres d'avenir jugé suffisant. Pour les taillis et les TSF dégradés, il s'agit de mettre en pratique des règles de gestion forestière après évaluation des possibilités : balivage, rajeunissement, éventuellement conversion en futaie sur souche si l'on veut produire également du bois d'œuvre. En cas de dépérissement si les souches sont trop âgées, ce qui est malheureusement fréquent, il faut envisager une régénération complète par plantation précédée ou non d'un dessouchage. En Dordogne, 50 000 ha de taillis de châtaigniers vieillissent dépérissent faute d'entretien, et à la faveur d'épisodes caniculaires récents. En revanche, il est très difficile d'évaluer l'impact de ces pratiques en termes de production, surtout dans un contexte de changement climatique.

La récolte mécanisée, seul moyen d'améliorer la productivité du travail et l'efficacité de la mobilisation est essentiellement le fait des peuplements résineux, en raison de leur poids économique dans la filière et de leur plus grande homogénéité. Une récolte supplémentaire de biomasse à court terme passe par la récolte d'une part croissante du gisement feuillu « dormant ». Plusieurs questions de recherche technologique et organisationnelle sous jacentes s'imposent.

## ***Evaluation de la durabilité des systèmes de culture***

Selon le principe de gestion durable, les critères utilisés pour évaluer la durabilité de la gestion des écosystèmes forestiers ont été édictés à la conférence de Vienne en 2002, faisant suite elle-même aux conférences de Strasbourg (1990), Helsinki (1993), et Lisbonne (1998). Ces conférences ont abouti à une définition officielle de la gestion durable des forêts: « gestion des forêts et terrains boisés, d'une manière et à une intensité telles qu'elles maintiennent leur diversité biologique, leur productivité, leur capacité de régénération, leur vitalité et leur capacité à satisfaire actuellement et pour le futur, les fonctions écologiques, économiques et sociales pertinentes au niveau local, national et mondial ; et qu'elles ne causent pas de préjudices à d'autres écosystèmes. »

Les 6 critères pan-européens de gestion durable sont les suivants :

1. Conservation et amélioration appropriée des ressources forestières et de leurs cycles mondiaux de carbone.
2. Maintien de la santé et de la vitalité des écosystèmes forestiers.
3. Maintien et encouragement des fonctions de production des forêts (bois et hors bois).
4. Maintien, conservation et amélioration appropriée de la diversité biologique dans les écosystèmes forestiers.
5. Maintien et amélioration appropriée des fonctions de protection dans la gestion des forêts (notamment sol et eau).
6. Maintien d'autres bénéfiques et conditions socio-économiques.

### **5.1.2.2. Second axe : Connaissances et méthodes pour raisonner le positionnement des cultures dans les exploitations et les territoires ?**

#### ***Analyse des motivations des propriétaires***

En matière forestière, l'acte de gestion repose sur des ressorts qui ne sont pas uniquement économiques. La mise sur le marché n'est bien sûr pas imposée à un rythme précis, et l'inélasticité de la récolte en réponse à une augmentation des prix est très élevée. Le désengagement sylvicole de nombreux propriétaires, de plus en plus souvent éloignés de leurs parcelles, peut restreindre l'objectif de gestion des taillis/TSF à des fonctions non bois (paysage, chasse, cueillette,...). A quelles conditions peut-on envisager de remobiliser une part significative de propriétaires dans la gestion des peuplements, et pour quel modèle d'intervention ? Quelles sont les motivations ? Aujourd'hui le seul « acte de gestion » pratiqué sur ce type de peuplements est trop souvent la coupe rase, avec une régénération naturelle (repousses de taillis et semis), ce qui ne satisfait plus les attentes de nombreux propriétaires.

Compte tenu des dimensions territoriales en lien avec la typologie des peuplements forestiers, des industries intervenant et/ou présentes localement, des habitudes des propriétaires, de la structure foncière de la propriété, des dimensions patrimoniales locales, cette question ne semble pas pouvoir se traiter de manière globale mais de manière ciblée, sur des territoires particuliers, pour développer des travaux pertinents.

Sur ce registre très peu de travaux ont été menées à ce jour. Mallein et Brun<sup>366</sup> ont élaboré des « profils

---

<sup>366</sup> Mallein P., Brun M., 2003. Profils d'identités situées des propriétaires forestiers. In Attentes et mobilisation des acteurs concernant la typologie de stations forestières, IDF – CNRS – INAPG (programme Ecofor).

d'identité situés » des propriétaires forestiers, dans le cadre d'une recherche portant sur l'usage des typologies de stations forestières. Leurs travaux, réalisés sur la base d'entretiens approfondis auprès d'un panel de propriétaires, ont permis de dégager différents profils de propriétaires, en fonction de la nature et de l'intensité de leurs rapports à la forêt. S'ils esquissent quelques lignes de force, leur étude ne permet pas de prendre en compte les dimensions territoriales et les jeux d'acteurs influant sur les choix des propriétaires forestiers. Par ailleurs, un audit patrimonial a été réalisé au sujet de la disposition des propriétaires forestiers à vendre du bois<sup>367</sup>. Les conclusions de cette recherche rejoignent les résultats de Mallein et Brun au sujet de la complexité des motivations des propriétaires ; elles mettent également en lumière l'importance des dynamiques collectives sur les territoires (plans de développement de massif, chartes forestières, etc.).

### **Quels schémas logistiques et quels verrous organisationnels / sociaux lever au plan territorial ?**

La mobilisation accrue de la biomasse, notamment sur des gisements dormants de taillis/TSF et peuplements feuillus abandonnés pose la question technique de la mise en œuvre d'une chaîne logistique opérationnelle : identification des freins techniques, conception de réseaux structurants (axes routiers principaux et secondaires, place de dépôt, etc.). Il s'agit également du développement des Technologies de l'Information et de la Communication chez les opérateurs économiques pour faciliter la flexibilité et la fluidité des échanges au sein de la chaîne logistique.

La question de la mobilisation réside également dans l'analyse territoriale des jeux d'acteurs à même de permettre la prise de conscience d'enjeux partagés. Les questions de recherche concernent la mise en mouvement de concepts opérationnels de résolution de problèmes complexes multi-acteurs, au-delà des principes de gestion multifonctionnelle qui se révèlent inopérants pour mobiliser les acteurs. Cela suppose une facilitation du débat intégrant toutes les parties prenantes, producteurs, transformateurs, usagers, élus,...

#### **5.1.3. Taillis à courte rotation**

Parmi les cultures lignocellulosiques herbacées et ligneuses, la foresterie à courte rotation est un des maillons prometteurs de la chaîne permettant la production rapide d'énergie renouvelable et présentant un bilan environnemental souvent plus favorable que les cultures annuelles. Elle est le plus souvent composée d'arbres à croissance rapide cultivés en plantations à fortes densités sur des sols agricoles pour la production de biomasse ligneuse avec des périodes de rotation inférieures à 15 ans. Pour les systèmes les plus productifs, en France métropolitaine, les productions moyennes annoncées varient entre 10 et 15 ts/ha par an (biomasse ligneuse aérienne sans feuilles). Les espèces utilisables sont assez nombreuses et elles ont toutes des exigences pédoclimatiques particulières. Parmi les plus documentées et les plus productives, il faut différencier :

- Les taillis à très courte rotation (TTCR) plantés à très fortes densités (jusqu'à 20 000 plantes par hectare), récoltés tous les 2 – 3 ans et à des fins bioénergétiques exclusivement. Ce schéma a été illustré notamment avec le saule au Royaume-Uni et en Suède<sup>368</sup> ou encore le peuplier (Italie)<sup>369</sup>. En France, les essais sont encore balbutiants<sup>370,371</sup>.

<sup>367</sup> Valenzisi M., 2007. Etude des motivations et blocages à la mise en vente de bois des propriétaires forestiers, rapport d'audit patrimonial. FCBA

<sup>368</sup> Dimitriou I. et Aronsson P. 2005. Des saules pour l'énergie et la phytoremédiation en Suède. *Unasylva* 221, 56: 47-50.

<sup>369</sup> Briens M. 2008. Analyse des facteurs techniques, socio-économiques et institutionnels de l'implantation de Taillis à Courtes et Très Courtes Rotations en Italie du Nord. Rapport de mission réalisé pour le FCBA. 50 p + annexes.

<sup>370</sup> AILE 2008a. Le taillis de Saule à très courte rotation – Guide des bonnes pratiques agricoles.

- Les taillis à courte rotation (TCR) plantés à des densités plus faibles (de l'ordre de 1 000 à 2 000 tiges/ha), récoltés tous les 7-10 ans et à des fins bioénergétiques, de trituration<sup>372, 373, 374, 375</sup>, voire parfois de bois d'œuvre<sup>376, 377, 378</sup>. Ce schéma a été illustré par exemple avec l'eucalyptus (Inde, Brésil, péninsule ibérique, sud ouest de la France) ou le peuplier (Italie, France). Mais de multiples autres essences (châtaignier, robinier, tremble, chêne rouge, ou un résineux comme le séquoia sempervirens) pourraient se prêter à ce genre de sylviculture, avec une productivité moindre mais capable de mettre en valeur des sols moins favorables.
- On peut également rajouter les modèles de culture ligneuse à courte rotation sans éclaircie (ou une éclaircie) à partir d'essences ne rejetant pas de souche, notamment les résineux comme le douglas, le pin maritime, le mélèze hybride. On parle pour ces espèces de cultures dédiées « biomasse » ou futaie à courte rotation (FCR), avec des variantes possibles comme les itinéraires « semi-dédiés », où l'on plante à forte densité, pour récolter la moitié des tiges avant la première éclaircie, pour repartir sur un itinéraire conventionnel « bois d'œuvre » par la suite.

	Energie	Programme papetiers	ONF	AILE / ADCE	Essais INRA	Essais FCBA	Total	Surfaces hors essais
Peuplier	84.4	180	100		20	10	394.4	364.4
Robinier	76.0						76.0	76.0
Eucalyptus	176.8	1500	700			100	2476.8	2376.8
Saule	174.6			150			324.6	324.6
<b>Total</b>	<b>511.7</b>	<b>1680</b>	<b>800</b>	<b>150</b>	<b>20</b>	<b>110</b>	<b>3271.7</b>	<b>3141.7</b>

**ONF** : Office national des Forêts  
**AILE** : Association d'Initiatives Locales pour l'Energie et l'Environnement  
**ADCE** : Association pour le Développement des Cultures Energétiques  
**INRA** : Institut National de la Recherche Agronomique  
**FCBA** : Forêt, Cellulose, Bois Construction, Ameublement

Source : FCBA

Programme Life Environnement Wilwater. 13 p.

<sup>371</sup> AILE 2008b. De la production d'énergie renouvelable à la valorisation d'effluents prétraités – 100 ha de taillis à très courte rotation de saule dans le Grand Ouest. Programme Life Environnement Wilwater. 20 p. Alker G., Bruton C. et Richards K. 2005. Assessment of Technical and Non-Technical Barriers. IEA Bioenergy Task 30: Short rotation crops for bioenergy systems.

<sup>372</sup> Cauvin B. et Melun F. 1994. Guide de culture du TCR Eucalyptus. AFOCEL, fiche Informations-Forêt n° 486.

<sup>373</sup> Bonduelle P. 1989. Sylviculture du peuplier en taillis à courtes rotations. AFOCEL, Paris, 41 p.

<sup>374</sup> Bonduelle P. et Berthelot A. 1994. La culture du TCR de peuplier, 1<sup>ère</sup> partie : objectifs et choix des sols et 2<sup>ème</sup> partie : itinéraire technique. Fiche Informations-Forêt AFOCEL 2-1994, fasc. 482 et 483: 145-156 et 157-172.

<sup>375</sup> Berthelot A. et Gavaland A., 2007. Produire de la biomasse avec des taillis de peuplier. Fiche Informations forêt n°760. Série 4, 6 p.

<sup>376</sup> Spinelli R. et Kofman P.D. 1996. Macchine per la raccolta delle biomasse forestali. Macchine e Motori agricoli 7-8 : 11-15.

<sup>377</sup> Scarascia-Mugnozza G.E., Ceulemans R., Heilman P.E., Isebrands J.G., Stettler R.F. et Hinckley T.M. 1997. Production physiology and morphology of Populus species and their hybrids grown under short rotation. II. Biomass components and harvest index of hybrid and parental clones. Canadian Journal of Forest Research 27: 285-294.

<sup>378</sup> Laureysens I., Deraedt W., Indeherberge T. et Ceulemans R. 2003. Population dynamics in a 6-year old coppice culture of poplar. I. Clonal differences in stool mortality, shoot dynamics and shoot diameter distribution in relation to biomass production. *Biomass and Bioenergy* 24: 81-95.

Figure 15 : Statistiques de surface en TCR/TTCR fin 2008 en France

On n'évoquera pas dans cette note l'utilisation de biomasse ligneuse issue de la récolte de rémanents d'exploitation de coupes rases conventionnelles qui suscitent des réflexions sur la mécanisation de la récolte, la logistique, ainsi que sur la fertilité à long terme des sols forestiers, problématiques au demeurant communes à la culture des TCR.

La biomasse est utilisée pour la fabrication de pâte à papier, le chauffage, la production de biocarburants ou la génération d'électricité, la production de biomolécules, matière première de la « chimie verte » (synthons). Des études récentes effectuées en Europe et en Amérique du nord montrent clairement que des connaissances essentielles concernant la production de ce type de systèmes ont été développées et que des pratiques pourraient être communément adoptées dans de larges zones mais les réticences locales restent un frein majeur à leur mise en œuvre.

A l'exception de quelques exemples notables (notamment les 1,2 millions d'ha de TCR en péninsule ibérique), le développement des cultures ligneuses à courte rotation pour la génération de bois énergie est très limité dans la majorité des pays membres de l'Union Européenne et de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA). Les utilisations alternatives des cultures ligneuses à courte rotation, telles que la phyto-remédiation, la bio-remédiation ou le traitement des eaux usées, ont dominé le développement de ces cultures, tandis que la production d'énergie ou de bois de trituration n'était pas une priorité dans la plupart des cas. Un rapport de l'IEA a récemment dressé un bilan des barrières techniques et non-techniques à une application à grande échelle des systèmes de cultures ligneuses à courte rotation. La plupart de ces barrières peut être expliquée par la jeunesse de l'industrie et par la nouveauté des approches concernant l'exploitation de ce type de culture, ne débouchant pas sur un modèle économique convaincant, faute d'une mécanisation adaptée, ainsi que par l'acceptabilité professionnelle et territoriale de modes de cultures intermédiaires entre l'agriculture et la sylviculture.

### ***Durabilité du système***

Les TCR et TTCR se différencient des peuplements forestiers proprement dits notamment par le fait que la quantité de carbone à long terme est inférieure à celle d'une forêt non exploitée ou d'une plantation à longue rotation. Les exportations fréquentes de bois sans rémanent hors de la plantation peuvent impliquer à terme un appauvrissement progressif du milieu en éléments minéraux. Dans ce type particulier de peuplement, la proportion et la dynamique des composés mis en réserve dans les souches et les racines au cours de la saison ainsi que le retour des feuilles au cours du cycle de production et de récoltes successives sont des éléments primordiaux à prendre en compte pour la bonne conduite de la plantation mais encore mal connus à l'heure actuelle. Les bilans d'exportation de minéralomasse réalisés sur eucalyptus et peuplier démontrent que celle-ci est très concentrée dans l'écorce et les feuilles. Les analyses réalisées en France soulignent que l'impact en termes de bilan entrée-sortie reste, comparativement aux cultures annuelles, beaucoup plus limité en particulier quand l'exploitation prévoit l'écorçage et le démembrement des houppiers<sup>379</sup>. La culture des TCR suppose cependant une gestion agronomique adaptée au maintien de la fertilité à long terme (fertilisation compensatoire en Ca, K et N).

Hormis les réticences socio-économiques que susciteront inmanquablement le développement à

---

<sup>379</sup> Nguyen The, Fauconnier T, Deleuze C. et Bouvet A. 2001. Bilan des éléments minéraux des plantations clonales d'eucalyptus du sud de la France. Rapport final d'étude. Conv. DERF AFOCEL n°01.40.03/99

grande échelle des cultures ligneuses à courte rotation, les difficultés les plus notables concernent le manque de connaissances en termes d'optimisation et de maintien de la productivité et de la fertilité des sols à long terme. En d'autres termes, les incertitudes et interrogations que se posent les acteurs de la filière concernant la productivité, à savoir (1) comment tirer un plein parti des interactions sol / site / productivité ? et (2) comment optimiser la combinaison de variétés ou d'espèces de façon à maximiser la production de biomasse et celle concernant la fertilité ?, ou (3) comment éviter l'appauvrissement rapide des sols et du système dans son entier en nutriments et en eau ?, demeurent les plus tenaces limitations au développement des cultures ligneuses à courte rotation<sup>380,381</sup>.

### ***Sélection du matériel végétal***

Des recherches sur les variétés adaptées aux types de terres sous-optimales doivent être menées en vue de parvenir à des rendements relativement élevés sur les zones les moins productives. La pression sur les terres agricoles les plus productives va augmenter considérablement dans un futur proche en raison de la concurrence entre les marchés des produits alimentaires, la production de bioénergie, les produits biosourcés et les contraintes environnementales. L'annonce de la performance pour les cultures énergétiques - les rendements par rapport aux besoins en engrais et à la consommation en eau - doivent être réalistes et ne pas se fonder seulement sur les meilleurs résultats obtenus sur les terres agricoles productives, mais aussi sur des terres de moins bonne qualité.

Une association appropriée plante / site maximise les rendements par rapport à la disponibilité en éléments nutritifs et en eau à l'échelle locale. Des recherches plus poussées sur le matériel végétal adapté aux différentes parties de l'Europe est nécessaire, en faisant porter les efforts de sélection tant sur des critères quantitatifs que qualitatifs : vigueur et adaptabilité aux conditions pédo-climatiques y compris aux épisodes de stress climatiques (froid, sécheresse estivale), efficacité d'utilisation de l'eau, métabolisme de l'azote, résistance aux maladies, qualité du bois, des fibres, chimie du bois,... Cette sélection peut compter sur les progrès récents de la génétique moléculaire, la sélection assistée par marqueurs étant une perspective réaliste pour les principales espèces forestières cultivées (peuplier, eucalyptus, pin maritime, pin taeda, douglas, etc.).

En outre, cette recherche devrait se faire en étroite collaboration avec les agriculteurs. Jusqu'à présent, la quasi-totalité des cultures a été sélectionnée par les chercheurs. Une analyse systématique pourrait aider à sélectionner des combinaisons de plantes prometteuses pour les différents types de contextes et de régions, afin d'optimiser la durabilité des systèmes de culture à courte rotation. Une telle analyse devrait également envisager les utilisations alternatives des terres, mais aussi les préoccupations socio-économiques.

### ***Impacts environnementaux***

La littérature souligne la nécessité d'un solide effort de recherche dans le domaine des impacts environnementaux des TCR et TCCR afin de s'assurer que les attentes associées à l'environnement puissent être satisfaites. L'impact probable du changement d'affectation des terres doit être examiné. Les questions environnementales majeures concernent l'effet potentiel de ce type de culture à courte

---

<sup>380</sup> Alker G., Bruton C. et Richards K. 2005. Assessment of Technical and Non-Technical Barriers. IEA Bioenergy Task 30: Short rotation crops for bioenergy systems.

<sup>381</sup> Petersen J.E. 2007. Short Rotation Forestry, Short Rotation Coppice and energy grasses in the European Union: Agro-environmental aspects, present use and perspectives. EEA Specific Contract No 2 3604/B2006/EEA.52793 - Deliverable Task 2b: Background report on current SRF/SRC cropping patterns in Europe.

rotation sur les régimes de l'eau et la recharge des eaux souterraines ainsi que les questions liées à la biodiversité et à l'impact potentiel sur le paysage.

Outre l'intérêt de mettre à disposition une biomasse renouvelable (effet de substitution au carbone d'origine fossile), le bilan réalisé en France sur les TCR d'eucalyptus ou de peuplier met en évidence un intérêt potentiel sur la structure des sols, un enrichissement en matière organique ou la qualité des eaux. Les TCR présenteraient en fait une biodiversité banale correspondant à des milieux jeunes et anthropisés. Pour autant des recherches sont nécessaires concernant la biodiversité, notamment aux étapes sensibles de l'itinéraire cultural (désherbage par exemple). Prendre en compte les effets d'échelle - temporelle et spatiale - est essentiel aux études de biodiversité, connaissant les difficultés d'établir, par ailleurs, des référentiels objectifs sur l'évolution de la biodiversité liée à un changement d'usage ou de régime de culture.

### ***Aspects socio-économiques***

Le prix payé pour les copeaux de bois ne peut actuellement pas rivaliser avec les prix des céréales. Les premiers retours sur investissement pour un TCR interviennent après 2 à 4 ans seulement, avec un grand besoin de fonds par le producteur dans les années 1 et 2. Le miscanthus a un avantage majeur sur les T(T)CR, à cet égard, puisqu'il est récolté chaque année. Il a aussi moins besoin de machines spécialisées. Les agriculteurs préfèrent généralement implanter des cultures qu'ils connaissent (par exemple le colza, le blé, etc.) pour les denrées alimentaires ou la production de biocarburants, car ils procurent des revenus annuels et n'ont pas besoin de machines spécialisées ou de sous-contractants pour la récolte ou l'implantation. Ils ont une préférence pour la flexibilité.

Les agriculteurs n'ont généralement pas l'habitude de mobiliser leurs terres pour 10 ans ou plus, ou de signer un contrat à long terme, notamment avec de grands industriels utilisateurs finaux qui n'ont aucune connexion avec l'industrie de l'agriculture. La durée de vie de ces plantations à courte rotation est également incertaine et, à long terme, des essais sont nécessaires, pour voir si le rendement diminue et la sensibilité aux parasites augmente avec l'âge de la plantation. Ce changement culturel, le passage d'un cycle annuel traditionnel (agriculture) à un cycle pluriannuel (plus proche de la sylviculture), ne doit pas être sous-estimé lors de la planification de l'expansion de la superficie des cultures pérennes énergétiques.

La recherche devrait également se concentrer sur la réduction des coûts d'approvisionnement et l'organisation, en collaboration avec les utilisateurs finaux (contrats à long terme, facilités de paiement). La substitution des cultures annuelles par des TCR soulève ainsi des questions d'acceptabilité technique, organisationnelle et culturelle, questions qui se posent également pour la conversion éventuelle de périmètres forestiers (conversion de taillis dégradés par exemple).

### ***Mobilisation de la biomasse / filière / société***

Les utilisateurs doivent garantir les quantités de biomasse dont ils ont besoin, avec suffisamment de biomasse tout au long de l'année et des contrats à long terme. Les défis sont liés à la taille de la plante, mais les approches de fourniture de combustible doivent satisfaire à la fois les grandes et les petites échelles d'application.

La question essentielle de l'optimisation des coûts de culture doit être abordée sur l'ensemble de la chaîne de production, par la mise au point d'une mécanisation adaptée aux spécificités d'une récolte de matière ligneuse, empruntant aussi bien aux problématiques agricoles que forestières. Il est nécessaire d'adapter les outils et les méthodes pour mécaniser la plantation, l'entretien des TCR, puis la récolte. La



logistique doit être optimisée à tous les niveaux, du façonnage ou du conditionnement (fagotage, broyage, etc.) à l'entreposage, ou au séchage, si nécessaire. Le conditionnement (pyrolyse, granulation, torréfaction) demande également à être évalué.

De meilleures estimations de la culture et des rendements potentiels des cultures énergétiques pour les plantes vivaces sont importantes pour la planification des utilisations en aval. Il serait donc très utile de mettre au point des approches de cartographie du potentiel biomasse au niveau national ou européen construites à partir des caractéristiques du sol, des précipitations et d'autres facteurs pertinents (pente, accessibilité, parcellaire,...) de l'échelon régional au niveau local. Ces approches ne doivent cependant pas seulement décrire les potentialités techniques, mais aussi les estimations économiques, logistiques et environnementales.

Enfin au delà de l'analyse des potentialités pédoclimatiques et des améliorations techniques (sélection du matériel végétal, techniques de production et de récolte,...), le développement des TCR ne peut déboucher sans l'analyse préalable des conditions d'une insertion réussie dans le tissu local, fondée sur l'adhésion des acteurs du territoire (producteurs, industriels et usagers, élus, citoyens). Le TCR doit contribuer à satisfaire des attentes bien comprises : enjeux économiques et environnementaux, utilité sociale, contribution à un équilibre global.

#### **5.1.4. Miscanthus/Switchgrass**

##### **5.1.4.1. Etat de l'art**

###### ***Conduite technique/ adaptation au milieu /reconversion / système de production***

Le miscanthus est une plante stérile qui se propage donc principalement par division du rhizome. La récolte du miscanthus peut s'effectuer avec du matériel existant, soit avec une ensileuse à maïs, soit avec une presse à haute densité après fauche<sup>382</sup>. Le switchgrass se propage par les graines et peut donc se semer<sup>383</sup>. Il n'y a pas de publication décrivant les méthodes de récolte du switchgrass mais les expériences européennes montrent qu'elles sont les mêmes que pour le miscanthus.

Les réseaux européens et américains ont montré que le miscanthus et le switchgrass pouvaient être cultivés sur une gamme assez large de type de sols selon des critères de texture de sol et de pH. Les niveaux de production de ces 2 plantes sont très variables selon les conditions et les déterminants de cette variabilité, (liés à des types de sol, de climat, à des stress abiotiques ou biotiques, ou à la maîtrise technique) ainsi que leur hiérarchie sont encore mal connus.

Le miscanthus et le switchgrass ont une pérennité supérieure à 10 ans<sup>384,385,386</sup>. Il n'y a pas de récolte en première année, et l'entrée en pleine production se fait entre la deuxième et la sixième année de

---

<sup>382</sup> Venturi, P., W. Huisman, and J. Molenaar. 1998. Mechanization and costs of primary production chains for *Miscanthus x giganteus* in the Netherlands. *Journal of Agricultural Engineering Research* 69.

<sup>383</sup> Monti, A., P. Venturi, and H.W. Elbersen. 2001. Evaluation of the establishment of lowland and upland switchgrass (*Panicum virgatum* L.) varieties under different tillage and seedbed conditions in northern Italy. *Soil & Tillage Research* 63.

<sup>384</sup> Christian, D.G., A.B. Riche, and N.E. Yates. 2008. Growth, yield and mineral content of *Miscanthus x giganteus* grown as a biofuel for 14 successive harvests. *Industrial Crops and Products* 28:320-327.

<sup>385</sup> Clifton-Brown, J.C., J. Breuer, and M.B. Jones. 2007. Carbon mitigation by the energy crop, *Miscanthus*. *Global Change Biology* 13:2296-2307.

<sup>386</sup> Fike, J.H., D.J. Parrish, D.D. Wolf, J.A. Balasko, J.T. Green, M. Rasnake, and J.H. Reynolds. 2006. Long-term yield potential of switchgrass-for-biofuel systems. *Biomass & Bioenergy* 30:198-206.

culture. Le contrôle des adventices est primordial pendant l'implantation de la culture, alors qu'il n'est qu'occasionnellement nécessaire en pleine production<sup>387,388</sup>. Aucune publication ne fait état de la nécessité d'appliquer des fongicides ou insecticides. Le miscanthus est récolté une fois par an le plus souvent en fin d'hiver. Le switchgrass peut être récolté une à deux fois par an, en automne ou en fin d'hiver<sup>389,390</sup>.

### **Ressources (azote, eau, énergie, etc.)**

Le miscanthus et le switchgrass sont 2 plantes en C4 dont le potentiel de production est très élevé<sup>391,392</sup>. Toutefois, d'une étude à l'autre, les niveaux de production sont très hétérogènes et les critères qui y sont liés, comme les efficacités d'utilisation du rayonnement, de l'eau ou de l'azote, sont très variables.

Pour le miscanthus, le facteur limitant principal de la production semble être la disponibilité en eau<sup>393,394</sup>. En terme de réponse à l'azote les résultats d'études sont très hétérogènes. Certaines études ont mis en évidence des réponses positives à la fertilisation azotée<sup>395,396</sup> alors que d'autres auteurs ont montré qu'il n'y avait aucun effet de la fertilisation azotée<sup>397</sup>, même à long terme<sup>398</sup>. Le consensus est que le miscanthus a de faibles besoins en azote. Cela semble s'expliquer par la présence des rhizomes qui servent d'organes de stockage pour les éléments minéraux<sup>399</sup>. De plus, la chute des feuilles durant l'hiver et la mort de certaines parties de rhizomes sont à l'origine du « recyclage » d'une partie des éléments minéraux<sup>400</sup>.

---

<sup>387</sup> Christian, D.G., and E. Haase. 2001. Agronomy of Miscanthus, p. 21-45, In M. B. Jones and M. E. Walsh, eds. Miscanthus for energy and fibre. James & James, London.

<sup>388</sup> Parrish, D.J., and J.H. Fike. 2005. The biology and agronomy of switchgrass for biofuels. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24:423-459.

<sup>389</sup> Monti, A., G. Bezzi, G. Pritoni, and G. Venturi. 2008. Long-term productivity of lowland and upland switchgrass cytotypes as affected by cutting frequency. *Bioresource Technology* 99:7425-7432.

<sup>390</sup> Fike, J.H., D.J. Parrish, D.D. Wolf, J.A. Balasko, J.T. Green, M. Rasnake, and J.H. Reynolds. 2006. Long-term yield potential of switchgrass-for-biofuel systems. *Biomass & Bioenergy* 30:198-206.

<sup>391</sup> Heaton, E.A., F.G. Dohleman, and S.P. Long. 2008. Meeting US biofuel goals with less land: the potential of Miscanthus. *Global Change Biology* 14:2000-2014.

<sup>392</sup> Kiniry, J.R., C.R. Tischler, and G.A.v. Esbroeck. 1999. Radiation use efficiency and leaf CO2 exchange for diverse C4 grasses. *Biomass and Bioenergy* 17.

<sup>393</sup> Richter, G.M., A.B. Riche, A.G. Dailey, S.A. Gezan, and D.S. Powlson. 2008. Is UK biofuel supply from Miscanthus water-limited? *Soil Use and Management* 24:235-245.

<sup>394</sup> Cosentino, S.L., C. Patane, E. Sanzone, V. Copani, and S. Foti. 2007. Effects of soil water content and nitrogen supply on the productivity of Miscanthus x giganteus Greef et Deu. in a Mediterranean environment. *Industrial Crops and Products* 25:75-88.

<sup>395</sup> Ercoli, L., M. Mariotti, A. Masoni, and E. Bonari. 1999. Effect of irrigation and nitrogen fertilization on biomass yield and efficiency of energy use in crop production of Miscanthus. *Field Crops Research* 63:3-11.

<sup>396</sup> Lewandowski, I., and U. Schmidt. 2006. Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. *Agriculture Ecosystems & Environment* 112:335-346.

<sup>397</sup> Danalatos, N.G., S.V. Archontoulis, and I. Mitsios. 2007. Potential growth and biomass productivity of Miscanthus x giganteus as affected by plant density and N-fertilization in central Greece. *Biomass & Bioenergy* 31:145-152.

<sup>398</sup> Christian, D.G., A.B. Riche, and N.E. Yates. 2008. Growth, yield and mineral content of Miscanthus x giganteus grown as a biofuel for 14 successive harvests. *Industrial Crops and Products* 28:320-327.

<sup>399</sup> Christian, D.G., P.R. Poulton, A.B. Riche, N.E. Yates, and A.D. Todd. 2006. The recovery over several seasons of N-15-labelled fertilizer applied to Miscanthus x giganteus ranging from 1 to 3 years old. *Biomass & Bioenergy* 30:125-133.

<sup>400</sup> Kahle, P., S. Beuch, B. Boelcke, P. Leinweber, and H.R. Schulten. 2001. Cropping of Miscanthus in Central Europe: biomass production and influence on nutrients and soil organic matter. European

Pour le switchgrass, peu d'études ont évalué l'impact d'un stress hydrique sur la production d'une culture établie. Comme pour le miscanthus, aucun consensus n'existe sur la réponse à l'azote du switchgrass. Dans leur étude bibliographique, Parrish et Fike<sup>401</sup> montrent que selon les auteurs, les réponses à l'azote sont inexistantes ou au contraire positives jusqu'à des niveaux d'apport de 200 kgN/ha. Le switchgrass aurait également une capacité à recycler l'azote *via* des mécanismes de translocation/remobilisation. Une particularité du switchgrass est que la réponse du rendement aux facteurs de production (eau et azote) est très dépendante des types variétaux en interaction avec la localisation géographique<sup>402,403</sup>.

En terme de bilans énergétiques, les résultats des études sont assez variables, notamment en raison de la variabilité des rendements pris comme référence. Lewandowski et Schmidt<sup>404</sup> ont montré que le miscanthus a un rendement énergétique 4 fois supérieur au triticales, mettant ainsi en avant l'intérêt des cultures pérennes peu exigeantes en azote. En effet, les apports d'azote et le travail du sol apparaissent comme les postes principaux de consommation d'énergie<sup>405</sup>.

### **Modèles de croissance**

Des modèles de croissance ont été développés pour le miscanthus et le switchgrass. Pour le miscanthus il s'agit du modèle MISCANMOD<sup>406</sup> auquel ont été ajoutées des fonctions de stress hydrique<sup>407,408</sup>. Pour le switchgrass, il s'agit du modèle ALMANAC paramétré pour cette espèce et qui possède des fonctions de stress hydrique, azoté, et thermique<sup>409,410</sup>.

### **Bio-agresseurs**

Aucune référence indiquant d'éventuels bio-agresseurs du miscanthus et du switchgrass n'a été

---

*Journal of Agronomy* 15:171-184.

<sup>401</sup> Parrish, D.J., and J.H. Fike. 2005. The biology and agronomy of switchgrass for biofuels. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24:423-459.

<sup>402</sup> Stroup, J.A., M.A. Sanderson, J.P. Muir, M.J. McFarland, and R.L. Reed. 2003. Comparison of growth and performance in upland and lowland switchgrass types to water and nitrogen stress. *Bioresource Technology* 86:65-72.

<sup>403</sup> Fike, J.H., D.J. Parrish, D.D. Wolf, J.A. Balasko, J.T. Green, M. Rasnake, and J.H. Reynolds. 2006. Long-term yield potential of switchgrass-for-biofuel systems. *Biomass & Bioenergy* 30:198-206.

<sup>404</sup> Lewandowski, I., and U. Schmidt. 2006. Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticales as determined by the boundary line approach. *Agriculture Ecosystems & Environment* 112:335-346.

<sup>405</sup> Boehmel, C., I. Lewandowski, and W. Claupein. 2008. Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. *Agricultural Systems* 96:224-236.

<sup>406</sup> Clifton-Brown, J.C., B. Neilson, I. Lewandowski, and M.B. Jones. 2000. The modelled productivity of *Miscanthus x giganteus* (GREEF et DEU) in Ireland. *Industrial Crops and Products* 12:97-109.

<sup>407</sup> Clifton-Brown, J.C., P.F. Stampfl, and M.B. Jones. 2004. Miscanthus biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions. *Global Change Biology* 10:509-518.

<sup>408</sup> Hastings, A., J. Clifton-Brown, M. Wattenbach, P. Stampfl, C.P. Mitchell, and P. Smith. 2008. Potential of *Miscanthus* grasses to provide energy and hence reduce greenhouse gas emissions. *Agronomy for Sustainable Development* 28:465-472.

<sup>409</sup> Kiniry, J.R., M.A. Sanderson, J.R. Williams, C.R. Tischler, M.A. Hussey, W.R. Ocumpaugh, J.C. Read, G. VanEsbroeck, and R.L. Reed. 1996. Simulating Alamo switchgrass with the ALMANAC model. *Agronomy Journal* 88:602-606.

<sup>410</sup> Kiniry, J.R., K.A. Cassida, M.A. Hussey, J.P. Muir, W.R. Ocumpaugh, J.C. Read, R.L. Reed, M.A. Sanderson, B.C. Venuto, and J.R. Williams. 2005. Switchgrass simulation by the ALMANAC model at diverse sites in the southern US. *Biomass & Bioenergy* 29:419-425.

répertoriée.

## **Impacts environnementaux**

### *Sol (MO, fertilité, érosion)*

Le miscanthus et le switchgrass présentent des caractéristiques a priori favorables au stockage de carbone dans les sols<sup>411</sup> (Lemus et Lal, 2005). En effet, elles permettent de part leur pérennité d'éviter le travail du sol. Elles présentent également une biomasse souterraine importante et on peut donc supposer que le renouvellement racinaire et la rhizodéposition permettent une entrée importante de carbone dans les sols. Enfin, ces cultures pérennes étant le plus souvent récoltées en fin d'hiver, des pertes sont observées avant la récolte, principalement à cause de la sénescence des feuilles<sup>412</sup>.

Plusieurs auteurs ont tenté de mesurer l'impact du miscanthus ou du switchgrass sur le carbone organique du sol, dans des expérimentations au champ<sup>413,414,415,416,417,418,419,420</sup>. Les résultats de ces expérimentations sont hétérogènes, ce qui est probablement dû, d'une part à une diversité de conditions pédoclimatiques et agricoles, et d'autre part, à des différences méthodologiques concernant l'évaluation des stocks de carbone. Cependant, de manière générale, la conversion de parcelles initialement en cultures annuelles semble permettre une augmentation du stock de carbone, alors que cela ne semble pas être forcément le cas lors de la conversion de parcelles initialement en prairies.

Quelques études ont été réalisées aux Etats-Unis concernant l'impact de l'introduction de différentes cultures énergétiques et notamment du switchgrass sur l'érosion des sols<sup>421</sup>. Les pertes de sols par érosion, très dépendantes des conditions pédoclimatiques, sont équivalentes entre switchgrass et cultures annuelles labourées l'année d'implantation, mais significativement réduites une fois la culture établie.

### *Eau, nitrates*

---

<sup>411</sup> Lemus, R., and R. Lal. 2005. Bioenergy crops and carbon sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24:1-21.

<sup>412</sup> Kahle, P., S. Beuch, B. Boelcke, P. Leinweber, and H.R. Schulten. 2001. Cropping of Miscanthus in Central Europe: biomass production and influence on nutrients and soil organic matter. *European Journal of Agronomy* 15:171-184.

<sup>413</sup> Garten, C.T., and S.D. Wullschlegel. 1999. Soil carbon inventories under a bioenergy crop (switchgrass): Measurement limitations. *Journal of Environmental Quality* 28:1359-1365.

<sup>414</sup> Ma, Z., C.W. Wood, and D.I. Bransby. 2000. Carbon dynamics subsequent to establishment of switchgrass. *Biomass & Bioenergy* 18:93-104.

<sup>415</sup> Ma, Z., C.W. Wood, and D.I. Bransby. 2000. Soil management impacts on soil carbon sequestration by switchgrass. *Biomass & Bioenergy* 18:469-477.

<sup>416</sup> Kahle, P., S. Beuch, B. Boelcke, P. Leinweber, and H.R. Schulten. 2001. Cropping of Miscanthus in Central Europe: biomass production and influence on nutrients and soil organic matter. *European Journal of Agronomy* 15:171-184.

<sup>417</sup> Zan, C.S., J.W. Fyles, P. Girouard, and R.A. Samson. 2001. Carbon sequestration in perennial bioenergy, annual corn and uncultivated systems in southern Quebec. *Agriculture Ecosystems & Environment* 86:135-144.

<sup>418</sup> Frank, A.B., J.D. Berdahl, J.D. Hanson, M.A. Liebig, and H.A. Johnson. 2004. Biomass and carbon partitioning in switchgrass. *Crop Science* 44:1391-1396.

<sup>419</sup> Hansen, E.M., B.T. Christensen, L.S. Jensen, and K. Kristensen. 2004. Carbon sequestration in soil beneath long-term Miscanthus plantations as determined by C-13 abundance. *Biomass & Bioenergy* 26:97-105.

<sup>420</sup> Clifton-Brown, J.C., J. Breuer, and M.B. Jones. 2007. Carbon mitigation by the energy crop, Miscanthus. *Global Change Biology* 13:2296-2307.

<sup>421</sup> Mann, L., and V. Tolbert. 2000. Soil sustainability in renewable biomass plantings. *Ambio* 29:492-498.

Dans un article de synthèse, Rowe et al.<sup>422</sup> indiquent qu'il est généralement attendu que les cultures énergétiques pérennes aient une demande en eau supérieure aux cultures annuelles, notamment à cause d'une période de végétation plus longue et d'un enracinement profond. Ainsi, les auteurs citent des travaux de modélisation qui indiqueraient une diminution de la pluie efficace (drainage et ruissellement) sous miscanthus de l'ordre de 50 % par rapport à une culture annuelle en Angleterre. La demande en eau du miscanthus serait cependant plus faible que celle des TCR.

Il n'existe qu'une référence publiée concernant les fuites de nitrates sous miscanthus. Il s'agit d'un suivi expérimental réalisé à Rothamsted, en Angleterre, sur un miscanthus en récolte tardive avec 3 niveaux de fertilisation azotée<sup>423,424</sup>. D'après ces données, on peut penser qu'une fois correctement installé, le miscanthus, avec une fertilisation azotée non excédentaire, constituerait un couvert intéressant du point de vue des fuites de nitrates. Par contre, il semble qu'il y ait des risques de pertes importantes en première année, en raison des faibles prélèvements d'azote par la plante. Une expérimentation non publiée effectuée au Danemark a abouti à des conclusions similaires. Il n'a pas été publié d'étude équivalente pour le switchgrass.

## GES

Le bilan d'un système de culture vis-à-vis des gaz à effet de serre (GES) est lié à plusieurs paramètres : le niveau d'intrants (engrais azotés en particulier) et les interventions culturales (consommation d'énergie fossile), les émissions de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) et le stockage/déstockage de carbone dans les sols. Concernant miscanthus et switchgrass, leurs pérennités, leurs faibles besoins en intrants notamment azotés (voir § ressources), ainsi que leurs rôles positifs sur le stockage de carbone dans les sols (voir § sol) leur permettent de présenter des émissions globales de GES plus faibles que celles des grandes cultures annuelles<sup>425,426</sup>.

Cependant, les connaissances sur les émissions de N<sub>2</sub>O, qui ont un impact important sur le bilan de GES, sont soumises à une forte incertitude<sup>427,428,429</sup>. De plus, très peu d'études ont été menées concernant les émissions de N<sub>2</sub>O pour les cultures énergétiques pérennes. La seule étude publiée pour le miscanthus concerne un suivi des émissions de N<sub>2</sub>O effectué au Danemark pendant une saison afin de comparer une culture de miscanthus avec 2 niveaux de fertilisation et une culture de seigle<sup>430</sup>. Les

---

<sup>422</sup> Rowe, R.L., N.R. Street, and G. Taylor. 2009. Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 13:260-279.

<sup>423</sup> Christian, D.G., and A.B. Riche. 1998. Nitrate leaching losses under Miscanthus grass planted on a silty clay loam soil. *Soil Use and Management* 14:131-135.

<sup>424</sup> Christian, D.G., A.B. Riche, and N.E. Yates. 2008. Growth, yield and mineral content of Miscanthus x giganteus grown as a biofuel for 14 successive harvests. *Industrial Crops and Products* 28:320-327.

<sup>425</sup> Styles, D., and M.B. Jones. 2007. Energy crops in Ireland: Quantifying the potential life-cycle greenhouse gas reductions of energy-crop electricity. *Biomass & Bioenergy* 31:759-772.

<sup>426</sup> St Clair, S., J. Hillier, and P. Smith. 2008. Estimating the pre-harvest greenhouse gas costs of energy crop production. *Biomass & Bioenergy* 32:442-452.

<sup>427</sup> Crutzen, P.J., A.R. Mosier, K.A. Smith, and W. Winiwarter. 2008. N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics* 8:389-395.

<sup>428</sup> Poitrat, E. 2008. Elaboration d'un référentiel méthodologique pour la réalisation d'Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération en France. ADEME, MEDDAT, MAP, IFP, ONIGC, Paris.

<sup>429</sup> Smeets, E.M.W., L.F. Bouwmanw, E. Stehfest, D.P. van Vuuren, and A. Posthuma. 2009. Contribution of N<sub>2</sub>O to the greenhouse gas balance of first-generation biofuels. *Global Change Biology* 15:1-23.

<sup>430</sup> Jorgensen, J. R., L. C. Deleuran, et al. (2007). "Prospects of whole grain crops of wheat, rye and triticale under different fertilizer regimes for energy production." *Biomass and bioenergy* 31: 308-317.

émissions totales estimées pour la période avril-novembre étaient 2 fois plus importantes pour le miscanthus fertilisé que pour le seigle, mais beaucoup plus faibles pour le miscanthus non fertilisé. Cela montre d'une part, l'effet du système de culture sur les niveaux d'émissions (*via* notamment un impact sur les conditions du sol – humidité, tassement,...) et également celui du niveau de fertilisation azotée.

### Biodiversité

Potentiel invasif de ces espèces :

Raghu et al.<sup>431</sup> indiquent que les caractéristiques recherchées pour les cultures énergétiques se retrouvent souvent chez des espèces invasives (plantes en C4, efficacité élevée pour l'eau et l'azote, pas de maladie ou de ravageur connus,...). Ils appellent donc à une évaluation du risque écologique avant d'introduire de nouvelles espèces à vocation énergétique. Barney et DiTomaso<sup>432</sup> ont analysé le potentiel invasif du miscanthus et du switchgrass dans le cas d'une introduction en Californie. Le protocole d'évaluation utilisé par ces auteurs indique un risque faible de comportement invasif pour *Miscanthus giganteus*, mais un risque non négligeable demandant une évaluation complémentaire pour le switchgrass. Cette différence entre les deux espèces est liée à la stérilité du miscanthus, qui réduit fortement le risque invasif. De plus, aucune propagation n'a été observée à partir de parcelles de miscanthus cultivées en Europe. Les auteurs indiquent que le risque invasif est lié non seulement aux caractéristiques de la plante introduite mais aussi à celle de la région cible (pédoclimat,...), ce qui implique de réaliser un travail d'évaluation spécifique pour chaque région cible.

Autres impacts sur la biodiversité :

Quelques études ont été réalisées à l'échelle de la parcelle, mais elles concernent uniquement le miscanthus. Ces études, effectuées sur des plantations assez récentes, ont généralement montré une abondance et/ou une diversité de plantes adventices, d'invertébrés et d'oiseaux plus importante dans les parcelles en miscanthus que dans des parcelles témoin en grandes cultures<sup>433,434</sup>. Bellamy *et al.*<sup>434</sup> indiquent cependant que l'intérêt du miscanthus pour la flore et la faune sauvage pourrait décliner avec l'âge de la culture (en lien avec une plus forte densité provoquant un déclin de la flore adventice et donc une diminution des ressources pour les insectes). Haughton et al.<sup>435</sup> ont également observé une plus grande abondance de papillons sur les bordures de parcelles en miscanthus, par rapport à des parcelles en grandes cultures, ce qui pourrait être lié au fait que les bordures des parcelles en miscanthus subissent moins de perturbations, grâce au faible nombre d'interventions culturales sur cette culture.

---

<sup>431</sup> Raghu, S., R.C. Anderson, C.C. Daehler, A.S. Davis, R.N. Wiedenmann, D. Simberloff, and R.N. Mack. 2006. Adding biofuels to the invasive species fire? *Science* 313:1742-1742.

<sup>432</sup> Barney, J.N., and J.M. DiTomaso. 2008. Nonnative species and bioenergy: Are we cultivating the next invader? *Bioscience* 58:64-70.

<sup>433</sup> Bellamy, P.E., P.J. Croxton, M.S. Heard, S.A. Hinsley, L. Hulmes, S. Hulmes, P. Nuttall, R.F. Pywell, and P. Rothery. 2009. The impact of growing miscanthus for biomass on farmland bird populations. *Biomass & Bioenergy* 33:191-199.

<sup>434</sup> Semere, T., and F.M. Slater. 2007. Ground flora, small mammal and bird species diversity in miscanthus (*Miscanthus x giganteus*) and reed canary-grass (*Phalaris arundinacea*) fields. *Biomass & Bioenergy* 31:20-29.

<sup>435</sup> Haughton, A.J., A.J. Bond, A.A. Lovett, T. Dockerty, G. Sunnenberg, S.J. Clark, D.A. Bohan, R.B. Sage, M.D. Mallott, V.E. Mallott, M.D. Cunningham, A.B. Riche, I.F. Shield, J.W. Finch, M.M. Turner, and A. Karp. 2009. A novel, integrated approach to assessing social, economic and environmental implications of changing rural land-use: a case study of perennial biomass crops. *Journal of Applied Ecology* 46:315-322.

### *Compétitivité, concurrence vis à vis des autres filières*

Peu d'études semblent disponibles sur ces questions de concurrence entre alimentaire et non alimentaire. Il en est de même pour l'arbitrage du choix des filières bioénergie à développer en fonction des contextes nationaux et locaux.

## **Lacunes de connaissances**

### ***La maîtrise technique de la production***

L'implantation du miscanthus et du switchgrass est encore une étape dont la réussite est incertaine. Les facteurs influençant la germination et/ou la levée de ces espèces sont mal connus, et les conséquences d'une mauvaise implantation sur la production à moyen/long terme sont inconnues.

En production, les besoins en nutriments sont faibles mais pas précisément définis. Aucune maladie et/ou ravageur n'ont été répertoriés et donc étudiés. Si ces cultures se développent, il semble important d'étudier les conséquences d'éventuelles apparitions de maladie/ravageur. La pérennité de ces cultures, et l'âge pour lequel on observe un déclin de la production, sont très peu connus en raison du faible nombre d'expérimentations de long terme. Aucune étude ne mentionne également la faisabilité technique et les conséquences, notamment environnementales, de la destruction du miscanthus et du switchgrass en fin de culture.

Pour finir, 2 aspects demandent également d'être étudiés. Pour *Miscanthus x giganteus*, il s'agit de son absence de variabilité génétique qui pourrait présenter un risque pour le développement de la plante à grande échelle. Pour le switchgrass, il s'agit du potentiel invasif de la plante qui n'a toujours pas été écarté.

### ***La maîtrise de la filière***

Les filières intégrant les cultures énergétiques pérennes ne sont qu'au début de leur développement. Les études sont encore très segmentées entre recherche sur le fonctionnement des plantes, sur les systèmes de culture et sur l'aptitude à la transformation. Certaines étapes des filières bioénergies potentielles n'ont pas encore fait l'objet d'études comme par exemple le pré-conditionnement et le stockage de la biomasse avant prétraitement.

### ***L'adaptation au milieu / aux espaces***

Un manque de connaissance de la réponse des deux plantes aux facteurs de milieu, en particulier pour l'eau et l'azote, a été mis en évidence. De même, peu de connaissances ont été acquises dans des conditions de sols marginaux ayant par exemple des pH très acides ou très basiques, des teneurs en éléments contaminants élevées, ou des textures particulières.

### ***Les ressources (azote, énergie, etc)***

Il existe un manque de connaissance majeur sur le rôle des réserves souterraines de ces deux plantes : à la fois sur les quantités d'éléments stockés et sur les flux et leurs déterminants entre parties aériennes et souterraines. Il y a également un manque de connaissance sur les leviers agronomiques et génétiques pour tirer partie de ce fonctionnement.

Un autre manque de connaissance important concerne les modèles de croissance des plantes, qui jusqu'ici ne prennent pas en compte le fonctionnement du rhizome et dont les fonctions de stress (eau, azote) sont encore peu robustes.

### **Les impacts environnementaux: sol (MO, fertilité, érosion), eau, GES, biodiversité**

Les connaissances sur les impacts environnementaux de la culture de miscanthus ou de switchgrass sont encore très incomplètes.

Sur le bilan de GES, la dynamique du carbone dans les sols est encore mal connue pour ces systèmes. On ne sait par exemple pas quantifier l'impact d'un certain nombre de modalités comme l'espèce, le mode de récolte, la durée de production,... La quantification des émissions de N<sub>2</sub>O est un autre point crucial. On connaît mal l'impact de ces systèmes sur les émissions (par rapport à des cultures annuelles).

Concernant les impacts sur l'eau, la modification du drainage sous l'effet de ces cultures (par rapport à des cultures annuelles) n'est pas quantifiée. Les niveaux de fuites de nitrates sur l'ensemble du cycle de chaque culture (implantation, pleine production, destruction) sont encore mal connus.

D'autre part, certains changements d'usage associés à l'implantation de cultures énergétiques (utilisation de terres boisées, en friches, en jachères ou en prairies) pourraient avoir des impacts environnementaux importants, notamment sur le stockage de carbone<sup>436</sup>. On ne dispose pas actuellement d'une typologie des terres potentiellement utilisables et les impacts potentiels de leur conversion sont mal connus. Enfin, les impacts d'un large développement des cultures énergétiques pérennes sur le fonctionnement des paysages agricoles et la biodiversité ont encore été peu évalués.

#### *Compétitivité*

L'absence de modèle de fonctionnement des plantes rend difficile l'évaluation précise à grande échelle du potentiel de production de ces cultures et de la concurrence potentielle avec les débouchés alimentaires.

## **5.1.5. Le jatropha**

### **5.1.5.1 Etat de l'art**

Le jatropha pousse dans les régions tropicales et subtropicales<sup>437</sup>. Il se présente sous la forme d'un arbre ou arbuste de 2 m à plus de 10 m de hauteur. Son écorce grise ou roussâtre est marquée de taches blanches. La feuille, en forme de cœur, est plus ou moins découpée en 3 à 5 lobes. Ses branches contiennent du latex. Souples quand elles sont jeunes, elles deviennent cassantes avec l'âge, ce qui peut gêner les opérations de récolte. Sa floraison est liée au régime des pluies. L'arbre donne des fruits de couleur jaune qui deviennent marron foncé en séchant. Les fruits contiennent 1, 2 ou 3 graines riches en huile. La multiplication du jatropha peut être réalisée par graines ou par boutures<sup>438</sup>. Cependant, la multiplication par bouturage étant plus « productive » que la multiplication par graines (difficultés de germination, perte de pouvoir germinatif, utilisation des graines pour l'extraction d'huile,...), elle a sans doute été préférentiellement utilisée, ce qui peut expliquer la faible diversité génétique observée dans les populations d'Inde et d'Afrique. Pourtant, des différences importantes

<sup>436</sup> Fargione, J., J. Hill, D. Tilman, S. Polasky, and P. Hawthorne. 2008. Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science* 319:1235-1238.

<sup>437</sup> Heller J. 1996. Physic nut *Jatropha curcas* L. Italy, *IPGRI*, 66 p.

<sup>438</sup> Heller J. 1991. Etude des potentialités génétiques et amélioration des méthodes de culture et de reproduction du pourghère (*Jatropha curcas* L.). Stuttgart, GTZ, 88 p.



peuvent être relevées au niveau des rendements de deux individus d'une même population, ce qui confirme que cette plante interagit de façon importante avec l'environnement dans lequel elle pousse.

Tableau 47 : Rendements observés chez le jatropha

Origine	Pays	Conditions	Rendements observés	
J. Cunha da Silveira <sup>439</sup>	Cap Vert	300 mm pluies au bord de la mer. Sols peu fertiles	200-800 kg de graines	Plants adultes
Projet Tempate <sup>440</sup>	Nicaragua	800 mm sols moyens	1720 kg de graines	Plants adultes
Patolia <sup>441</sup>	Inde	800 mm sols fertilisés	1270 kg de graines	Plants de 2 ans

### **Caractéristiques des produits, sous-produits, co-produits**

Le produit principal qu'est l'huile est utilisé traditionnellement pour faire du savon. Ceci dit, ses caractéristiques physiques permettent d'envisager son utilisation comme carburant sous climat chaud<sup>442</sup>.

- Densité : 0,920
- Température du point d'écoulement : -3°C
- Température point éclair : 236°C est parmi les plus bas des huiles végétales
- Pouvoir calorifique : 40 MJ/kg est parmi les plus hauts des huiles végétales

Le seul-sous produit qu'est le tourteau (toxique) n'est aujourd'hui valorisé qu'en tant qu'engrais organique de bonne qualité (2-5% de N, 2,5-3% de P et 1,3-1,6% de K)<sup>443</sup>

### **Conduite technique, adaptation au milieu**

Le jatropha est depuis longtemps cultivé sous forme de haies autour des champs paysans. C'est une plante qui s'adapte à des situations pédoclimatiques variées. Elle résiste bien à la sécheresse et on peut la trouver dans des zones à forte pluviométrie. Elle préfère les sols drainants, craint fortement les situations d'hydromorphie et le gel<sup>444</sup>.

Les densités de plantation en plein champ se situent entre 1 000 et 2 000 pieds à l'ha. Les plants issus de boutures produisent plus vite (2-4 ans) que ceux issus de graines (4-5ans)<sup>445,446</sup>. Aujourd'hui c'est la technique de la pépinière qui est la plus utilisée car elle permet la transplantation des plants dès les

<sup>439</sup> Cunha da Silveira J. 1934. Contribution à l'étude du pourghère aux îles du Cap Vert. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*. vol.6:n°1 : p.116-126.

<sup>440</sup> TECHNO SERVE, 2001, Biodiesel in Nicaragua : Growing Opportunity or Fruitless Effort ?, Columbia University, 57 p.

<sup>441</sup> Patolla J. S., Ghosh A., Chikara J., Chaudhary D. R. Parmar D. R.? Bhuvra H., 2007, Response of *Jatropha curcas* grown on wasteland to N and P fertilization, Seminar on *Jatropha Curcas* L. Agronomy and genetics, 26-28 March 2007, Wageningen, the Netherland, Published by Fact Foundation.

<sup>442</sup> Vaitillingom G., 2006, Les Biodiesels et les Huiles végétales pures, note de cours, CIRAD, 27 p

<sup>443</sup> Anon. 1992. Le pourghère (*Jatropha curcas*). *Aprima*. n°26 : p.15-20

<sup>444</sup> Heller J. 1996. Physic nut *Jatropha curcas* L. Italy, IPGRI, 66 p.

<sup>445</sup> Soares Severino L., R. De Lourdes Silva de Lima, A Bezerra Leao, N. Esberard de Macedo Beltrao, 2007, Root system characteristics of *Jatropha Curcas* plants propagated through five methods, Expert Seminar on *Jatropha Curcas* L. Agronomy and genetics, 26-28 March 2007, Wageningen, the Netherland, Published by Fact Foundation.

<sup>446</sup> Münch E., 1986. Die Purgernut (*Jatropha curcas* L.) Botanik, Ökologie and Anbau. Diploma thesis. University of Hohenheim, Stuttgart.

premières pluies. La taille est diversement pratiquée<sup>447</sup>. Son intérêt est reconnu tant pour améliorer la floraison que pour faciliter la récolte manuelle. Du fait de sa floraison échelonnée, la récolte s'effectue avec plusieurs passages d'où l'impossibilité actuelle de la mécaniser.

## Ressources

Très peu d'investigations ont été menées sur la fertilisation hormis l'utilisation des tourteaux issus du pressage des graines<sup>448,449</sup>. Ceux-ci donnent un résultat intéressant puisqu'ils peuvent doubler le rendement si tout le tourteau issu de la culture y est rapporté. Ceci dit, les expérimentations ont été menées en apportant aussi un engrais minéral ce qui rend flou l'effet de l'apport de tourteau, celui-ci pouvant interagir avec les apports minéraux effectués. Par contre, la présence de mycorhizes sur les racines des plants leur permet de mieux valoriser le phosphore contenu dans le sol<sup>450</sup>.

## Bio-agresseurs

La sensibilité aux maladies et aux insectes a longtemps été sous estimée<sup>451</sup>. On imaginait que la toxicité des parties aériennes protégeait l'arbre des agressions extérieures. Cependant quand on consulte la littérature<sup>452,453</sup>, on se rend compte que de nombreuses maladies ou prédateurs plus ou moins virulents ont été observés sur jatropha. Ces observations sur des arbustes isolés n'ont sans doute pas permis d'évaluer leurs niveaux de nuisibilité. L'expérience Nicaraguayenne a mis en évidence qu'en cas de concentration importante d'individus, le jatropha pouvait subir des attaques sérieuses<sup>454</sup>. Les 2 principaux prédateurs identifiés sur le projet ont été des punaises, *Pachycoris klugii* et *Leptoglossus zonatus*<sup>455</sup>. L'approche lutte biologique s'est intensifiée et des champignons entomopathogènes ont été identifiés pour lutter contre ces punaises<sup>456</sup>.

---

<sup>447</sup> Fact\_Fondation, Jatropha Handbook First Draft. 2006, 45 pages.

<sup>448</sup> Patolla J. S., Ghosh A., Chikara J., Chaudhary D. R., Parmar D. R., Bhuvra H., 2007, Response of *Jatropha curcas* grown on wasteland to N and P fertilization, Seminar on *Jatropha Curcas* L. Agronomy and genetics, 26-28 March 2007, Wageningen, the Netherland, Published by Fact Foundation.

<sup>449</sup> Ghosh A., 2007, Patolia J.S., Chaudhary D.R., Chikara J., Rao S.N., Kumar D., Boricha G.N., Zal A., Response of *Jatropha curcas* under different spacing to *Jatropha* de-oil cake, Fact Seminar on *Jatropha Curcas* L. Agronomy and genetics, 26-28 March 2007, Wageningen, the Netherland, Published by Fact Foundation.

<sup>450</sup> Sharma N, 2007, *Jatropha* Soil Conditions and fertilization, Reclamation of ash ponds and cultivation of *Jatropha curcas* using arbuscular mycorrhiza fungi as technology demonstration for biofuel production and environmental cleaning in Chattisgarh state, Seminar on *Jatropha Curcas* L. Agronomy and genetics, 26-28 March 2007, Wageningen, the Netherland, Published by Fact Foundation.

<sup>451</sup> Henning, Le pourghère, 1990, Mémoire de fin d'études traduit dans le cadre du programme Spécial Energie Mali, 277p.

<sup>452</sup> Shanker, 2006, Insect pests of *Jatropha Curcas* L. and the potential for their management, *Current Science*, Vol. 91, N° 2 .

<sup>453</sup> Sharma N, 2007, *Jatropha* Soil Conditions and fertilization, Reclamation of ash ponds and cultivation of *Jatropha curcas* using arbuscular mycorrhiza fungi as technology demonstration for biofuel production and environmental cleaning in Chattisgarh state, Seminar on *Jatropha Curcas* L. Agronomy and genetics, 26-28 March 2007, Wageningen, the Netherland, Published by Fact Foundation.

<sup>454</sup> Elegeert P., Stierner D., Vaitilingom G., 2002, Estudio de factibilidad usos alternativos del Tempate, Nicaragua, 34 p.

<sup>455</sup> Grimm C., J. M. Maes, 1997, Arthropod Fauna Associated with *Jatropha curcas* L in Nicaragua, A Synopsis of Species, their biology and Pest Status, Biofuels and Industrial Products from *Jatropha curcas*, Nicaragua, 9 p.

<sup>456</sup> Grimm C., Guharay H., 1997, Potential of Entomopathogenous Fungi for Biological Control of True Bugs in *J. Curcas* L Plantations in Nicaragua, , Biofuels and Industrial Products from *Jatropha*

## **Impact environnemental**

Concernant les études d'impacts environnementaux, peu de travaux ont été menés. Une étude publiée par l'IFEU<sup>457</sup> fait état d'une séquestration limitée du carbone au niveau de la culture, le principal gain étant celui de la substitution du gazole par l'huile ou son ester. Certains auteurs ont mentionné le jatropha comme un hôte de maladies à virus pour d'autres espèces cultivées telles que le manioc<sup>458</sup>. L'Australie du Nord considère le jatropha comme une plante mauvaise herbe susceptible d'être invasive<sup>459</sup>.

## **Compétitivité/autres filières**

Aujourd'hui, bien que de nombreux discours prétendent que le jatropha puisse être cultivé dans des zones marginales<sup>460</sup>, il est reconnu que pour être économiquement intéressant, sa zone de culture recoupe celle des plantes traditionnellement cultivées et qu'il peut donc venir en compétition avec les cultures alimentaires en cas de saturation foncière<sup>461</sup>. L'huile qu'on en tire est actuellement toxique et n'a donc pas de place sur le marché alimentaire. Enfin, cette production pour l'accès à l'énergie des zones difficilement accessibles représente un réel espoir pour le développement local et l'amélioration des conditions de vie des pays du sud.

## **Lacunes de connaissances**

En fait, aujourd'hui les connaissances sont réduites et tout reste à faire dans le domaine de la culture du jatropha. Beaucoup de sujets ont été abordés mais peu ont trouvé une réponse actuellement.

### **Maitrise technique**

Les écotypes actuels sont des écotypes sauvages. Ceux originaires d'Afrique et d'Asie ont peu de variabilité génétique. Il faut donc recourir aux écotypes d'origine américaine pour envisager entreprendre un programme d'amélioration variétale. De ce fait, si aujourd'hui on commence à mettre au point les méthodes de culture du jatropha, on ignore ce que sera la plante de demain et les techniques de culture qui lui seront associées.

La toxicité de la graine, liée à la présence d'esters de phorbol, limite la valorisation actuelle du tourteau à son utilisation comme engrais organique. Ce tourteau, pourrait devenir un aliment intéressant comme complément en alimentation animale dans ces régions rurales souvent mal desservies. Si des essais de détoxification n'ont pas abouti aujourd'hui, on peut espérer que l'amélioration variétale puisse prendre en compte l'élimination des produits toxiques pour rendre le tourteau comestible.

---

curcas, Nicaragua, 7 p.

<sup>457</sup> Reinhardt Guido, coordinator, 2008, Basic da for Jatropha production and use, IFEU, CSMCRI, UHIAPTS, 15 p.

<sup>458</sup> Münch E., 1986. Die Purgernut (Jatropha curcas L.) Botanik, Ökologjie and Anbau. Diploma thesis. University of Hohenheim, Stuttgart.

<sup>459</sup> Crothers, M. 1984. Physic Nut (Jatropha curcas L.). *Agnote n°583*. Northern Territory Department of Primary Industry and Fisheries (Australia).

<sup>460</sup> Heller J. 1996. Physic nut Jatropha curcas L. Italy, *IPGRI*, 66 p.

<sup>461</sup> Daniel, J.N., A realistic approach for jatropha oilseed production. Future Energy, published by the Maharashtra Energy Development Agency, 2005.

D'autres composés sont également présents dans les fruits, les graines et les autres parties de la plante. Certains d'entre eux présentent des propriétés pharmacologiques, utilisées localement mais non encore exploitées industriellement, et qui pourraient apporter une valeur ajoutée à la culture du jatropha.

En dehors de l'augmentation du rendement, un effort important devra cibler le regroupement de la floraison (et donc de la récolte) qui, du fait de l'absence de sensibilité au photopériodisme, s'effectue actuellement tant que les conditions environnementales sont bonnes.

### ***Maitrise de la filière***

Actuellement seule la filière « circuit court » a fait l'objet d'un intérêt de la part du développement. Elle consiste à valoriser la production dans sa région de culture. Les filières nationales ou internationales, si elles font l'objet de multiples réflexions en particulier pour les biocarburants, n'ont actuellement aucune réalité. Elles nécessitent une organisation et des infrastructures qui n'existent pas aujourd'hui

### ***Adaptation au milieu/espace***

Si la plante peut pousser dans des conditions difficiles, la production en graine est alors très faible. Peut-on améliorer cette production ? Les populations vivant dans ces zones marginales sont souvent les plus pauvres et la possibilité d'accès à l'énergie serait un atout majeur pour une amélioration de leurs conditions de vie.

Si l'on peut imaginer qu'une production à partir de haies ne pose pas de réels problèmes en matière d'occupation des sols, on ignore l'impact de la production en plein champ, si elle devait se développer dans ces régions où les ressources foncières sont limitées.

### ***Ressources/Impact environnemental***

Les besoins en éléments minéraux ne sont pas connus. Il semble que le jatropha ait une facilité particulière à développer une association avec des mycorhizes qui améliorent considérablement ses capacités de mobiliser certains éléments minéraux dans le sol.

Les besoins en eau sont mal connus. Une étude sud-africaine a cependant montré que les besoins en eau du jatropha étaient inférieurs à ceux d'une végétation naturelle qu'il remplacerait. Toutes ses informations sont à confirmer.

### ***Compétitivité***

Dans les zones soudano-sahéliennes il n'y pas, à l'heure actuelle, de plante pouvant offrir une production comparable à celle du jatropha pour des fins énergétiques. Par contre dans les zones plus humides, d'autres cultures sont sans doute plus productives. Afin d'augmenter l'intérêt de la culture, il faudrait évaluer ce que la diversification des coproduits (en matière de biocides par exemple) pourrait apporter à la consolidation de la filière.

## **5.1.6. La Canne-énergie**

### ***L'expérience de Barbade***

Peu de choses sont connues sur les spécificités des cannes fibreuses à des fins de production

d'énergie. Quelques informations sont disponibles sur la partie technologique, notamment par les essais infructueux de traitement industriel de l'hybride 1002. Les coûts énergétiques étaient trop élevés et des rendements à l'extraction trop faibles. Il aurait fallu repenser l'usine dont la rentabilité portait essentiellement à l'époque sur le sucre<sup>462</sup>.

Tableau 48 : Performances d'un hybride de canne sélectionné pour la fibre en Floride

Rendement / composition Résultats moyens sur 5 récoltes		Commercial CP65-357	Hybride* SP79-1002
t/ha	Biomasse aérienne	58	212
	Tige usinable	50	169
Composition en % tige usinable	Fibre	13,4	28,0
	Soluble	16,2	11,1
	Saccharose	14,0	8,4
	Monosaccharide	0,6	1,2
Biomasse aérienne d'une canne Kg		1,17	0,59
Hauteur moyenne d'une canne m		2,2	3,3
Sucre théorique t/ha		7	14,2
Fibre théorique t/ha		6,7	47,3

Nous disposons pour la partie agronomique de l'expérience des agronomes de Barbade. Les principales caractéristiques qui différencient les cannes fibreuses de la canne à sucre sont résumées par<sup>463</sup>:

- Une humidité pouvant être inférieure à 60 % dont le corollaire est une destruction totale en cas d'incendie, alors que dans le cas de la canne à sucre à 70 % d'humidité, seules les pailles se consomment et les tiges peuvent donc encore être récoltées après un incendie.
- Pertes importantes à la récolte avec des récolteuses à canne à sucre (environ 50 %) liées à la biomasse importante à traiter et à la hauteur des tiges (6 m et plus).
- Très grande vigueur et vitesse d'implantation lorsque les conditions climatiques sont bonnes. Le cultivar WI79460 mesure en moyenne 20 pieds (environ 6 m) à 22 mois et n'a pratiquement pas versé alors qu'il approche les 39 % de matière sèche (26,7 % de fibre et 12 % Pol).
- La production tend à s'accroître entre les repousses (caractéristiques déjà signalées pour l'hybride 1002 de Floride) alors qu'elle diminue pour la canne à sucre. L'une des conséquences est la réduction des fréquences des replantations. On estime en première approximation qu'une canne fibreuse peut être exploitée pendant 7 ou 8 ans pour 5 dans le cas de la canne à sucre.
- La faible densité de la canne fibreuse peut accroître les charges de transport. Les essais de Barbade montrent une diminution de la charge utile de 63,8 % pour des remorques de 5 t et de 61,9 % avec des remorques de 20t.
- La bagasse des cannes fibreuses produit moins de poussière que celle provenant de la canne à sucre. Elle est en outre moins hydratée en sortie de presse (stockage facilité).
- Les rendements sont très variables selon les conditions pédo-climatiques.

Cependant, les spécificités des variétés fibreuses sont particulièrement intéressantes en matière de durabilité des systèmes :

- Leur durée de vie plus importante permet d'amortir les charges de plantation sur une période plus longue.

<sup>462</sup> Giamalva, M.J., Clarke, S.J., Stein, J.M. 1984. SUGARCANE HYBRIDS OF BIOMASS. *Biomass* 6(1):61-68.

<sup>463</sup> De Boer, H.G. 1997. *Zuckerindustrie* 122(5):371-375

- Cette même qualité permet de limiter les travaux de dessouchage et de labour qui outre leur coût important participent largement au déstockage des sols en carbone et d'azote et à des émissions de GES.
- Leur vitesse de croissance permet un contrôle plus facile de l'enherbement lors de l'implantation de la culture. L'infestation par des semences d'adventices au cours du cycle de production sera limitée par la vitesse de fermeture du couvert en repousse et la durée de vie du couvert. Les besoins en herbicide et en sarclage devraient donc être largement diminués.

### 5.1.7. La Luzerne

Traditionnellement cultivée pour l'alimentation humaine et/ou animale, la luzerne présente, comme le triticale ou le sorgho, un intérêt en terme de production de biomasse car elle permet de concilier (i) un faible recours aux intrants externes du fait de leur rusticité et (ii) des niveaux de production élevés. En outre, leur introduction dans les successions de culture offre la possibilité de diversifier les cultures dans le temps (voire dans l'espace en les associant avec une seconde espèce sur une parcelle).

#### 5.1.7.1. Etat de l'art

##### ***Origine, diversité génétique et adaptation au milieu***

La luzerne est une plante herbacée pluriannuelle de la famille des légumineuses. D'une hauteur de 30 à 70 cm, elle développe une racine pivotante principale et des racines secondaires plus ou moins ramifiées. Sous l'appellation luzerne, on classe deux espèces botaniques, *Medicago sativa* et *Medicago falcata*, et leurs hybrides, englobés sous le nom de *Medicago media*. *M. sativa* et *M. falcata* sont adaptés à des conditions écologiques différentes. Les *Medicago sativa* proviennent de zones sèches (plateaux iraniens) où elles survivent grâce à leur enracinement profond. *Medicago falcata* vient au contraire de Sibérie occidentale : elle est remarquablement résistante au froid mais produit moins de rendement et moins de graines. La grande variabilité génétique de la luzerne lui permet de s'imposer dans des milieux contrastés, des plus chauds aux plus froids. La luzerne peut s'adapter à de nombreux types de sol. Toutefois, elle se développe moins bien dans les sols acides (pH < 5) ou très humides. Sa préférence va aux sols sains et bien structurés qui lui permettent de développer son enracinement pivotant<sup>464</sup>. Les modalités de classification des variétés de luzerne sont présentées en annexe 2.

##### ***Fonctionnement de la culture de luzerne***

La croissance de la luzerne est classiquement sous influence du rayonnement et de la température. Elle dépend également de la photopériode qui détermine la répartition des assimilats entre les parties aériennes et racinaires<sup>465</sup> : lorsque la photopériode diminue, la mise en réserve racinaire est accentuée et la croissance des tiges est ralentie. Après une coupe, la repousse de la luzerne s'effectue à partir des réserves des pivots racinaires. Ces réserves sont reconstituées lorsque la plante atteint le stage bourgeonnement (Figure 16).

<sup>464</sup> Mauriès M. 1994. La luzerne aujourd'hui.

<sup>465</sup> Lemaire G, Allirand J. 1993. Relation entre croissance et qualité de la luzerne : interaction génotype - mode d'exploitation. *Fourrages* 134: 183-198.

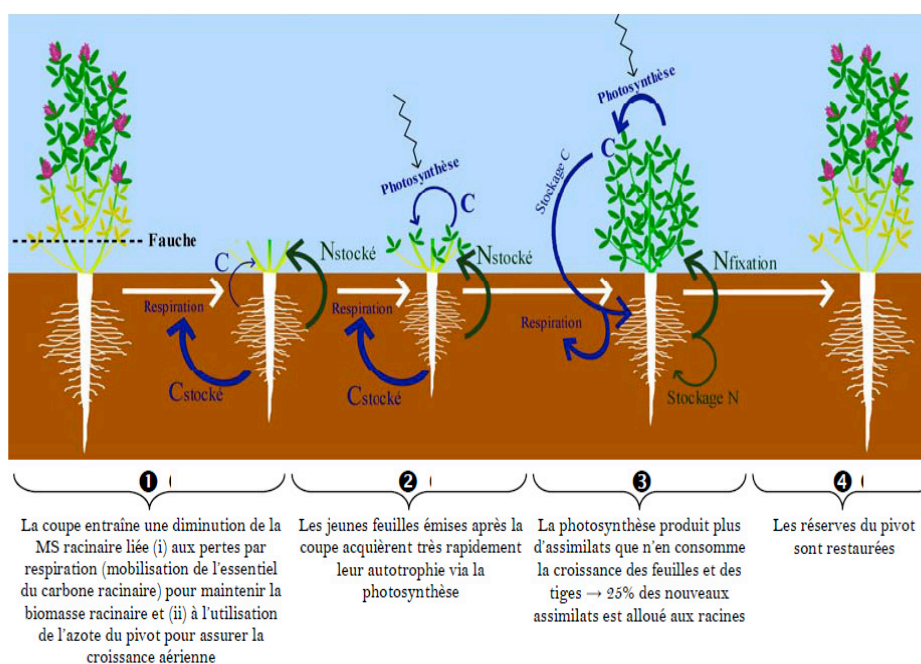


Figure 16 : Reconstitution des réserves racinaires de la luzerne après une coupe<sup>466</sup>

Le peuplement de luzerne évolue au cours d'un cycle de croissance et d'une année à l'autre. Au cours d'un cycle se produit une diminution du nombre de tiges<sup>467</sup>. Lorsque les luzernières vieillissent, le nombre de pied par m<sup>2</sup> diminue. Cette évolution est au moins partiellement compensée par une augmentation du nombre de tiges par pied.

La luzerne se caractérise par une répartition du rendement au cours de la saison remarquablement stable d'une année à l'autre. Dans un système de récolte à trois cycles, le premier cycle représente près de la moitié du rendement, le deuxième 30 % et le troisième 20 %. L'âge de la luzerne a également une influence sur le rendement, puisque selon Mauriès<sup>468</sup>, dans la région Rhône-Alpes, la luzerne atteint en général son maximum de rendement en troisième année de production. L'augmentation de rendement est essentiellement due à une amélioration de la production des deux premiers cycles. Au-delà de trois ans, la production a tendance à diminuer.

### **Importance et aire de production**

Au début des années 80, la luzerne était cultivée sur environ 32 millions d'ha dans le Monde, avec 70 % des surfaces présentes aux Etats-Unis, dans l'ex-URSS et en Argentine, et 17% des surfaces présentes en France, Italie, Canada et Chine<sup>469,470</sup>.

<sup>466</sup> Bernard F. 2007. Etude de la variabilité du rendement de la luzerne dans la plaine au sud de Niort. Mémoire de fin d'études ESA. 82 pages + annexes.

<sup>467</sup> Lemaire G, Allirand J. 1993. Relation entre croissance et qualité de la luzerne : interaction génotype - mode d'exploitation. *Fourrages* 134: 183-198.

<sup>468</sup> Mauriès M. 1994. La luzerne aujourd'hui

<sup>469</sup> Michaud, R., Lehmen, W.F., Rumbaugh, M.D., 1988. World distribution and historical development, In: Hanson, A. A. et al. (Eds.), *Alfafa and alfafa improvement*, American Society Agronomy, Madison, WI.

<sup>470</sup> Summers, C.G., 1998. Integrated pest management in forage alfafa. *Integrated pest management reviews* 3 :127-154.

Bien que la luzerne soit reconnue comme l'archétype de la « plante écologique », les surfaces consacrées à cette culture en France ont diminué de manière spectaculaire entre les années 60 et le début des années 90 avant de se stabiliser autour de 300 000 hectares. La chute observée entre 1960 et 1990 est liée à la fois à la régression de la production bovine et à l'évolution des rations des cheptels bovins<sup>471</sup>. Après la stabilisation observée dans les années 1990, la luzerne est pour certains aujourd'hui menacée de disparition ! « Bilan de santé de la PAC : l'avenir de la luzerne en péril »<sup>472</sup> titre ainsi la France Agricole le 20 novembre 2008. Une rencontre « Sauvez la luzerne en France » a même réuni le 28 octobre 2008 agriculteurs, chercheurs, transformateurs de luzerne et écologiste<sup>473</sup>. Dans le cadre de la renégociation de la PAC, la Commission Européenne a en effet fait clairement savoir qu'elle souhaitait supprimer les aides dont bénéficient encore les productions dites mineures, dont fait partie la luzerne déshydratée, produite en Champagne-Ardenne du fait de la présence de coopératives de déshydratation et d'un contexte pédo-climatique favorable. Cette région comprend un quart des surfaces françaises de luzerne et représente la première région productrice de luzerne pure<sup>474</sup>.

### **Utilisation et caractéristiques des matières récoltées (quantité, qualité)**

Actuellement, le débouché principal de la luzerne est l'alimentation animale. Les légumineuses, riches en protéines, permettent en effet de réduire les apports de correcteurs d'azote dans l'alimentation et d'assurer la fibrosité des rations composées essentiellement d'ensilage de maïs et complétées avec des quantités importantes de concentrés. La luzerne est cultivée soit en association avec d'autres espèces fourragères (dactyle, fétuque élevée, brome), soit pure. La luzerne peut être consommée sous forme de foin, sous forme enrubbannée, ensilée, ou sous forme déshydratée. Cette dernière forme implique une phase de déshydratation dans une usine, alors que les deux premières se déroulent entièrement au sein de l'exploitation agricole. La luzerne peut également être affouragée en vert ou pâturée. Cette dernière forme n'est toutefois pas très courante, non seulement en raison des risques de météorisation pour le bétail, mais aussi à cause du piétinement par les troupeaux qui risque de compromettre la longévité de la culture.

En alimentation animale, la luzerne est donc avant tout recherchée pour sa teneur en matières azotées. Cette teneur est déterminée par sa composition morphologique et en particulier le rapport feuilles/tiges : quand il augmente, la teneur en matières azotées augmente. Le deuxième critère important en vue d'une utilisation en alimentation animale est la digestibilité. Celle-ci est essentiellement déterminée par le pourcentage de feuilles dans la biomasse récoltée : elle augmente également avec le rapport feuilles/tiges. Or, Lemaire et Allirand<sup>475</sup> montrent que toute augmentation de production à une coupe donnée se traduit par une diminution de ce rapport. Exploiter la luzerne de manière optimale implique donc de trouver un compromis entre rendement en biomasse et teneur azotée.

Les caractéristiques qualitatives (en terme de composition chimique) de la luzerne en vue d'une utilisation pour produire de l'énergie ont été documentées et comparées à celle du switchgrass et du

---

<sup>471</sup> Thiébaud P, Parnaudeau V, Guy P. 2003. Quel avenir pour la luzerne en France et en Europe ? Le Courrier de l'environnement 49. <http://www.inra.fr/dpenv/thiebc49.htm>

<sup>472</sup> La France Agricole. 2008a. Bilan de santé de la PAC : l'avenir de la luzerne en péril (Coop de France déshydratation). *La France Agricole* 20/11/2008.

<sup>473</sup> La France Agricole. 2008b. Luzerne: plaidoyer pour maintenir les aides PAC. *La France Agricole*.

<sup>474</sup> Thiébaud P, Parnaudeau V, Guy P. 2003. Quel avenir pour la luzerne en France et en Europe ? Le Courrier de l'environnement 49. <http://www.inra.fr/dpenv/thiebc49.htm>

<sup>475</sup> Lemaire G, Allirand J. 1993. Relation entre croissance et qualité de la luzerne : interaction génotype - mode d'exploitation. *Fourrages* 134: 183-198.



phalaris dans le cadre d'une étude préliminaire<sup>476</sup>. L'utilisation en combustion apparaît difficile au vu des premières expérimentations réalisées<sup>477</sup>.

En France, la production en MS est de l'ordre de 10 à 12 t par ha et par an et peut atteindre 15 t en si la disponibilité en eau est importante<sup>478</sup>. De même que pour le triticale et le sorgho, les résultats acquis en région de grandes cultures dans le cadre du réseau expérimental multilocal REGIX permettent de positionner les rendements de cette culture par rapport à ceux d'autres cultures en vue d'une production de biomasse.

### **Mode de conduite et insertion dans les successions de cultures**

La luzerne peut être semée au printemps ou à la fin de l'été. Le semis au printemps peut être réalisé sous couvert d'une autre culture (tournesol ou orge). L'implantation est un élément important de la réussite de la culture<sup>478,479,480</sup>. C'est une étape délicate car la graine est petite et nécessite un lit de semence affiné et émiété en surface mais tassé en profondeur. Lors de son étude dans la plaine sud de Niort, Bernard<sup>481</sup> a ainsi observé qu'un quart des luzernes implantées sont détruites dès la première année. Lors d'une étude expérimentale menée en sol de rendzine développée sur craie à Châlons en Champagne (51), Justes et al<sup>482</sup> ont montré qu'une date d'implantation précoce de la luzerne (début août au lieu de mi-juillet) associée à un niveau d'alimentation hydrique adéquat au cours de l'été permet d'accumuler des réserves azotées et d'accélérer le rythme de repousse des tiges au printemps suivant.

Le nombre de traitements phytosanitaires global est réduit, tout comme les apports de fertilisants puisque la culture ne nécessite pas d'apport d'azote. Une revue des méthodes de protection intégrée de la culture de luzerne a été réalisée par Summers<sup>483</sup> et indique qu'un large éventail de stratégies est disponible pour cette culture, tout en reconnaissant qu'elles demeurent encore très peu utilisées aux Etats-Unis.

La luzerne peut être irriguée, en particulier en été, ce qui permet de sécuriser les stocks de fourrage<sup>484</sup>. Il paraît toutefois paradoxal d'irriguer la luzerne alors qu'elle est réputée pour sa capacité de production en situation sèche.

---

<sup>476</sup> Dien, B.S., Jung, H.J.G., Vogel, K.P., Casler, M.D., Lamb, J.F.S., Iten, L., Mitchell, R.B., Sarath, G., 2006. Chemical composition and response to dilute-acid pretreatment and enzymatic saccharification of alfalfa, reed canarygrass, and switchgrass. *Biomass and bioenergy* 30 :880-891.

<sup>477</sup> Agrice, 1998. La Luzerne. Fiche Technique 8 p.

<sup>478</sup> Mauriès M. 1994. La luzerne aujourd'hui.

<sup>479</sup> Chambre d'agriculture des Deux-Sèvres, INRA. 2008. La luzerne (fiche réalisée dans le cadre du Réseau d'élevage Poitou-Charentes).

<sup>480</sup> Le Gall A. 1993. Situation actuelle des grandes légumineuses : atouts et perspectives. *Fourrages* 134: 121-144.

<sup>481</sup> Bernard F. 2007. Etude de la variabilité du rendement de la luzerne dans la plaine au sud de Niort. Mémoire de fin d'études ESA. 82 pages + annexes.

<sup>482</sup> Justes, E., Thiébeau, P., Avice, J.C., Lemaire, G., Volenec, J.J., Ourry, A., 2002. Influence of summer sowing dates, N fertilization and irrigation on autumn VSP accumulation and dynamics of spring regrowth in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Journal of experimental botany* 366 :111-121.

<sup>483</sup> Summers, C.G., 1998. Integrated pest management in forage alfalfa. *Integrated pest management reviews* 3 :127-154.

<sup>484</sup> Chambre d'agriculture des Deux-Sèvres, INRA. 2008. La luzerne (fiche réalisée dans le cadre du Réseau d'élevage Poitou-Charentes).

Le stade bourgeonnement (45-50 jours) est généralement considéré comme optimal pour la récolte<sup>485</sup>. On considère en effet que les réserves sont alors entièrement reconstituées. Toutefois, la qualité requise en alimentation animale implique de choisir un compromis. Selon Mauriès<sup>486</sup>, une coupe à 35 jours permet d'obtenir une excellente teneur en matières azotées totales. Un rythme de coupe trop élevé compromet la pérennité de la culture car les réserves se reconstituent alors de manière insuffisante<sup>487</sup>. Il est conseillé de laisser la luzerne fleurir une fois par an (stade début floraison). La dernière coupe doit être faite un mois et demi avant les premières gelées, pour que la luzerne ait pu reconstituer ses réserves. Le broyage de la luzerne au cours de l'hiver est un moyen de faciliter le redémarrage et surtout de limiter le développement de certains parasites<sup>488</sup>.

Grâce à son système racinaire en pivot capable de descendre profondément, la luzerne a un effet positif sur la structure du sol. La conservation de l'état structural en surface n'est toutefois pas aussi importante que dans le cas des graminées car celles-ci disposent d'un système racinaire plus développé en surface. Par ailleurs, les nombreuses feuilles et racines des légumineuses qui se décomposent chaque année maintiennent le taux d'humus de la parcelle à un bon niveau. Ce dernier favorise la stabilité structurale du sol (et donc sa portance), ainsi que sa vie biologique<sup>489</sup>. Une fois retournée, la luzerne libère de l'azote utilisable par la culture suivante en raison de ses résidus riches en matières azotées<sup>490</sup>. Pendant la culture, le sol s'enrichit légèrement en azote du fait du fonctionnement des nodulations.

La luzerne est réputée pour étouffer les adventices. A l'issue de la culture, on s'attend donc à obtenir une diminution du stock de graines d'adventices dans le sol. Les nombreuses coupes permettent de plus de « nettoyer » la parcelle. La luzerne appartient à une famille botanique différente de celle des céréales. Le cortège parasitaire qui l'accompagne n'est donc pas le même. Introduire de la luzerne dans des successions de culture céréalières permet ainsi de rompre les cycles des maladies et des parasites.

### ***Evaluation des impacts environnementaux***

#### *Impacts sur les différents compartiments de l'environnement (eau, sol, air)*

La présence de luzerne dans les assolements réduit la durée pendant laquelle le sol reste nu, ce qui contribue à réduire les risques d'érosion. Par ailleurs, la luzerne contribue au maintien de la fertilité des sols puisqu'elle est à l'origine d'un enrichissement de leur teneur en matières azotées.

La culture de luzerne permet de lutter contre la pollution des eaux par les nitrates, de façon indirecte, puisqu'elle ne nécessite pas l'apport de fertilisants azotés, mais aussi directement, en raison de son rôle épurateur pour les nitrates. En Champagne crayeuse, Beaudoin et al.<sup>491</sup> ont montré que sous la luzerne, les fuites de nitrates semblent limitées par deux phénomènes : la réduction de la quantité

---

<sup>485</sup> Thiébaud P, Parnaudeau V, Guy P. 2003. Quel avenir pour la luzerne en France et en Europe ? Le Courrier de l'environnement 49. <http://www.inra.fr/dpenv/thiebc49.htm>

<sup>486</sup> Mauriès M. 1994. La luzerne aujourd'hui.

<sup>487</sup> Lemaire G, Allirand J. 1993. Relation entre croissance et qualité de la luzerne : interaction génotype - mode d'exploitation. *Fourrages* 134: 183-198.

<sup>488</sup> Chambre d'agriculture des Deux-Sèvres, INRA. 2008. La luzerne (fiche réalisée dans le cadre du Réseau d'élevage Poitou-Charentes).

<sup>489</sup> Le Gall A. 1993. Situation actuelle des grandes légumineuses : atouts et perspectives. *Fourrages* 134: 121-144.

<sup>490</sup> Justes E, Thiébaud P, Cattin G, Larbre D, Nicolardot B. 2001. Libération d'azote après retournement de luzerne : un effet sur deux campagnes. *Perspectives Agricoles* 264: 22-28.

<sup>491</sup> Beaudoin N, Denys D, Muller J, Monbrun M, Ledain C. 1992. Influence d'une culture de luzerne sur le lessivage du nitrate dans les sols de Champagne crayeuse. *Fourrages* 129: 45-57.

d'azote disponible dans le sol et la diminution des flux d'eau. La luzerne se révèle capable d'immobiliser de fortes quantités d'azote par l'intermédiaire de son système racinaire développé. Elle utilise en effet préférentiellement l'azote du sol avant d'utiliser l'azote fourni par la symbiose avec *Rhizobium meliloti*. Les mécanismes de ce comportement ne sont pas totalement élucidés mais seraient principalement liés au coût énergétique qu'induit le fonctionnement de la symbiose pour la plante<sup>492</sup>. De plus, en comparaison avec d'autres cultures fourragères, les fuites de nitrates semblent être équivalentes à celles observées sous graminées fauchées et inférieures à celles observées sous prairies pâturées ou maïs ensilage, même conduits avec une fertilisation raisonnée<sup>493</sup>.

Il existe en revanche un risque de pollution lors du retournement de la culture, puisqu'une importante quantité d'azote se retrouve alors disponible. Toutefois, cet azote est libéré de façon progressive sur deux ans<sup>494</sup> : les risques de perte d'azote sont faibles, surtout si la culture suivante est implantée rapidement après le retournement<sup>495</sup> et s'il s'agit d'un couvert à forte capacité d'absorption d'azote. Le faible nombre de traitements phytosanitaires limite les risques de pollution de l'eau, de l'air et du sol.

#### *Bilan énergétique et émissions de gaz à effet de serre*

L'économie d'azote minéral permise par la luzerne permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre ainsi que les dépenses énergétiques associées à la fabrication d'engrais azoté et à leur épandage. L'implantation pour plusieurs années et le faible nombre de traitements phytosanitaires contribuent également à réduire ces deux éléments. La luzerne nécessite en revanche plusieurs opérations de récolte. Par ailleurs, les émissions de N<sub>2</sub>O associées à cette culture restent peu documentées : une synthèse bibliographique réalisée sur les légumineuses (incluant des mesures réalisées sur la luzerne) indique que les émissions de N<sub>2</sub>O seraient liées à l'azote libéré par les exudats racinaires pendant la saison de culture et par la décomposition des résidus de culture après la récolte<sup>496</sup>.

#### *Paysage et biodiversité*

La luzerne est très connue pour son rôle en faveur de la biodiversité. Son couvert pluriannuel est un lieu de refuge, de source alimentaire et/ou de reproduction de plusieurs espèces animales (insectes, mulots, alouettes, perdrix, lièvres, chevreuil, etc.)<sup>497</sup>. Le faible nombre de traitements phytosanitaires est également un élément favorable à la biodiversité<sup>498</sup>. La luzerne est aussi réputée pour être une plante mellifère. En Poitou-Charentes, dans la plaine de Niort, la luzerne est le seul refuge où nidifie l'outarde canepetière. Des CAD (Contrats d'Agriculture Durable), créés en 2003 et devenus à présent des MAET (Mesures Agri-Environnementales Territorialisées) imposent dans cette zone une gestion particulière de la luzerne dans le but de préserver l'avifaune et en particulier l'outarde canepetière. Il est interdit de faucher du 15 mai au 31 juillet (ou au 31 août selon l'action), d'appliquer des traitements chimiques et

---

<sup>492</sup> Thiébaud P, Parnaudeau V, Guy P. 2003. Quel avenir pour la luzerne en France et en Europe ? Le Courrier de l'environnement 49. <http://www.inra.fr/dpenv/thiebc49.htm>

<sup>493</sup> Le Gall A. 1993. Situation actuelle des grandes légumineuses : atouts et perspectives. *Fourrages* 134: 121-144.

<sup>494</sup> Justes E, Thiébaud P, Cattin G, Larbre D, Nicolardot B. 2001. Libération d'azote après retournement de luzerne : un effet sur deux campagnes. *Perspectives Agricoles* 264: 22-28.

<sup>495</sup> Wiesemuller, W., Muller, K., Poppe, S. 1987. *Archives of Animal Nutrition* 37(10):942-943.

<sup>496</sup> Rochette, P., Janzen, H.H., 2005. Towards a revised coefficient for estimating N<sub>2</sub>O emissions from legumes. *Nutrient cycling in agroecosystems* 73 :171-179.

<sup>497</sup> Thiébaud P, Parnaudeau V, Guy P. 2003. Quel avenir pour la luzerne en France et en Europe ? Le Courrier de l'environnement 49. <http://www.inra.fr/dpenv/thiebc49.htm>

<sup>498</sup> Le Roux X, Barbault R, Baudry J, Burel F, Doussan I, Garnier E, Herzog F, Lavorel S, Lifran R, Roger-Estrade J, et al. 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. INRA.

d'irriguer<sup>499</sup>. Enfin, la luzerne contribue à rompre la monotonie des paysages dans les zones céréalières en particulier.

### Lacunes de connaissance

- La courbe de croissance de la luzerne a été bien étudiée et modélisée, mais pas sur l'ensemble du cycle : le comportement de la luzerne après la floraison, en particulier le comportement vis-à-vis de la verse, est très peu connu puisque la luzerne fourrage est récoltée avant ;
- L'évolution du stock de graines d'adventices pendant une culture de luzerne paraît peu connue ;
- L'évaluation environnementale de la production de luzerne demanderait à être complétée en particulier pour ce qui concerne les émissions de N<sub>2</sub>O.
- La conduite de la luzerne à vocation alimentaire est essentiellement guidée par les exigences de taux protéique et de digestibilité. Ces exigences déterminent en particulier le rythme de coupe. Utiliser la luzerne pour la production de biomasse pourrait donc permettre d'envisager une conduite différente.

### 5.1.8. le Triticale

#### ***Principaux éléments de fonctionnement du peuplement et conséquences en terme d'adaptation au milieu***

Le triticale peut être considéré comme « rustique » à plusieurs titres :

- Sa résistance au froid hivernal, intermédiaire entre celle du seigle et celle du blé rend possible son utilisation en zone de montagne<sup>500</sup>.
- La sélection variétale a permis d'éliminer les variétés trop sensibles aux attaques fongiques. On considère à présent que cette culture est indemne d'oïdium, peu sensible au piétin verse et au piétin échaudage, ce qui lui permet de succéder sans risque majeur à une autre céréale. Par contre, elle est sensible aux rouilles, principalement à la rouille brune, à la septoriose et à la fusariose de l'épi<sup>501</sup>. Des travaux de recherche sont en cours pour sélectionner des variétés de triticale résistante à cette dernière maladie<sup>502</sup>.
- Beaucoup de variétés de triticale sont tolérantes aux sols acides, à des fortes toxicités en aluminium, voire en manganèse, tout comme les seigles dont elles sont issues<sup>503</sup>.
- Le triticale est peu sensible à l'asphyxie racinaire : sa capacité à supporter des excès d'eau le rend apte à valoriser des zones humides.

Toutefois, son principal défaut est une forte sensibilité à la germination sur pied qui a pour effet de limiter sa culture dans les zones "arrosées" au moment de la récolte et avec des températures élevées durant le mois qui précède. Les travaux menés en génétique sur ce thème portent sur la cartographie moléculaire de QTL et la recherche de gènes candidats<sup>504</sup>.

Enfin, de hauteur intermédiaire par rapport aux céréales dont il est issu (autour de 1m20), le triticale

<sup>499</sup> Bernard F. 2007. Etude de la variabilité du rendement de la luzerne dans la plaine au sud de Niort. Mémoire de fin d'études ESA. 82 pages + annexes.

<sup>500</sup> AGRICE, 1998c. Triticale plante entière. ADEME-ITCF.

<sup>501</sup> AGER, 2003. Les céréales. AgroParisTech.

<sup>502</sup> Mascher, F., Michel, V., Browne, R.A., 2005. Sélection de variétés de blé et de triticale résistantes à la fusariose sur épi. *Revue suisse Agric.* 35, 189-194.

<sup>503</sup> Ammar, K., Mergoum, M., Sajaram, S., 2004. The history and evolution of triticale, In: Mergoum, M. Gomez-Macpherson, H. (Eds.), *Triticale improvement and production*, FAO, pp. 1-9. <http://www.fao.org/docrep/009/y5553e/y5553e00.html>

<sup>504</sup> Marion, D., Charmet, G., Dedryver, C.A., Jeuffroy, M.H., Loyce, C., Sourie, J.C., 2001. Filières céréales à paille. Recherches à l'INRA et positionnement international. INRA.

résiste mieux à la verse que le seigle mais demeure un peu sensible, bien que cette caractéristique soit en voie de correction avec les nouvelles variétés<sup>505</sup>.

### Importance et aire de production

Décrit à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, le triticales n'apparaît comme plante commerciale qu'à partir du milieu des années 70 et on observe une progression continue des surfaces depuis (Figure 17), avec une prédominance du triticales d'hiver, qui est principalement présent en Europe du Nord et en Amérique du Nord<sup>506</sup>.

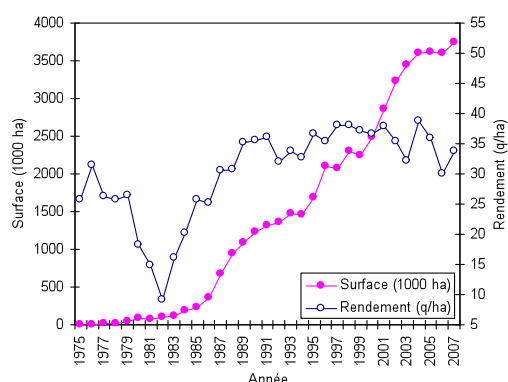


Figure 17 : Evolution des surfaces et des rendements grain en triticales de 1975 à 2007 dans le monde (source FAOSTAT)

La superficie mondiale de triticales s'élève à 3,7 millions d'ha en 2007, avec comme principal pays producteur la Pologne, qui présente comme la Russie des surfaces importantes de sols acides (Figure 18). Elle demeure toutefois une céréale très secondaire au regard du blé, qui est présent sur 217 millions d'ha en 2007.

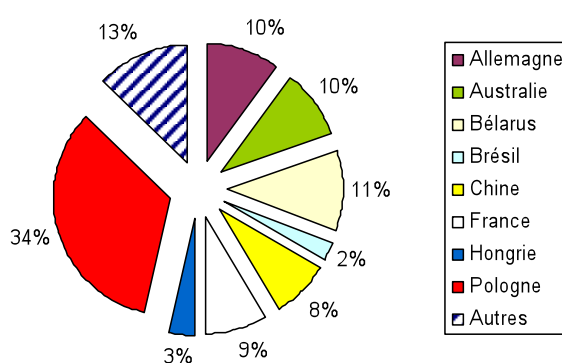


Figure 18 : Répartition des surfaces produites en triticales en 2007 (source FAOSTAT)

<sup>505</sup> AGER, 2003. Les céréales. AgroParisTech.

<sup>506</sup> Ammar, K., Mergoum, M., Sajaram, S., 2004. The history and evolution of triticales, In: Mergoum, M.Gomez-Macpherson, H. (Eds.), Triticales improvement and production, FAO, pp. 1-9. <http://www.fao.org/docrep/009/y5553e/y5553e00.html>

L'annexe 4 présente l'évolution des surfaces de triticales en France et les principales zones de production.

### **Utilisations et caractéristiques des matières récoltées (quantité, qualité)**

Les grains sont utilisés pour l'alimentation animale des porcins en particulier du fait de la richesse en lysine des grains<sup>507</sup>. La plante entière peut aussi être utilisée pour les ruminants, tandis que la forte production de pailles intéresse tout particulièrement les éleveurs comme ressource fourragère, en particulier dans les zones semi-arides<sup>508</sup>. Quoique très minoritaires, quelques utilisations des grains existent également en alimentation humaine, comme des pains locaux au Brésil, ou des chappatis au Nord de l'Inde<sup>509</sup>.

Les débouchés pour la production de biomasse peuvent concerner la paille mais les débouchés industriels demeurent très limités du fait du coût de collecte, de manutention et de stockage lié à la faible densité des balles. L'utilisation en plante entière s'est développée au Danemark en combustion et ce pays traite les tonnages de pailles les plus élevées pour ce débouché<sup>510</sup>. De son côté, l'Iowa State University expérimente le triticales en vue de produire de l'éthanol<sup>511</sup>.

En France, la production de biomasse en plante entière varie de 8 à 16 t/ha de MS récoltée à 10 cm du sol. Au Danemark, le triticales présente avec le seigle des rendements en plante entière supérieurs à ceux du blé : 14.1-15.9 t/ha contre 11.6-14.2 t/ha sur deux sites expérimentaux et trois années<sup>512</sup>. En France, les résultats acquis en région de grandes cultures dans le cadre du réseau expérimental REGIX permettent de positionner les rendements de cette culture par rapport à ceux d'autres cultures en vue d'une production de biomasse.

Notons que la présence du grain en plus de la paille améliore la valeur énergétique du produit récolté<sup>513</sup>. Les pouvoirs calorifiques mesurés sont de 15000 kJ/kg pour un taux d'humidité de 15% avec un taux de cendres de 2.8 (contre 4.2 pour la paille)<sup>514</sup> et de 16500 kJ/kg sur un site expérimental en France<sup>515</sup>.

Le triticales présente des caractéristiques intéressantes pour la combustion. Toutefois, il faut noter que les céréales sont caractérisées par des concentrations en cendres, en N, K et Cl plus élevées que le

---

<sup>507</sup> Myer, R., Lozano del Rio, A.J., 2004. Triticales as animal feed, In: Mergoum, M.Gomez-Macpherson, H. (Eds.), Triticales improvement and production, FAO, pp. 49-58.  
<http://www.fao.org/docrep/009/y5553e/y5553e00.html>

<sup>508</sup> Mergoum, M., Ryan, J., Shroyer, J.P., 1992. Triticales in Morocco : potential for adoption in the semi-arid cereal zone. *J. Nat. Res. Life Sci. Edu.* 21 :137-141.

<sup>509</sup> Pena, R.J., 2004. Food uses of triticales, In: Mergoum, M.Gomez-Macpherson, H. (Eds.), Triticales improvement and production, FAO, pp. 37-48. <http://www.fao.org/docrep/009/y5553e/y5553e00.html>

<sup>510</sup> AGRICE, 1998c. Triticales plante entière. ADEME-ITCF.

<sup>511</sup> Retka Schill, S., 2009. Triticales provides biomass, cover. Ethanol producer magazine.

<sup>512</sup> Jorgensen, J.R., Deleuran, L.C., Wollenweber, B., 2007. Prospects of whole grain crops of wheat, rye and triticales under different fertilizer regimes for energy production. *Biomass and bioenergy* 31 :308-317.

<sup>513</sup> AGRICE, 1998c. Triticales plante entière. ADEME-ITCF.

<sup>514</sup> Jorgensen, J.R., Flengmark, P., Olsen, C.C., 1996. Evaluation of annual cereal species and varieties as energy crops. 9th european bioenergy conference, Copenhagen.

<sup>515</sup> Bordes, J.P., Randon, A., Gatel, P., 1997. Etude d'une culture de triticales sur jachère non alimentaire en vue d'utiliser la plante entière comme biocombustible. Rapport ADEME.

bois<sup>516</sup>.

### **Mode de conduite, association de cultures et insertion dans les successions de culture**

Concernant le choix variétal, un enjeu pour développer le débouché en combustion serait d'aboutir à un indice de récolte réduit, de manière à augmenter la part de paille produite<sup>516</sup>.

En agriculture conventionnelle, le conseil en matière de raisonnement de la fumure azotée (méthode de bilans pour la dose totale et fractionnement des apports en sortie hiver et stade « épi 1 cm ») est équivalent à celui appliqué pour le blé tendre d'hiver. La gestion de la fertilisation peut par ailleurs influencer sur les qualités en éléments minéraux requises pour la combustion de la plante entière : il est ainsi préférable d'utiliser de l'engrais K contenant les éléments Cl et S<sup>516</sup>. Un traitement fongicide en végétation peut être nécessaire.

Des références ont été acquises en France concernant la faisabilité d'une récolte en plante entière. Elle est réalisée à maturité complète du grain<sup>517</sup>.

Des travaux ont été engagés pour valoriser les variétés de triticales par des conduites à niveaux d'intrants réduits dans un contexte d'Agriculture Biologique<sup>518</sup>.

Le triticales est cultivé en association avec du pois protéagineux (*Pisum sativum*) et de la vesce velue (*Vicia villosa*) en ensilage et pour la production de foin<sup>519</sup>. Le triticales est préféré aux autres céréales à paille fourragère (orge et avoine) pour constituer le mélange car il permet une plus forte proportion de légumineuses en instaurant une compétition moindre. Des associations de cultures sont possibles avec d'autres céréales (pour un meilleur contrôle des maladies et des risques de verse) et avec du ray-grass, notamment pour allonger la saison de pâturage<sup>520</sup>. En France, les associations à base de triticales et de pois fourragers sont fréquemment rencontrées en Agriculture Biologique et une fiche rassemblant les recommandations techniques pour cette association a été constituée<sup>521</sup>.

Le triticales est une culture réputée facile à inscrire dans une succession de cultures<sup>517</sup>, avec un rôle *a priori* étouffant vis-à-vis des adventices du fait de sa forte croissance végétative.

L'Iowa State University expérimente un semis en automne du triticales dans les résidus de soja, suivi

---

<sup>516</sup> Jorgensen, J.R., Deleuran, L.C., Wollenweber, B., 2007. Prospects of whole grain crops of wheat, rye and triticales under different fertilizer regimes for energy production. *Biomass and bioenergy* 31:308-317.

<sup>517</sup> AGRICE, 1998c. Triticales plante entière. ADEME-ITCF

<sup>518</sup> Rolland, B., 2003. Les géotypes de blé tendre et de triticales sélectionnés pour des conduites à intrants réduits sont-ils adaptés à l'agriculture biologique? Premiers résultats de deux années d'expérimentation INRA. [http://www.inra.fr/layout/set/print/la\\_sciences\\_et\\_vous/dossier\\_scientifiques](http://www.inra.fr/layout/set/print/la_sciences_et_vous/dossier_scientifiques).

<sup>519</sup> Carnide, V., Guedes-Pinto, H., Miguel-Rodriguez, M., Sequeira, C., Mascarenas-Ferreira, A., 1998. Forage yield and quality of triticales of triticales-vech mixtures. In: Juskiw, P., (Ed), International triticales symposium, 26-31 july. Alberta, Canada. p. 256.

<sup>520</sup> Lozano del Rio, A.J., Rodriguez-Herrera, S.A., Diaz-Solis, H., Fernandez-Brondo, J.M., Narvaez-Melo, J.M.F., Zamora-Villa, V.M., 2002. Forage production and nutritional value of mixtures of triticales (X Triticosecale Wittmack) and ryegrass (*Lolium multiflorum*) in Navidad, N.L. *Technica pecuaria en Mexico* 40, 17.

<sup>521</sup> Techn'ITAB, 2003. Les associations à base de triticales/pois fourragers en agriculture biologique. 4 pages.

d'une récolte en vert du triticale début Juin, date où il a atteint le maximum de croissance végétative<sup>522</sup>. Le triticale jouerait ainsi le rôle d'une plante de couverture visant à réduire l'érosion hivernale et le lessivage des nitrates.

D'autres travaux font état d'une récolte en vert de céréales d'hiver en juin puis semis d'une autre culture (maïs, sorgho sucré, chanvre, tournesol), système qualifié de double-cropping system. Cette technique a fait l'objet d'une ACV à l'échelle de la production et du process de combustion, qui incorpore (i) un mélange des deux cultures récoltées en vert d'ensilage déshydraté (40 % d'humidité) ou (ii) du triticale récolté en sec (15 % d'humidité). Il en résulte des émissions de SO<sub>2</sub> et de NOX moindres avec le mélange de culture, mais avec des coûts de génération de chaleur et d'électricité moindres avec le triticale en sec<sup>523</sup>.

### **Evaluation des impacts environnementaux**

Une analyse de cycle de vie de l'utilisation de pailles de céréales pour la production de bio-éthanol a montré l'intérêt de ce débouché vis-à-vis des émissions de gaz à effet de serre et d'utilisation d'énergie non renouvelable, avec des effets légèrement défavorables en matière d'eutrophisation et d'impact en matière d'acidification atmosphérique<sup>524</sup>. Une étude menée par l'ADAS en Grande Bretagne a estimé une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 10 à 20% selon le mode de conduite en utilisant du triticale au lieu du blé pour produire de l'éthanol. Cette réduction est principalement liée aux doses d'engrais azotée plus limitée pour le triticale<sup>525</sup>. Deux ACV pour cette culture (une menée par l'INRA en 2009 et l'autre par l'IFEU en 2000) ont été recensées par l'ADEME<sup>526</sup>.

### **Lacunes de connaissance**

Il apparaît que le triticale est principalement cultivé en France en zone humide, dans les principales zones d'élevage. Or, peu de références sont disponibles sur les performances relatives (au regard d'autres cultures) de cette culture dans ces milieux.

Si les associations triticale - légumineuses (pois fourrager, pois protéagineux, féverole ou vesce) sont pratiquées en Agriculture Biologique en France, elles ont quasiment disparu en agriculture conventionnelle et on constate un manque de référence en agriculture conventionnelle sur le comportement de ces associations (ex : effet sur la structure du sol) et leur intérêt pour réduire l'utilisation des intrants (engrais azoté minéral, produits herbicides et fongicides).

Le rôle « étouffant » du triticale vis-à-vis des adventices est mentionné et pourrait faire l'objet d'une analyse plus détaillée sur la contribution du triticale à la réduction de l'utilisation de produits herbicides à l'échelle de la succession de cultures.

<sup>522</sup> Retka Schill, S., 2009. Triticale provides biomass, cover. Ethanol producer magazine.

<sup>523</sup> Heinz, A., Kaltschmidt, M., Stupnagel, R., Scheffer, K., 2001. Comparison of moist vs. air-dry biomass provision chains for energy generation from annual crops. *Biomass and bioenergy* 20 :197-215.

<sup>524</sup> Gabrielle, B., Gagnaire, N., 2008. Life-cycle assessment of straw use in bio-ethanol production: a case study based on biophysical modelling. *Biomass and bioenergy* 32 :431-441.

<sup>525</sup> David-Knight, H.R, Weightman, R.M, 2008. The potential of triticale as a low input cereal for bioethanol production. *HGCA Project report*, n° 434, 41 p.

<sup>526</sup> ADEME, 2009. Evaluation de la bibliographie relative aux analyses de cycle de vie (ACV) appliquées aux productions ligno-cellulosiques. *ADEME, Bio intelligence service*, 41 p.



Enfin, au-delà des travaux mentionnés plus haut, peu de connaissances sont disponibles quant à l'évaluation environnementale et énergétique de la production de triticales.

## 5.1.9. Le Sorgho

### 5.1.9.1. Etat de l'art

#### ***Principaux éléments de fonctionnement du peuplement et conséquences en terme d'adaptation au milieu***

La germination du sorgho se fait en sol humide et avec des températures moyennes journalières supérieures à 12°C. L'optimum de température pour la croissance est d'environ 30°C<sup>527</sup> et les exigences thermiques sont élevées (temps thermique ou somme de température à 1400°C entre le semis et la floraison pour les variétés précoces et 1900°C pour les variétés tardives).

Le sorgho possède un système racinaire puissant capable de descendre jusqu'à deux mètres de profondeur. Cette caractéristique explique sa résistance à la sécheresse, surtout en début de culture : pour des variétés proches en terme de croissance, on estime aux Etats-Unis que le maïs exige un supplément d'eau de 20 % par rapport au sorgho pour produire un kilo de matière sèche. La consommation totale d'une culture pluviale de sorgho a été évaluée à 400 mm pour une variété de 90 jours et à 550 à 600 mm pour une variété de 110-120 jours<sup>527</sup>. L'efficacité de l'eau en conditions non limitantes est de 37 kg M.S/mm<sup>528</sup>.

#### ***Importance et aire de production***

Le sorgho est présent dans les régions sub-tropicales et tempérées, et à des altitudes allant jusqu'à 2300 m en zone tropicale<sup>529</sup>. Il représente en 2006 la cinquième céréale mondiale, après le maïs, le riz, le blé et l'orge<sup>527</sup>. L'aire de production du sorgho est présentée en annexe 4.

#### ***Utilisations et caractéristiques des matières récoltées (quantité, qualité)***

En zone tempérée, le sorgho est d'abord cultivé pour l'alimentation animale et selon les modes d'exploitation, on distingue les sorghos fourragers, ensilage et grain. Dans les régions tropicales, le sorgho est essentiellement cultivé pour son grain et pour l'alimentation humaine (grain entier ou décortiqué en bouillie, fermentation du grain pour des boissons alcoolisées)<sup>527</sup>.

A cela s'ajoutent d'autres utilisations à caractère industriel ou artisanal<sup>527</sup> :

- Sorgho fibre (ou papetiers, ou biomasse), dont la tige riche en fibres est utilisée pour la fabrication de papier d'emballage ou de matériaux de construction. La plante entière peut être utilisée pour de la méthanisation (hauteur : 4 à 5 m), avec un pouvoir méthanogène intéressant (190 m<sup>3</sup> de biogaz par tonne de produit brut ; source : KWS).
- Sorgho à grains riches en amidon utilisés pour préparer des colles, des adhésifs ou du dextrose.
- Sorgho sucré : biocarburant (7000 l d'éthanol par ha), sirop ou sucre cristallisable selon la composition en oses du jus de la melle, pâte à papier pour le coproduit (bagasse) (hauteur : 3 à 4 m)
- Sorgho à balai dont la hampe fructifère (sans les grains) sert à faire des balais durs.

<sup>527</sup> CIRAD-GRET-MEI, 2006. Le sorgho. Memento de l'agronome, CIRAD-GRET-MEI, pp. 811-823.

<sup>528</sup> AGRICE, 1998b. Sorghos. ADEME-ITCF.

<sup>529</sup> FAO, 2009. Sorghum bicolor (L.) Moench <http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/>

- Sorgho tinctoriaux dont les tiges et les feuilles donnent après broyage et macération une teinture rouge utilisée en tannerie ou en poterie.

Le tableau suivant fournit quelques caractéristiques qualitatives du sorgho<sup>530</sup>.

Tableau 49 : Composition des différentes parties de la plante à floraison (% de MS)

Partie de la plante	Répartition de la MS	Cellulose brute	Silice	Cendres
Tige	70 à 75	40 à 45	1	
Feuille	20 à	30	2 à 3	
Panicule	25	33 à 38	1.2 à 1.5	
Plante entière	100	40	1	5

Des projets de développement sont à l'œuvre : ainsi, le groupe Stokvis Nord Afrique et la FADIA, lancent au Maroc la création d'une usine modulaire pour fabriquer différents types de papiers et produire de l'électricité à partir de méthane pour des usages locaux, avec l'appui technologique de la société EnergGreen, créée en 2007 et spécialisée dans le développement de la biomasse et du biogaz<sup>531</sup>. Cette usine serait approvisionnée en sorgho biomasse H 133 (variété hybride pouvant produire 25-30 t /ha de entre 14 000 et 16 000 m<sup>2</sup>/ha de biogaz). Aujourd'hui les installations de biométhanisation en France sont au nombre de 6. L'objectif d'EnergGreen est de développer des projets (à l'instar de l'Allemagne qui dispose d'ores et déjà de 4 000 installations). Il s'agit de mettre en place des installations (digesteurs) chez les agriculteurs qui brûlent les déchets organiques et le sorgho par un système de co-génération pour faire de l'électricité, de la chaleur, de l'énergie mécanique, etc.<sup>532,533</sup>

L'ICRISAT mène un projet depuis 2006 avec une distillerie locale et des agriculteurs pour développer sur 1 600 ha une variété de sorgho améliorée sur les terres semi-arides de l'Andhra Pradesh (Inde)<sup>534</sup>. Le grain n'est pas impliqué dans la production d'éthanol : il est utilisé pour l'alimentation humaine tandis que les co-produits de la transformation en éthanol servent à l'alimentation animale<sup>535</sup>. Des projets similaires avec l'ICRISAT et des partenaires privés sont en cours aux Philippines, au Mexique, au Mozambique, au Kenya, en Ouganda, au Nigeria et en Afrique du Sud.

En matière de quantité produite, des essais menés en Iowa dans différents milieux montrent que les sorghos cultivés (sucré et fourrager) obtiennent les rendements compris entre 15 et 19 t de MS/ha, soit les plus élevés au regard de la luzerne, du panic érigé (switchgrass), du phalaris (reed canary grass), du big blustern et du maïs<sup>536</sup>. Des résultats similaires ont été obtenus par le sorgho (en comparaison avec le chanvre, le kénaf, et le maïs) dans des expérimentations menées en Italie du Nord, avec des rendements moyens du sorgho fibre H132 de 26.2 t de MS/ha<sup>537</sup>. En France, de même que pour le

<sup>530</sup> AGRICE, 1998b. Sorghos. ADEME-ITCF.

<sup>531</sup> Matin, L., 2009. Protocole d'accord entre le groupe Fadia et le groupe Stokvis. Le Matin. <http://www.lematin.ma/Actualité/Journal>.

<sup>532</sup> Vaquier, J., 2007. Produire de la chaleur ou de l'électricité avec la biométhanisation du sorgho. Le trait d'union paysan 28 septembre, 5.

<sup>533</sup> Aubert, J.E., Husson, B., Vaquier, A. 2004. *Cement and Concrete Research* 34(6):957-963.

<sup>534</sup> Enerzine, 2009. Ethanol: les avantages du sorgho. <http://www.enerzine.com/6/2903>.

<sup>535</sup> Agribusinessweek, 2009. Sweet sorghum: a new smart biofuel crop. <http://www.agribusinessweek.com/>.

<sup>536</sup> Hallam, A., Anderson, I., Buxton, D., 2001. Comparative economic analysis of perennial, annual, and intercrops for biomass production. *Biomass and bioenergy* 21 :407-424.

<sup>537</sup> Amaducci, S., Amaducci, M.T., Benati, R., Venturi, G., 2000. Crop yield and quality parameters of four annual fibre crops (hemp, kenaf, maize and sorghum) in the North of Italy. *Industrial crops and products* 11 :179-186.

triticale, les résultats acquis en région de grandes cultures dans le cadre du réseau expérimental multilocal REGIX permettent de positionner les rendements de cette culture par rapport à ceux d'autres cultures en vue d'une production de biomasse.

Plus spécifiquement, un projet financé par la Commission Européenne et dénommé Sweetfuel (« Sweet sorghum: an alternative energy crop ») a démarré en janvier 2009 pour une durée de cinq ans (<http://cordis.europa.eu>). Son objectif est de développer la production de bioéthanol à partir du sorgho sucré en fournissant de nouvelles variétés mieux adaptées à des environnements ciblés en zone tempérée comme en zone tropicale. Le CIRAD en assure la coordination (Annexe 7).

### **Mode de conduite, association de cultures et insertion dans les successions de culture**

De manière schématique, on peut distinguer deux modes de conduite du sorgho : une conduite basée sur l'utilisation de variétés hybrides pour des conditions de culture intensive et une conduite basée sur des variétés traditionnelles cultivées de façon extensive. Toutefois, des efforts de recherche sont entrepris pour sélectionner des variétés résistantes aux bioagresseurs : c'est par exemple le cas du sorgho ICSV 11 IN tolérant au Striga (plante parasite), mis au point par l'ICRISAT et développé au Ghana<sup>538</sup>. De même, des hybrides résistants à la sécheresse sont recherchés en zone méditerranéenne<sup>539</sup>. Enfin, des conduites à bas niveaux d'intrants (en matière de fertilisation N et P et de préparation du sol) ont été expérimentées en Italie<sup>540</sup>.

En zone tropicale, le sorgho peut être semé sans préparation du sol mais il profite d'un travail du sol préalable<sup>541</sup>. Un travail du sol permettant d'aboutir à un profil avec des mottes en surface, de la terre fine et un horizon profond rattaché par la reprise de labour, mais suffisamment fissuré pour permettre la colonisation racinaire est recherché<sup>542</sup>.

Le semis est une opération délicate car l'énergie germinative des graines est médiocre. Le semis traditionnel en zone tropicale se fait manuellement en poquets de 5 à 6 graines. En France, le semis intervient au mois de mai, dès que la température du sol dépasse 12°C, avec une densité de peuplement comprise en 150 000 à 180 000 plantes/ha<sup>542</sup>. Des essais menés en Italie montrent que la densité de semis (passage de 10 à 20 plantes/m<sup>2</sup>) a un effet sur la production seulement en situation humide<sup>543</sup>. En France, il est préconisé de réduire la densité de semis du sorgho en situation non irriguée pour limiter les risques de stress hydrique<sup>544</sup>.

On dénombre de nombreux bioagresseurs en Afrique (foreurs des tiges, punaises des panicules, charbons, moisissures de grain, striga sp., plante parasite). Les méthodes de lutte contre les insectes et

---

<sup>538</sup> CGIAR, 2009. Research and impact areas of research. Sorghum.

<http://www.cgiar.com/impact/research/sorghum.html>

<sup>539</sup> Habyarimana, E., Bonardi, P., Laureti, D., Di Bari, V., Cosentino, S., Lorenzoni, C., 2004a. Multilocal evaluation of biomass sorghum hybrids under two stand densities and variable water supply in Italy. *Industrial crops and products* 20 :3-9.

<sup>540</sup> Amaducci, S., Monti, A., Venturi, G., 2004. Non-structural carbohydrates and fibre components in sweet and fibre sorghum as affected by low and normal input techniques. *Industrial crops and products* 20 :111-118.

<sup>541</sup> CIRAD-GRET-MEI, 2006. Le sorgho. Memento de l'agronome, CIRAD-GRET-MEI, pp. 811-823.

<sup>542</sup> AGRICE, 1998b. Sorghos. ADEME-ITCF.

<sup>543</sup> Habyarimana, E., Laureti, D., De Ninno, M., Lorenzoni, C., 2004b. Performances of biomass sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] under different water regimes in Mediterranean region. *Industrial crops and products* 20 :23-28.

<sup>544</sup> Arvalis, C., 2005. Sorgho - bilan de campagne 2005. <http://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/fr/>.

les maladies fongiques font généralement appel à des techniques culturales (élimination de résidus de récolte, rotations, semis groupés) et à des variétés résistantes et photopériodiques pour grouper les floraisons et caler les cycles des variétés sur la fin de l'hivernage et limiter ainsi les attaques de moisissures de grains<sup>545</sup>. Seuls taupins et adventices en début de cycle sont recensés comme étant problématiques en France : une fois installé, le sorgho fibre est peu vulnérable aux attaques en cours de végétation<sup>546</sup>.

Le sorgho est très sensible à la concurrence des adventices notamment au cours des premières semaines qui suivent le semis<sup>546</sup>. Toutefois, le sorgho biomasse présenterait moins de problème de désherbage que le sorgho grain, selon Semences de Provence<sup>547</sup>.

En zone tropicale, est préconisé l'arrachage du striga avant floraison (car cette plante produit de nombreuses et très petites graines), l'utilisation de variétés résistantes ou tolérantes, les rotations et les associations culturales, voire des traitements herbicides<sup>545</sup>.

L'azote apporté par la fertilisation est valorisé par le sorgho si les quantités en phosphore disponible pour la plante sont suffisantes. En France, les besoins en azote sont estimés à 60-80 kg/ha, à apporter avant le semis, avec 60 kg/ha de K<sub>2</sub>O et 60 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

La récolte du sorgho fibre peut être réalisée dès l'épiaison du sorgho, jusqu'au début du remplissage des grains, pour une conservation en paille (énergie, pâte à papier, biomatériaux) ou un ensilage (pâte à papier). Pour le sorgho sucré, les récolteuses à canne à sucre sont les mieux adaptées pour récolter une matière première (canne) ayant subi un minimum de transformations chimiques, comme l'oxydation ou la fermentation<sup>546</sup>.

En Afrique, le sorgho est cultivé seul ou en association avec d'autres plantes comme le niébé<sup>545</sup>. Des travaux de recherche ont montré l'intérêt de cultiver du sorgho en association avec de la luzerne et du phalaris (reed canary grass) pour augmenter le rendement<sup>548,549</sup>. Des effets bénéfiques de ces associations sur les coûts de production ont également été mis en évidence<sup>549</sup>, avec des résultats un peu moins concluants pour l'association sorgho-phalaris du fait de problèmes de clorose sur le sorgho qui ont pénalisé le rendement.

En zone tropicale, le sorgho fait partie des systèmes de culture pluviale. Des modes de production traditionnels originaux ont été également identifiés en Afrique : la culture de décrue et la culture repiquée à base de variétés spécialisées. Trois sorghos sucrés par an sont possibles en zone tropicale semi-aride. Il est également envisageable de cultiver le sorgho H 133 en interculture : le rendement obtenu est alors de 10-15 t MS /ha contre 15 à 25 t MS /ha pour le même sorgho en culture. La Chambre d'Agriculture de la Drôme réalise actuellement le suivi d'un essai de sorgho biomasse en culture intermédiaire entre blé et maïs<sup>550</sup>.

---

<sup>545</sup> CIRAD-GRET-MEI, 2006. Le sorgho. Memento de l'agronome, CIRAD-GRET-MEI, pp. 811-823.

<sup>546</sup> AGRICE, 1998b. Sorghos. ADEME-ITCF.

<sup>547</sup> Vaquier, J., 2007. Produire de la chaleur ou de l'électricité avec la biométhanisation du sorgho. Le trait d'union paysan 28 septembre, 5.

<sup>548</sup> Buxton, D., Anderson, I., Hallam, A., 1998. Intercropping sorghum into alfalfa and reed canary grass to increase forage yield. *Journal of Production Agriculture* 11 :481-486.

<sup>549</sup> Hallam, A., Anderson, I., Buxton, D., 2001. Comparative economic analysis of perennial, annual, and intercrops for biomass production. *Biomass and bioenergy* 21 :407-424.

<sup>550</sup> Rhônalpénergie-Environnement, 2008. La méthanisation en Rhône-Alpes. Lettre d'information 2, 1-6.

Le sorgho est connu pour avoir un effet dépressif (dit allélopathique) sur la culture suivante (comme l'arachide au Sénégal) *via* la production de toxines secrétées par les racines, surtout lorsque l'activité biologique des sols est faible. Ces toxines ont une durée de vie limitée et peuvent être évitées par un semis retardé<sup>551</sup>.

Des systèmes de culture plus économes en eau et incluant notamment du sorgho ont fait l'objet d'une expérimentation longue durée sur le site INRA d'Auzeville (31)<sup>552</sup>. Une étude spécifique menée sur le sorgho a permis à cette occasion de montrer que les variétés précoces de sorgho étaient les mieux adaptés à des situations non irriguées<sup>553,552</sup>.

### **Evaluation des impacts environnementaux**

Les faibles besoins en azote du sorgho et sa forte capacité à extraire les éléments minéraux font que le sorgho épuise le profil en azote, limitant ainsi le lessivage de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en automne. Par ailleurs, la forte capacité à extraire l'eau du sol permet le plus souvent de cultiver le sorgho sans irrigation<sup>554</sup>. Une ACV (l'une menée par l'INRA en 2009) pour cette culture a été recensée par l'ADEME<sup>555</sup>.

### **Lacunes de connaissance**

Quelques pistes devraient être poursuivies en priorité :

- Evaluer l'intérêt du sorgho vis-à-vis de la ressource en eau (quantité et qualité) dans une perspective de changement climatique, compte tenu de son aptitude à tolérer des stress hydriques ;
- Compléter l'évaluation environnementale globale du sorgho, pour dépasser l'intérêt du sorgho vis-à-vis de son aptitude à valoriser l'eau : prendre en compte en particulier la consommation en P induite par la production de sorgho, les émissions de N<sub>2</sub>O et les bénéfices environnementaux associés à son utilisation en culture intermédiaire ;
- Etudier les relations de facilitation/compétition d'association de cultures avec du sorgho et de la luzerne, qui semble une piste d'association prometteuse d'après la littérature évoquée plus haut.

### **5.1.10. Exemple de culture énergétique annuelle : le colza**

#### **5.1.10.1. Etat de l'art**

Le colza occupait en 2007 de l'ordre de 6,6 millions d'hectares en Europe, dont plus de 1,5 millions en France.

<sup>551</sup> CIRAD-GRET-MEI, 2006. Le sorgho. Memento de l'agronome, CIRAD-GRET-MEI, pp. 811-823.

<sup>552</sup> Debaeke, P., Munier-Jolain, N., Bertrand, M., Guichard, L., Nolot, J.M., Faloya, V., Saulas, P., 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29 :73-86.

<sup>553</sup> Debaeke, P., Nolot, J.M., Raffaillac, D., 2006. A rule-based method for the development of crop management systems applied to grain-sorghum in south-western France. *Agric. Syst.* 90 :180-201.

<sup>554</sup> AGRICE, 1998b. Sorghos. ADEME-ITCF.

<sup>555</sup> ADEME, 2009. Evaluation de la bibliographie relative aux analyses de cycle de vie (ACV) appliquées aux productions ligno-cellulosiques. ADEME, Bio intelligence service, 41 p.

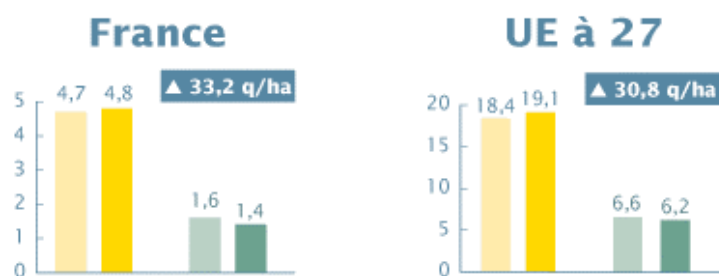


Figure 17 : Production de colza en France et en Europe (source ONIDOL)

Actuellement, la production s'oriente vers un développement des usages non alimentaires de l'huile de colza : production de biocarburant, de lubrifiant biodégradable pour les engins mécaniques, de fluidifiant pour le pétrole dans les oléoducs,... Le développement de ces filières dépendra de leur compétitivité. Une étude menée par ADEME/ALCIMED et publiée en 2007, estimait les surfaces de colza biocarburant à 1 800 000 ha en 2010 en France.

Le secteur des biolubrifiants pourrait mobiliser de l'ordre de 47 à 60 000ha d'oléagineux (colza et tournesol) à l'horizon 2030, celui des biotensioactifs de l'ordre de 200 000. Les encres offset végétales pourraient mobiliser 11 000 ha de colza, les biosolvants (nettoyage) de l'ordre de 13 500ha et les adjuvants phytosanitaires de l'ordre de 2 000.

### **Caractérisation des systèmes possibles (cibles, type de systèmes, filière, etc)**

Les huiles de colza ont à ce jour été utilisées en biocarburants de substitution au gazole, après transformation en esters méthyliques par réaction avec le méthanol, et commercialisés en France sous la marque Diester. Ils sont utilisés aujourd'hui en mélange avec le gazole, ce mélange étant réalisé avant distribution par les pétroliers. Des mélanges à différents taux ont fait l'objet de tests par les motoristes avant d'être homologués. Des esters éthyliques, par réaction avec de l'éthanol (d'origine végétale également) sont à l'étude.

Des utilisations d'huiles végétales pures pressées « à la ferme » ont été tentées pour les tracteurs agricoles, mais ont conduit à des déboires sur les moteurs modernes (encrassage, usure). La valorisation des tourteaux gras issus de ces pratiques a par ailleurs posé des problèmes plus au niveau du stockage et de la conservation, qu'au strict niveau de la pratique de l'alimentation animale, où ces tourteaux énergétiques peuvent être valorisés.

Les résidus de culture (pailles de colza) n'ont été utilisés à ce jour que de façon exceptionnelle, mais pourraient constituer une source de biomasse.

Toutefois, le colza produisant des molécules nobles, acides gras et protéines, l'avenir est probablement à la valorisation de ces molécules en tant que telles, dans des utilisations de chimie verte. La possibilité de modifier la composition de l'huile par sélection classique ou par modifications génétiques, ouvre de vastes perspectives dans ce domaine.

La mise en place de filières de production d'un type de colza particulier présentant des caractéristiques spécifiques (de profils d'acides gras ou autres) peut rendre nécessaire des précautions visant à empêcher des contaminations au champ entre cultures de vocations différentes, généralement pour des aspects de qualité ou réglementaires (teneurs maximales des récoltes alimentaires en acide érucique par ex, ou seuil de teneur réglementaire en graines OGM). Ces aspects de contaminations par

pollinisations croisées et la gestion spatiale des cultures qui deviennent nécessaires ont été abondamment étudiés dans le cas des OGM et de l'acide érucique (projets SIGMEA, Co-Extra, etc...)

### **Conduite technique/ adaptation au milieu /reconversion / système de production**

La conduite technique du colza est bien connue et maîtrisée (voir guides techniques CETIOM et [www.cetiom.fr](http://www.cetiom.fr)), mais reste tributaire de la disponibilité des fertilisants azotés et des produits phytosanitaires de synthèse, tout particulièrement les insecticides.

Le colza est une plante cultivable dans des milieux variés, du sud du bassin méditerranéen au Nord de l'Europe et au Canada. Selon les latitudes, les types variétaux utilisés diffèrent : colza de printemps au Canada et dans le Nord de l'Europe, colza d'hiver aux latitudes moyennes, colza de type printemps cultivé en hiver au sud du bassin méditerranéen, pour des raisons de sensibilité à la photopériode.

Le colza est présent sur la plupart des types de sols français, mais il apprécie peu les conditions asphyxiantes des sols sensibles à l'hydromorphie en hiver.

Le colza est considéré comme un candidat de choix en phytoremédiation, ou dépollution des sols par l'utilisation de plantes cultivées, du fait de ses capacités d'absorption de certains éléments minéraux et éléments traces métalliques. Ce thème fait actuellement l'objet du projet européen COLQUAL, coordonné par la faculté de Gembloux sur les pollutions au Cadmium. A l'inverse, sa capacité d'absorption peut devenir un objet de suivi en cas de craintes de contaminations de la filière alimentaire par des absorptions du fait de cultures sur des sols pollués. Ce sujet fait actuellement l'objet d'un projet CASDAR coordonné par le CETIOM et appliqué à la filière alimentaire du jambon de Bayonne.

Le colza rentre parfaitement dans les systèmes de production français céréaliers traditionnels, où il est considéré comme un bon précédent à blé. Il présenterait également des avantages intéressants dans les systèmes de polyculture élevage, notamment en matière de gestion de l'azote<sup>556</sup>.

Son succès est plus mitigé jusqu'à ce jour en système d'agriculture biologique, principalement du fait de sa sensibilité aux ravageurs (limaces, insectes) et secondairement de ses besoins en azote relativement élevés. Il semble toutefois que d'autres pays européens soient plus avancés dans la pratique du colza en système biologique (Finlande notamment). En France l'insertion du colza dans les systèmes bio a fait l'objet de travaux spécifiques<sup>557</sup>.

### **Ressources (azote, eau, énergie, etc)**

#### *Azote*

Les besoins de la culture sont relativement élevés, de l'ordre de 6,5 kgN/q de graines. La mise au point de fertilisation azotée du colza a motivé de nombreux travaux qui ont débouché sur des outils d'aide à la décision en matière de fertilisation (réglette azote CETIOM, Farmstar colza, paramétrage du colza dans le modèle AZOFERT), qui ont permis de faire baisser les doses d'azote de 15 à 20 % entre le début des années 1990 et la situation actuelle, passant de l'ordre de 200 kg/ha en moyenne à environ

<sup>556</sup> Leterme P., Menasseri S. Azote, colza et exploitations laitières. OCL 13(6) : 419-425

<sup>557</sup> Valantin-Morison M, Meynard J-M, Grandeau G, Bonnemort C, Chollet (2003). Yield variability of Organic Winter Oil Seed Rape (WOSR) in France: a diagnosis on a network of farmers fields. 11th International rapeseed congress, Copenhagen (Denmark), 2003/07/6-10, Towards Enhanced value of cruciferous oilseed crops by optimal production and use of the high quality seed components. Proceedings GCIRC

170 en 2005<sup>558</sup>.

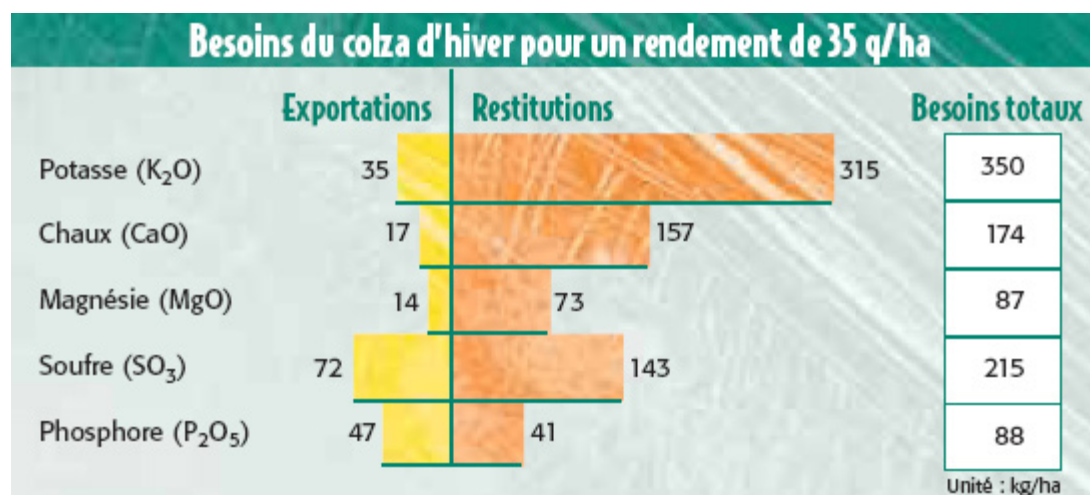
La gestion de l'azote reste toutefois un levier essentiel pour l'amélioration du bilan énergétique des biocarburants à base de colza et pour la baisse des impacts environnementaux dus aux fuites d'azote du système cultivé. L'efficacité de l'azote reste donc un sujet de travail primordial. Si des progrès peuvent encore être faits au niveau de la pratique de la fertilisation et de la conduite de culture, les voies les plus prometteuses semblent résider désormais du côté de la génétique et de la gestion de l'azote dans le système de culture<sup>559,560</sup>.

La compréhension de l'absorption et de l'assimilation de l'azote fait également l'objet de travaux en cours<sup>561</sup>.

#### Eléments minéraux majeurs

La fumure de fond doit être régulière et couvrir les exportations.

Tableau 50 : Besoins d'un colza en minéraux (source CETIOM)



Par ailleurs, le colza est sensible à la carence en soufre, qui peut entraîner notamment des avortements des fleurs : le soufre fait donc généralement l'objet d'un apport de l'ordre de 70 u SO<sub>3</sub>/ha, associé au second apport d'azote, au printemps, lors de la phase de croissance intense qui précède la floraison.

#### Eau

Cultivé en hiver, le colza ne nécessite pas d'irrigation dans les conditions françaises.

#### Energie

<sup>558</sup> Lagarde F., Champolivier L. 2005, Le raisonnement et les avancées techniques permettent de réduire la fertilisation azotée : le cas de Farmstar colza. *OCL* 13(6) :384-387.

<sup>559</sup> Pilorgé E, Evrard J, Flenet F, Pinochet X, Reau R. 2006, Colza et apports azotés : enjeux d'une compétitivité durable et voies de recherche. *OCL* 13(6) :387-393.

<sup>560</sup> Reau R., Bouthier A., Champolivier L. 2006. La lixiviation de l'azote dans les rotations céréalières avec colza : in diagnostic à partir de résultats d'expérimentations pluriannuelles et de modélisations. *OCL* 13(6):403-412.

<sup>561</sup> Morot-Gaudry J-F, Orsel M., Diaz C., Daniel-Vedel F., Mascalux-Daubresse C. 2006. Absorption et assimilation du nitrate et recyclage de l'azote organique chez les plantes : intérêt pour le colza. *OCL* 13(6) :393-402.



Les besoins directs sont principalement liés au machinisme, les besoins indirects aux engrais azotés de synthèse.

### **Modèles de croissance**

Le colza fait l'objet de plusieurs séries de travaux de modélisation. Par exemple, STICS a été paramétré pour le colza. Par ailleurs, le modèle Azodyn, qui vise à simuler la réponse à l'azote du colza en termes de rendement, de teneurs en huile et en protéines, pour comparer des stratégies de conduites de fertilisation azotée comporte un module de croissance. Les performances de ces modèles restent insuffisantes aujourd'hui, y compris au niveau de la prévision du rendement. La prévision de la teneur en huile est peu avancée et obtenue par défaut de la teneur en protéines des graines.

### **Bio-agresseurs**

#### *Flore adventices*

La gamme herbicide disponible pour le colza présente des trous vis-à-vis d'un certain nombre d'espèces adventices, notamment de la famille des brassicacées et des géraniacées. L'arrivée sur le marché de colzas tolérants, obtenus par mutagenèse, à certaines molécules de la famille des imidazolinones devrait améliorer cette situation au moins de façon transitoire. En effet, les spectres de ces herbicides ne sont pas totaux d'une part, et d'autre part, il s'agit d'une famille de molécules déjà utilisée sur d'autres cultures, et pour laquelle l'émergence de résistances dans la flore adventice est déjà avérée.

Compte tenu de cette situation, les efforts s'attachent donc depuis plusieurs années à organiser une lutte intégrée dans les rotations de grandes cultures. En France, les principaux travaux sur le sujet sont menés par l'INRA de Dijon dans le cadre du modèle FLORSYS<sup>562</sup> qui étendent à la flore adventice dans son ensemble les acquis du modèle ALOMYCIS (travaux sur le vulpin<sup>563</sup>).

#### *Plantes parasites*

Le colza est sensible à l'orobanche rameuse (*Phelipae ramosa*), plante parasite affectant une large gamme d'espèces adventices (qui constituent donc des agents de multiplication du parasite) et cultivées (tabac, chanvre, etc,...), très souple en matière de conditions de milieu. Ce parasite qui constitue une réelle menace pour la culture est en extension et fait l'objet de travaux en cours (suivi de l'extension, biologie, génétique (hôte et parasite). Il n'a pas été trouvé à l'heure actuelle de résistance chez le colza, ni même de tolérance utilisable.

#### *Maladies*

Les maladies du colza sont actuellement globalement maîtrisées, mais restent un champ de recherche important dans une optique de lutte intégrée : en effet, la seule lutte par les pesticides reste coûteuse, présente des inconvénients environnementaux, et son efficacité technique à long terme toujours sujette à caution (apparition de résistances). Des solutions génétiques ont permis de résoudre le problème de la cylindrosporiose (due à *Cylindrosporium concentricum*), la gamme variétale présentant un bon niveau de résistance aujourd'hui et assez stable.

Le phoma (*Leptosphaeria maculans*) est en passe d'être maîtrisé par la génétique également, le

---

<sup>562</sup> Meiss, H., Mediene, S., Waldhart, R. et al., 2010. *Agronomy for Sustainable Development* 30(3):657-666.

<sup>563</sup> Colbach, N., Kurstjens, D.A.G., Munier-Jolain, N.M., 2010. *European Journal of Agronomy* 32(3):205-218.

niveau de tolérance de la gamme variétale s'étant nettement amélioré ces dernières années. Toutefois, une partie des résistances utilisées sont des résistances monogéniques, contournables en quelques années par la maladie dans le cadre des pratiques agricoles classiques. Les recherches sont orientées d'une part vers la gestion dans l'espace des différentes résistances monogéniques utilisées et les manières de les associer (dans les formules génétiques et fonds génétiques du colza et dans le temps) pour éviter une adaptation trop rapide de la maladie ; d'autre part vers l'identification de résistances quantitatives, plus stables. Le phoma du colza a fait l'objet de travaux de modélisation (épidémiologie, gestion agronomique et spatiale en vue de gérer les résistances) dans le cadre du modèle SIPPOM<sup>564</sup>.

Le sclérotinia du colza (*Sclerotinia sclerotiorum*) fait aujourd'hui en France l'objet d'une lutte fongicide systématique dans la mesure où il n'existe pas de traitement curatif. Les travaux menés sur la modélisation des attaques, les avertissements et les systèmes d'aide à la décision n'ont pas débouché à ce jour de manière opérationnelle à grande échelle, les niveaux de risques techniques et financiers et le ressenti de ces risques par les agriculteurs (pas de possibilité de rattrapage) conduisant à privilégier le traitement préventif. Les travaux s'orientent dans deux directions non exclusives : la mise en place de dispositifs assurantiels d'une part, et la recherche de tolérances génétiques d'autre part, qui pourraient constituer le point de départ d'une lutte intégrée. Le sclérotinia, champignon très polyphage dont les scléroties se conservent dans le sol plusieurs années, reste un obstacle à la diversification des rotations, de nombreuses têtes de rotation (légumineuses notamment) y étant sensibles. Une lutte biologique a été mise au point avec un certain succès à l'aide d'un champignon parasite (*Coniothyrium minitans*), mais reste coûteuse et généralement limitée au secteur à haute valeur ajoutée des cultures légumières.

L'oidium (*Erysiphe cruciferarum*) dans le Sud de la France et l'alternaria (*Alternaria brassicae*) au nord sont des maladies de fin de cycles contrôlées en traitement fongicide curatif essentiellement. Ils ne font pas l'objet de recherches actives aujourd'hui.

Le Verticillium, cause de dessèchements précoces, reste peu étudié également.

La hernie des crucifères (*Plasmodiophora brassicae*), pathogène plus particulièrement présent dans les sols acides et hydromorphes, ne fait pas l'objet de recherches actives. Elle est contrôlée par des tolérances génétiques dont la stabilité est loin d'être assurée.

### *Insectes*

Le colza est la cible d'un ensemble d'insectes ravageurs dont les populations et l'importance des attaques évoluent. Ils sont généralement contrôlés par des traitements insecticides qui ont parfois montré leurs limites ces dernières années du fait de dynamiques de populations particulières et d'invasions massives, et également d'acquisition de résistances à certaines matières actives (cas de *Meligethes aeneus* notamment). Compte tenu de la disparition de plusieurs familles insecticides et du nombre de solutions de lutte, la lutte contre les insectes est plus que jamais le point sensible de la culture du colza. Les travaux récents visant l'introduction du colza dans les systèmes d'agriculture biologique ont montré que les insectes ravageurs constituaient le principal obstacle à surmonter et le frein majeur au développement de la culture dans ces systèmes<sup>565</sup>. Le développement de la lutte

---

<sup>564</sup> Lô-Pelzer E., 2008 - Modélisation des effets des systèmes de culture et leur répartition spatiale sur le phoma du colza et l'adaptation des populations pathogènes responsables de la maladie (*Leptosphaeria maculans*) aux résistances variétales. Thèse d'AgroParisTech, soutenue le 20 mai 2008, 246 p.

<sup>565</sup> Valantin-Morison M, Meynard J-M, Doré T, 2007. Crop management and environment effects on insects in organic winter oil seed rape (WOSR) in France. *Crop protection* 26 : 1108-1120

intégrée est une quasi obligation à terme, mais se heurte au déficit de connaissance en matière de biologie et de dynamiques des populations des ravageurs et de la faune auxiliaire, ainsi qu'au manque de compétences des institutions de recherche dans ces domaines.

#### *Ravageurs telluriques*

Ce sont pour le colza principalement les limaces et les nématodes. Les limaces sont un réel danger pour les premières stades de la culture et font l'objet de traitements chimiques souvent répétés. La nuisibilité des nématodes sur colza n'est pas prouvée, mais ils posent un problème pour la mise en rotation avec la betterave.

#### **Impacts environnementaux**

##### *Sol (MO, fertilité, érosion)*

Les résidus de culture du colza n'étant pas exploités à ce jour, le retour au sol de matière organique est relativement élevé, de l'ordre de 8 à 10 tonnes de matière sèche par hectare. Le colza est notamment pour cette raison considéré comme une plante améliorante et un bon précédent à blé.

Le colza d'hiver dans les conditions françaises occupe le sol pendant près de 11 mois, ce qui en fait une culture annuelle très favorable en termes de couverture du sol et de limitation des fuites de nitrates, sous réserve de bien gérer l'interculture qui suit.

##### *Eau, nitrates*

Le bilan azote de la culture (apports – exports) est largement positif, souvent de l'ordre de 80 unités N/ha, solde qui intègre l'effet de pompe à nitrate du colza sur les résidus laissés par le précédent. Toutefois, les résidus d'azote minéral après colza sont souvent élevés (en partie du fait de l'arrêt d'absorption relativement précoce du colza, qui est récolté en juillet, et des minéralisations tardives de début d'été), qui rend souhaitable la gestion de l'interculture suivant le colza, le procédé le plus simple étant de laisser se développer les repousses, permettant ainsi de limiter les risques de percolation pendant l'automne.

##### **GES**

Le sujet des gaz à effet de serre est capital pour cette culture relativement exigeante en azote. Le bilan des biocarburants en termes de bénéfices vis-à-vis de l'effet de serre et du réchauffement climatique a été remis en cause<sup>566</sup> du fait des émissions de N<sub>2</sub>O. Les études de Germon et al.<sup>567,568</sup> ont montré que les émissions de N<sub>2</sub>O, en moyenne de 1,2 kg/ha par an, étaient très variables et dépendaient notamment des types de sols - les sols riches ou à tendance hydromorphe présentant les émissions les plus élevées – et des pratiques de fertilisation.

La limitation des émissions de GES est un sujet clé pour lequel des études sont lancées en France (collaboration INRA - Instituts techniques) à l'échelle des cultures et de la rotation culturale (UMT GES-

---

<sup>566</sup> Crutzen P J, Mosier A R, Smith K A, Winiwarter W, 2008. N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8 : 389-395.

<sup>567</sup> Germon J-C, Henault C, Garrido F, Reau R, 1999. Mécanismes de production, régulation et possibilités de limitation des émissions de N<sub>2</sub>O à l'échelle agronomique. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 85 : 148-162.

<sup>568</sup> Germon J-C, Henault C, Cellier P, Cheneby D, Duval O, Gabrielle B, Laville P, Nicoullaud B, Philippot L, 2003. Les émissions de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) d'origine agricole. Evaluation au niveau du territoire français. *Etude et Gestion des Sols*, 10 : 315-328.

N2O)

## **Biodiversité**

### *Potentiel invasif de ces espèces*

Le colza, lui-même hybride naturel d'un chou et d'une navette, est susceptible de s'hybrider naturellement avec des espèces sauvages. Le sujet a été largement étudié dans le cas des colzas génétiquement modifiés.

### *Autres impacts sur la biodiversité*

Peu d'études existent à ce jour sur cette question qui fait actuellement l'objet de premiers travaux (CETIOM)

## **Compétitivité, concurrence vis à vis des autres filières**

Le colza est une grande culture compétitive dans les conditions techniques et économiques européennes actuelles, ce qui en fait l'une des principales têtes de rotation. Ses performances en rendement ont toutefois augmenté moins vite ces dernières années que celles du blé.

## **Lacunes de connaissance**

### ***La maîtrise technique de la production***

Les trous de connaissances liés aux techniques de production concernent prioritairement les domaines suivants:

- Le contrôle des bioagresseurs dans la perspective de la mise au point de la lutte intégrée. Les trous de connaissance dans ce domaine sont nombreux, notamment dans le domaine de la biologie et des dynamiques de populations de ravageurs, où le retard pris devient préjudiciable
- La modélisation de l'élaboration des rendements graines, huile et protéines du colza reste très imparfaite, notamment sur l'aspect rendement huile.
- La perception et la gestion des risques par les agriculteurs reste un sujet insuffisamment étudié, notamment dans ses conséquences sur les choix de stratégies de conduite des cultures par les agriculteurs.

### ***La maîtrise de la filière***

#### *Valorisation du tourteau*

Dès lors que la filière envisagée passe par l'extraction de l'huile (à des fins alimentaires, de biocarburants ou de chimie des corps gras), la maîtrise et l'optimisation de la filière implique de valoriser aussi au mieux le co-produit tourteau et de maîtriser les impacts environnementaux possibles liés à son utilisation. La meilleure valorisation du co-produit tourteau, en termes économiques et vis-à-vis de ses impacts environnementaux, génère un ensemble de pistes de travail :

- L'augmentation du contenu énergétique pour l'utilisation en porcs et en volailles est l'objectif prioritaire.

Les travaux en cours sur l'évaluation du modèle des graines jaunes apparaissent pertinents.

Une voie alternative, le recours à l'usage des enzymes pour dégrader les composés polysaccharidiques pariétaux, est évoqué. Cet aspect des composés des parois est particulièrement important pour les usages en volailles. Une analyse bibliographique poussée apparaît nécessaire avant de se prononcer

sur cette voie.

Le dépelliculage du colza, s'il permet une amélioration conséquente du contenu énergétique du tourteau pour les porcs, donne des résultats décevants pour les volailles. Il serait souhaitable de revisiter les résultats obtenus anciennement par le CETIOM sur le dépelliculage et de reprendre une étude économique sur le sujet.

- L'amélioration du contenu protéique, moins prioritaire que l'énergie au vu des études de potentiels d'incorporation dans les rations, ne saurait être négligé, tant d'un point de vue économique qu'environnemental.

La teneur en protéines de la graine et donc du tourteau n'est clairement pas l'enjeu et il n'est pas recommandé d'engager des travaux sur ce sujet.

L'amélioration de la digestibilité des protéines du colza pour les monogastriques - surtout les porcs - d'une part, et les ruminants d'autre part, est à privilégier. Il n'est pas proposé de conduire de nouvelles recherches sur les composants de la graine et les déterminants génétiques de cette composition, mais de se concentrer sur les voies technologiques : poursuite des études en cours sur la modélisation des effets des traitements thermiques notamment au cours de la désolvantation des tourteaux, pour une meilleure maîtrise de l'effet température sur la digestibilité des acides aminés.

Un travail sur les process doux doit être engagé, qui pourrait viser à la fois le marché tourteau alimentation animale porcs et volailles et l'extraction des protéines à des fins industrielles voir d'alimentation humaine. Toutefois, de tels process pourraient remettre en avant le sujet des teneurs en glucosinolates, du fait du fort lien observé entre teneurs en GLS et solubilité des protéines dans le cadre des pratiques industrielles actuelles.

- Les composés antinutritionnels font l'objet de peu de débats aujourd'hui: les teneurs en GLS ne sont pas le facteur limitant principal aujourd'hui. Il n'est donc pas proposé de recherches visant des teneurs plus faibles, mais la vigilance sur le respect des seuils actuellement en vigueur et le maintien de la contrainte au niveau de l'inscription s'imposent.

Deux voies de sélection seraient toutefois susceptibles de faire encore progresser sur la teneur en glucosinolates : la sélection génétique sur les GLS indoliques, non ciblés à ce jour par la sélection, et l'abaissement de la teneur en sinapine qui pourrait être traitée par la voie génétique afin d'ouvrir le marché des poules pondeuses. Si le sujet n'apparaît pas prioritaire aujourd'hui, une veille biblio peut être conseillée, notamment côté Canada.

- La valorisation non alimentaire des protéines du colza, qui présentent des caractéristiques prometteuses dans les domaines des agents moussants et des colles, pourrait être envisagée, mais la valorisation de telles recherches ne peut être assurée que par le dépôt de brevets sur les procédés, et, pour revêtir un aspect d'intérêt collectif, demanderait des investissements interprofessionnels.

La question d'une sélection génétique sur l'équilibre cruciférine/napine, affecté semble-t-il lors du passage aux variétés « 00 », apparaît prématurée tant que les recherches sur les valorisations n'offrent pas de résultats déterminants. En effet, les deux catégories de protéines sont intéressantes pour des usages différents.

- L'impact du process sur la solubilité/extractibilité des protéines.

La valorisation non alimentaire des protéines se heurterait d'abord aux difficultés d'extraction de ces protéines, qui demanderait en première approche un process de la graine doux à froid. Mais cette thématique est d'intérêt également pour les usages des tourteaux en alimentation animale, voire pourrait concerner les concentrations en composés mineurs dans l'huile (diététique, conservation). Le sujet est donc au coeur des aspects de qualités spécifiques.

La réduction des coûts énergétiques des process a fait l'objet de propositions (relation entre composition, structure des corps lipidiques et extractibilité de l'huile / projet Génobodies).

- Teneur en phosphore des tourteaux.

Elle a été avancée comme un problème limitant l'incorporation dans les aliments porcs du fait des normes CORPEN. Son importance reste toutefois controversée. Le sujet dépasse largement le cadre des oléagineux, mais il est recommandé de maintenir une veille.

### **Les ressources (azote, énergie, etc)**

La réflexion visant à l'amélioration de l'efficacité de la culture vis-à-vis de l'azote montre diverses voies complémentaires qui se heurtent à des déficits de connaissances. L'amélioration des pratiques de fertilisation azotée recèle toujours des possibilités d'amélioration, comme semble le suggérer la diversité des bases d'aide à la décision en Europe. En particulier, l'approche britannique de l'ADAS (John Spinks, communication orale) utilise un principe assez différent des méthodes utilisées en France et en cours de tests en Allemagne, en proposant un parcours idéal d'élaboration du rendement : pour atteindre un rendement de 3,5 t/ha, un indice de surface verte (feuilles + tiges + siliques) de 3,5 serait suffisant (maxi d'absorption lumineuse par le couvert), ce qui nécessiterait l'absorption de 175 unités N / ha seulement ; chaque tonne de rendement supplémentaire nécessite 60 unités N en plus. Le parcours vise 7 000 siliques/m<sup>2</sup>, et part du principe que l'absorption d'azote précoce encourage une floraison et une production de siliques excessives, et qu'une absorption tardive est nécessaire pour le remplissage.

L'amélioration de l'efficacité de la plante vis-à-vis de l'azote : l'amélioration génétique peut probablement contribuer à cet objectif dans la mesure où il existe une variabilité génétique de l'indice de récolte azote du colza comme l'ont montré les projets IRN puis NATURAL avec l'identification de QTL.

Des travaux britanniques (Pete Berry, ADAS, communication orale) montrent que des essais variétés réalisés avec ou sans azote montrent une variabilité des baisses de rendement en conditions sans azote de 15 à 33 % selon les variétés. Les auteurs définissent l'efficacité comme le ratio azote dans les graines / azote absorbé, à distinguer de l'efficacité de l'absorption (quantité d'azote absorbé/quantité d'azote disponible dans le sol). L'efficacité d'utilisation de l'azote par le colza pourrait être améliorée grâce à une meilleure remobilisation de l'azote des tiges et des parois des siliques vers les graines. Des différences génotypiques de contenu en azote des tiges à la floraison et à maturité permettent d'espérer des progrès.

Les britanniques remarquent par ailleurs que la moitié des cultures observées auraient des enracinements insuffisants pour valoriser l'azote du sol, sur la base d'un seuil critique de densité racinaire de 1 cm de racines/cm<sup>3</sup> de sol (=celui du blé).

Une équipe allemande (Gunda Schulte auf'm Erley, Institute of Plant Nutrition, Leibniz University of Hannover, communication orale) part de la définition de l'efficacité suivante : « l'efficacité de l'azote est la capacité d'un génotype à produire un rendement plus élevé que la moyenne de la population en conditions d'azote limitant » et pensent que la translocation vers les graines est un aspect mineur si on considère la gamme variétale actuelle, dans la mesure où l'indice de récolte azote varie de 0,86 en conditions d'azote non limitant à 0,82 en conditions d'azote limitant. Des idéotypes ont été définis par rapport à leur capacité à produire un rendement en graines plus élevé que la moyenne en conditions de disponibilité en azote limitée : (1) idéotype traditionnel inefficace ; (2) idéotype traditionnel amélioré (forte capacité à absorber l'azote jusqu'à la floraison) ; (3) idéotype alternatif (absorption d'azote faible jusqu'à la floraison). Les génotypes actuels ont été analysés selon cette typologie. Le comportement « stay green » serait un point positif. Différentes hypothèses de fonctionnement de la plante sont émises pour expliquer une sénescence foliaire retardée.

Ces différents travaux ainsi que ceux menés en est nécessaire de mieux comprendre France<sup>569</sup> montrent que l'absorption et le métabolisme de l'azote ainsi que les transferts au cours de la vie des plantes, leurs effets sur la répartition de l'azote dans la plante, et l'élaboration des rendements huile et protéines restent des domaines où les connaissances doivent être approfondies pour identifier les cibles de sélection.

L'amélioration de la gestion du stock d'azote du sol dans le système de culture s'inscrit après le diagnostic des pertes d'azote avec l'outil SYST'N (projet AZOSYSTEM). Si les fuites par lixiviation, travaillées de longue date, sont relativement bien connues et modélisées, la compréhension des fuites d'azote en vue de les gérer se heurte aujourd'hui au manque d'information sur les pertes gazeuses, notamment N<sub>2</sub>O et NH<sub>3</sub>.

### **Les impacts environnementaux: GES**

Le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) est un gaz à effet de serre (GES) important puisqu'en France ses émissions contribuent pour 16 % au pouvoir de réchauffement global (hors vapeur d'eau). L'agriculture est responsable d'environ 72 % des émissions de N<sub>2</sub>O et est ainsi le principal secteur économique émetteur de ce gaz. La volonté de maîtriser les émissions de GES, en particulier dans le secteur agricole, impose donc de maîtriser les émissions de N<sub>2</sub>O. Pour y parvenir, il convient de connaître les mécanismes biophysiques à l'origine de ces émissions aux échelles pertinentes, les quantités émises dans diverses situations pédoclimatiques, et comment les pratiques agricoles interagissent avec ces mécanismes.

Pour estimer les émissions de N<sub>2</sub>O par les sols cultivés, la démarche la plus commune est d'utiliser les facteurs d'émission proposés par la littérature par exemple par Mosier et al.<sup>570</sup> : ils sont exprimés en kg de N-N<sub>2</sub>O émis par kg de N apporté, et traduisent un lien avec la pratique de fertilisation azotée. C'est la méthode actuellement proposée par défaut (niveau ou « Tier » 1) par l'IPCC pour l'établissement des inventaires nationaux d'émissions. Ce lien très grossier conduit à des estimations avec une forte incertitude. Le facteur d'émission de l'IPCC est ainsi de 1 % des apports d'azote avec un intervalle de confiance de 0,3 à 3 %. Par ailleurs, avec une telle approche la seule voie envisageable de réduction de l'émission de N<sub>2</sub>O qui ait apparemment un effet est de réduire l'apport d'azote. D'autres leviers existent pourtant, comme les modalités de fertilisation (formes d'engrais et dates d'apport), le travail du sol, l'irrigation et la gestion des matières organiques exogènes<sup>571</sup>. Il faut en outre rappeler ici que ces facteurs d'émissions peuvent être adaptés pour chaque pays lors de la réalisation de son inventaire national (« Tier 2 »), à condition qu'ils soient dûment justifiés par des mesures représentatives ayant une signification statistique bien établie. On ne dispose pas actuellement de telles références agronomiques pour la France. Ce déficit est notamment lié à la complexité d'effectuer des mesures d'émission de N<sub>2</sub>O et à leur coût. Constituer une telle base de données nous semble aujourd'hui essentiel pour évaluer les émissions de N<sub>2</sub>O par l'agriculture, et les potentiels de réduction par des pratiques agronomiques adaptées aux contextes pédoclimatiques de la France.

Pour chercher à affiner l'estimation des émissions en fonction des pédoclimats et des pratiques agricoles, l'IPCC propose également une méthode qui consiste à utiliser un modèle de simulation (« Tier 3 »). L'inventaire actuel aux Etats-Unis est réalisé avec cette méthode de niveau 3. Il existe plusieurs modèles simulant la production nette de N<sub>2</sub>O par la microflore du sol *via* la dénitrification et la

<sup>569</sup> Morot-Gaudry J-F, Orsel M., Diaz C., Daniel-Vedel F., Mascalux-Daubresse C. 2006. Absorption et assimilation du nitrate et recyclage de l'azote organique chez les plantes : intérêt pour le colza. OCL 13(6) : 393-402

<sup>570</sup> Mosier, A.R., Duxbury, J.M., Freney, J.R. et al. 1998. *Climatic Change* 40(1):7-38.

<sup>571</sup> Vale, M., Mary, B., Justes, F. 2007. *Biology and Fertility of Soils* 43(6):641-651.

nitrification<sup>572</sup>. Ils sont tous globalement de la même forme : les vitesses de dénitrification et de nitrification sont modélisées par une fonction multiplicatrice entre une valeur potentielle et des fonctions de réponse aux conditions physiques et chimiques du sol (température, humidité et pH), et aux substrats (teneurs en ammonium et nitrate). La vitesse de dénitrification potentielle est essentiellement liée à l'activité biologique du sol, et se mesure en conditions anaérobiques avec une concentration en nitrate non limitante. L'un de ces modèles, NOE<sup>573</sup> a été construit, calibré et validé en partie dans les conditions françaises. Mais, aussi satisfaisants soient-ils, ces modèles sont rarement reliés aux pratiques agricoles. De plus, il faut mesurer les données d'entrée de ces modèles, ou les estimer par le biais d'un modèle de culture qui simule les cycles eau-carbone-azote dans le système sol-plante-atmosphère. Cette intégration a été réalisée dans le modèle CERES-EGC, développé par l'INRA à Grignon<sup>574</sup>. Un tel modèle permet d'étudier les liens entre émissions de N<sub>2</sub>O et un ensemble de paramètres de l'itinéraire technique, notamment les modalités de fertilisation azotée, et de prédire l'ensemble des pertes d'azote au niveau de la parcelle ainsi que les variables de production de la culture.

Une telle approche intégrée a également été développée avec le modèle DNDC, qui peut être utilisé pour prédire la croissance des plantes, la température et l'humidité du sol, le lessivage d'azote, l'évolution du carbone et les émissions de gaz trace dont le N<sub>2</sub>O. Il incorpore la croissance des plantes en place ainsi que certaines données de management de la parcelle. Utilisé préférentiellement par le JRC de la commission européenne<sup>575</sup>, DNDC est en passe de devenir un outil privilégié par les européens pour l'estimation des flux de GES.

Mais, la validité de CERES-EGC-NOE et de DNDC dans les conditions agricoles françaises reste largement à vérifier. Par exemple, Hénault et al.<sup>573</sup> ont observé une bonne adéquation entre les simulations et les mesures d'émissions de N<sub>2</sub>O cumulées sur une année. Mais, cette évaluation a été réalisée sur quelques situations qui sont loin de représenter la diversité des conditions de culture. Par ailleurs, si les cumuls étaient corrects, les valeurs instantanées d'émissions étaient souvent mal simulées. La difficulté de correctement simuler les cinétiques d'émissions, alors que les cumuls sont bien représentés, a également été constatée en Inde avec le modèle DNDC<sup>576</sup>. Ces modèles doivent donc être testés plus largement dans les conditions pédoclimatiques et d'agriculture françaises, et éventuellement être améliorés.

Les concepts et modèles présentés ci-dessus considèrent que les émissions de N<sub>2</sub>O reliées aux apports anthropiques d'azote ont lieu dans les parcelles recevant ces apports – on parle d'émissions directes. Mais on sait aussi que des émissions importantes de N<sub>2</sub>O se produisent également au niveau des sites récepteurs de l'azote perdu par lessivage et volatilisation – on parle alors d'émissions indirectes – ainsi qu'au niveau des bâtiments d'élevage, des zones de stockage des effluents d'élevage et des pâturages. Si les mesures à la parcelle sont relativement faciles à appréhender et à mettre en relation avec les pratiques agricoles, il n'en est pas de même des émissions indirectes. En outre ces dernières reposent sur un nombre encore plus limité de données expérimentales que les mesures à la parcelle. Elles sont donc sujettes à de très fortes incertitudes. L'IPCC propose comme facteur d'émissions indirectes 0,33 % kgN<sub>2</sub>O-N/kg N, dont 0,23 % en raison du lessivage, et 0,1 % en raison de la volatilisation. Faute d'autres références permettant de proposer d'autres valeurs de facteurs

<sup>572</sup> Bonis, A., Bouzille, J.B., Dausse, A. et al. 2008. *Fourrages* 196:485-489.

<sup>573</sup> Laville, P., Hénault, C., Gabrielle, B. et al. 2005. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72(2):159-171.

<sup>574</sup> Gabrielle B, Laville P, Duval O, Nicoulaud B., Germon J-C, Hénault C, 2006. Process-based modeling of nitrous oxide emissions from wheat-cropped soils at the sub-regional scale. *Global Biogeochemical Cycles*, 20, GB4018.

<sup>575</sup> Leip, A., Marchi, G., Koeble, R. et al. 2008. *Biogeosciences* 5(1):73-94.

<sup>576</sup> Babu, Y.J., Li, C., Frolking, S. et al. 2006. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74(2):157-174.



d'émissions, l'ADEME en 2008 recommande ces valeurs. De nouvelles sources d'informations utilisant notamment d'autres approches ont remis à l'ordre du jour l'importance potentielle de ces émissions indirectes. Par une approche globale qui considère l'évolution des teneurs atmosphériques en N<sub>2</sub>O en regard avec celle des quantités d'azote utilisées en agriculture, Crutzen et al.<sup>577</sup> aboutissent à un facteur d'émission global (direct + indirect) compris entre 3 et 5 % de l'azote minéral apporté, ce facteur ne recouvrant toutefois pas exactement les mêmes processus ni les mêmes émissions que la méthodologie IPCC. Par des analyses de concentrations et de flux mesurés ou simulés à l'échelle de bassins versants de grandes dimensions, Billen et al.<sup>578</sup> et Flipo et al.<sup>579</sup> estiment qu'environ 20% du flux de nitrates quittant la zone racinaire est dénitrifié. Beaudoin et al.<sup>580</sup> montrent qu'en conditions de grandes cultures intensives du nord du bassin parisien, la quantité moyenne d'azote lessivé est de 27 kg/ha/an pour un apport d'azote minéral de 100 à 127 kg/ha, soit de 21 à 27 % de l'apport. En combinant ces 2 ratios, on arrive à une dénitrification indirecte de l'ordre de 4 à 5 %. Il faut noter cependant que ce flux de dénitrification ne doit pas être confondu avec le flux de N<sub>2</sub>O, car il comprend aussi les dégagements de N<sub>2</sub>. Ces quelques données laissent penser que les dégagements indirects de N<sub>2</sub>O sont très mal connus. Dans certains cas ils semblent supérieurs aux dégagements directs dans la parcelle, puisqu'ils se produisent dans des zones humides, favorables aux émissions de N<sub>2</sub>O mais dont le fonctionnement et les liens avec les zones agricoles sont mal connus.

La quantification et la modélisation des flux de N<sub>2</sub>O directs ou indirects, les relations de ces flux avec les pratiques agricoles et les pratiques d'aménagement du paysage (gestion des zones humides par exemple) constituent donc des maillons faibles. Cela limite d'une part la capacité à procéder à des évaluations environnementales complètes et fiables des grandes cultures vis-à-vis de la question du changement climatique, et d'autre part la possibilité de faire évoluer les systèmes de culture pour contribuer à la régulation de ces flux.

### *Biodiversité*

Les impacts de l'accroissement de la sole oléagineuse sur la biodiversité sont aujourd'hui mal connus. Les seules tentatives partielles ont été conduites lors d'études sur l'impact de cultures OGM sur l'environnement. Pour un domaine aussi complexe, il est d'ailleurs difficile de vouloir caractériser l'impact d'un type de culture, et il est nécessaire d'avoir une approche prenant en compte plusieurs échelles géographiques en interaction : celle du paysage, comprenant les parcelles agricoles et les zones non cultivées ou dédiées à d'autres activités, celle de la parcelle agricole et enfin celle de la station d'observation au sein de la parcelle. A chaque échelle vont correspondre des indicateurs et des méthodes d'observation spécifiques.

#### **5.1.11. Association légumineuses et céréales**

Sur le plan énergétique, les engrais azotés représentent de loin le principal poste de consommation d'énergie fossile parmi les intrants utilisés sur une culture : environ 2/3 des coûts énergétiques pour une céréale recevant 180 kg/ha d'azote minéral. Les légumineuses, autonomes pour leur nutrition azotée, grâce à la fixation symbiotique d'azote atmosphérique, ont une bien meilleure efficacité énergétique, mais leur bilan économique, en culture pure, reste généralement inférieur, du fait de leur potentiel de

---

<sup>577</sup> Crutzen P J, Mosier A R, Smith K A, Winiwarter W, 2008. N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8 : 389-395.

<sup>578</sup> Billen, G., Thieu, V., Garnier, J. et al. 2009. *Agriculture Ecosystems and Environment* 133(4):234-246.

<sup>579</sup> Flipo, N., Even, S., Poulin, M. et al. 2007. *Science of the Total Environment* 375(1-3):69-79.

<sup>580</sup> Beaudoin, N., Saad, J.K., Van Laethem, C. et al. 2005. *Agriculture Ecosystems and Environment* 111(1-4):292-310.

rendement moindre et plus variable que celui des céréales. Des résultats récents français et internationaux montrent que les associations céréales-légumineuses ont généralement un rendement supérieur et plus stable que les cultures pures individuelles en systèmes à bas niveau d'intrant azoté, tout en utilisant moins d'intrants chimiques. Il est probable que ces associations permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre (travaux en cours à INRA Grignon).

Les associations céréale-légumineuse pourraient ainsi contribuer au développement d'une agriculture qui concilie productivité et haute valeur environnementale, voire à visée de biomasse énergétique. Bien qu'elles connaissent un regain d'intérêt, ces associations sont toutefois encore peu cultivées en France (environ 50 000 ha). Elles sont surtout cultivées en agriculture biologique pour l'autoconsommation dans les élevages et sont quasiment absentes des systèmes céréaliers qu'ils soient biologiques ou conventionnels. Des premiers travaux dans le cadre d'un programme européen (INTERCROP Vème PCRD, coordonné par E.S. Jensen), puis dans le cadre d'un premier programme national financé par l'ADAR (coordonné par B. Carrouée, UNIP avec l'aide des collègues de l'INRA de Grignon ; AAP2005 N°431) et dans un second en cours (coordonné par ESA d'Angers, G. Corre-Hellou), ont permis de bien mettre en avant les atouts des cultures associées céréale-légumineuse à graine à la fois en terme de productivité, de qualité des produits récoltés (grains plus riches en protéines) et de services écologiques (développement de la biodiversité, contrôle des bioagresseurs, limitation des pollutions) rendus aux agrosystèmes. Dans les systèmes d'élevage (modèle triticale-pois fourrager), les associations apparaissent tout à fait intéressantes pour produire une biomasse importante (généralement utilisée en ensilage), et plus stable que ses cultures concurrentes (en particulier le maïs ensilage) face aux aléas climatiques, riche en fibres et en MAT et économe en intrants (eau, azote, produits phytosanitaires)<sup>581,582</sup>. Les cultures associées constituent donc probablement une voie intéressante pour produire de la biomasse énergétique.

Pour le débouché grains (modèle blé-pois protéagineux), les associations apparaissent, en agriculture conventionnelle, un bon moyen pour produire au moins autant (rendement, teneur en protéines) que la moyenne des cultures pures avec beaucoup moins d'intrants azotés et donc de consommation énergétique induite<sup>583</sup>. En agriculture biologique, elles offrent la possibilité de produire du blé riche en protéines<sup>584</sup> (en moyenne gain de 2 points par rapport à un blé pur) en l'absence d'engrais chimique de synthèse et de produire du pois sans les facteurs limitants fréquemment rencontrés en culture pure (adventices, maladies). Des associations à base de blé et de légumineuse fourragère peuvent être aussi envisagées<sup>585</sup>. Comme dans le cas des associations blé-légumineuse à graine, elles permettraient de valoriser les ressources naturelles en vue de réduire l'utilisation d'intrants tout en maintenant un niveau de production de biomasse élevé. Dans le cas d'associations céréale-légumineuse fourragère, la légumineuse peut être aussi considérée comme une plante de service pour assurer des fonctions agro-écologiques surtout lorsqu'elle est semée sous couvert<sup>585,586</sup> à l'échelle du

---

<sup>581</sup> Adam J. 1953. Les plantes à matière grasse, le ricin, le pourghère. Paris, Société d'editions Géographiques, 127 p. (Encyclopédie d'agriculture tropicale).

<sup>582</sup> Avila J. Coulard de, 1949, Breves instruções para a cultura de purgueira. Colonia de Cabo Verde, Reais participação Técnica dos serviços Agrícolas, Floresta e Pacuários. Imprensa Nacional de Cabo Verde, Praia.

<sup>583</sup> Reinhardt Guido, coordinator, 2008, Basic da for Jatropha production and use, IFEU, CSMCRI, UHIAPTS, 15 p.

<sup>584</sup> Cunha da Silveira J. 1934. Contribution à l'étude du pourghère aux îles du Cap Vert. Anais do Instituto Superior de Agronomia. vol.6:n°1 : p.116-126.

<sup>585</sup> Elegeert P., Stiemer D., Vaitilingom G., 2002, Estudio de factibilidad usos alternativos del Tempate, Nicaragua, 34 p.

<sup>586</sup> Ghosh A., 2007, Patolia J.S., Chaudhary D.R., Chikara J., Rao S.N., Kumar D., Boricha G.N., Zal A., Response of Jatropha curcas under different spacing to Jatropha de-oil cake, Fact Seminar on Jatropha Curcas L. Agronomy and genetics, 26-28 March 2007, Wageningen, the Netherland,

cycle de la céréale et *a posteriori* : réduction des infestations d'adventices, lutte contre les ennemis des cultures, piégeage des nitrates excédentaires, contribution au pool azoté du sol, amélioration de la structure du sol, augmentation de la biodiversité sur la parcelle agricole. Il reste néanmoins à acquérir des connaissances sur ce type d'associations. En tout état de cause, le fonctionnement et les performances finales des associations céréale-légumineuse dépendent fortement de la disponibilité en azote du milieu<sup>587</sup>. On ne dispose pas à l'heure actuelle de références suffisantes pour piloter la fertilisation azotée de l'association. Ces connaissances sont néanmoins en cours d'acquisition (Thèses C. Naudin, ESA Angers et L. Bedoussac, INRA Toulouse) et pourront probablement servir à la mise au point d'itinéraires techniques à des fins non alimentaires.

Les cultures associées permettraient de réduire les dégâts de maladies et de ravageurs mais les résultats sont souvent contrastés. Les mécanismes en jeu peuvent être variés et complexes<sup>587,588</sup>. Par ailleurs, le choix de l'espèce, de la variété et de la densité de semis pourrait influencer les résultats de ces phénomènes. Des travaux ont montré en agriculture biologique, en l'absence totale de désherbage, que les cultures associées permettaient de réduire la pression des adventices par rapport à un protéagineux cultivé pur mais qu'elles avaient une compétitivité similaire à une céréale pure<sup>589</sup>. Ainsi, les cultures associées peuvent constituer un moyen alternatif de maîtrise des adventices mais elles ne sont généralement pas suffisantes pour maîtriser totalement les infestations. Le raisonnement d'autres éléments de l'itinéraire technique tels que la densité ou le choix variétal doit contribuer à maximiser la compétitivité du couvert. La phase d'installation du couvert et les interactions précoces entre espèces qui s'y mettent en place sont probablement déterminantes sur les rapports de dominance entre espèces cultivées et la compétitivité du couvert vis-à-vis des adventices.

Il est évident que des questions demeurent sur la conception d'itinéraires techniques pour ces associations céréale-légumineuse à graine ou fourragère visant à satisfaire différents débouchés avec des niveaux élevés de production et de qualité des produits récoltés et minimisant les intrants ainsi que sur le raisonnement de la place de ces associations dans la succession. Il existe peu de références sur leur usage en biomasse énergétique quant à leur efficacité énergétique, d'autant que les processus de transformation de ces cultures, par exemple dans des filières de carburant de seconde génération ne sont pas encore au point. Le seul point consensuel est que ce type d'association permet de produire de la biomasse avec une quantité d'engrais minéral azoté plus faible et avec un usage probablement réduit de pesticides. Il reste cependant à déterminer à quel stade de récolte le rendement énergétique de la culture est le meilleur en vue de la production de biomasse énergétique suivant la filière qui est susceptible de l'utiliser (biogaz ou combustion-cogénération...). L'objectif de production de biomasse énergétique pour des filières de combustion-cogénération, à partir de plantes entières récoltées à maturité ou de grains, nécessite de réduire les coûts de production tant sur le plan économique qu'énergétique<sup>590</sup>. Pour ces débouchés, les critères de qualité et de pureté de grains sont moins exigeants qu'en débouché alimentaire (on cherchera en particulier des graines peu riches en azote, au contraire du cas précédent), ce qui permettrait d'explorer des pistes plus extrêmes et une gamme

---

Published by Fact Foundation.

<sup>587</sup> Reinhardt Guido, coordinator, 2008, Basic data for Jatropha production and use, IFEU, CSMCRI, UHIAPTS, 15 p.

<sup>588</sup> Grimm C., Guharay H., 1997, Potential of Entomopathogenic Fungi for Biological Control of True Bugs in J. Curcas L Plantations in Nicaragua, , Biofuels and Industrial Products from Jatropha curcas, Nicaragua, 7 p.

<sup>589</sup> Grimm C., J. M. Maes, 1997, Arthropod Fauna Associated with Jatropha curcas L in Nicaragua, A Synopsis of Species, their biology and Pest Status, Biofuels and Industrial Products from Jatropha curcas, Nicaragua, 9 p.

<sup>590</sup> Heller J. 1991. Etude des potentialités génétiques et amélioration des méthodes de culture et de reproduction du pourghère (*Jatropha curcas L.*). Stuttgart, GTZ, 88 p.

d'espèces et de variétés plus large que dans le cas précédent, pour réduire encore plus les coûts de production<sup>591</sup>. Toutefois dans ce domaine, le travail reste à faire et devra être réalisé au regard des critères objectifs demandés par la ou les filières de valorisation non alimentaire.

En relation avec les conditions de production fréquentes jusqu'à maintenant, la plupart des programmes de sélection ont développé des cultivars pour la culture pure et pour une protection phytosanitaire élevée<sup>591</sup>. Par ailleurs, la majorité des travaux de recherche sur les cultures associées utilise les mêmes variétés que celles utilisées en cultures pures. Cependant quelques rares études démontrent bien que les cultivars ne se comportent pas de la même façon en culture pure et en culture associée<sup>592</sup>. Toutefois, les caractéristiques variétales à l'origine des écarts de performance ne sont ni clairement mises en évidence ni hiérarchisées et les interactions avec le milieu, notamment la disponibilité en azote, peuvent être aussi importantes. Pour atteindre les objectifs des associations (complémentarités maximales entre espèces notamment pour les ressources azotées, compétitivité élevée vis-à-vis des adventices, réduction forte des pressions fongiques, et efficacité énergétique...), les caractéristiques variétales suivantes sont probablement déterminantes : hauteur du couvert, vitesse de croissance au démarrage, potentiel de fixation symbiotique et résistance aux maladies. Les variétés disponibles n'ont pas été sélectionnées sur ces critères et n'ont pas non plus été caractérisées sur ces points.

Les effets des cultures associées sur la culture suivante ont rarement été étudiés rendant difficile le raisonnement de leur positionnement dans une succession culturale. Il existe aussi peu de références sur les effets à plus long terme de ces cultures associées sur la structure du sol ainsi que sur les maladies. Dans le cas d'associations blé-pois, l'augmentation de la fréquence de retour de chaque espèce par rapport aux préconisations pourrait augmenter le risque des maladies suivantes : *Aphanomyces* et piétin-échaudage. Cependant, l'écartement supérieur entre plantes d'une même espèce, au sein d'une parcelle cultivée en association, pourrait permettre de limiter le développement de l'inoculum, et donc de réduire le développement des épidémies. Ces hypothèses restent à tester.

Par ailleurs, il demeure des questionnements sur les critères objectifs à prendre en compte pour la conception d'itinéraires techniques de cultures associées pour les filières « biomasse énergétique » ou de valorisation non alimentaire. Ils sont actuellement peu connus et ne sont pas forcément déductibles de ce que l'on utilise classiquement en situation de culture pure. Il est donc probable que les variétés adaptées et les conduites optimales soient différentes des références actuelles surtout si les critères objectifs de qualité des grains ou de la biomasse végétale à produire sont différents.

L'analyse des atouts et des freins des cultures associées ne peuvent se limiter aux avantages agronomiques mis en évidence à l'échelle de la parcelle. Leurs effets nécessitent d'être plus globalement analysés d'un point de vue à la fois agronomique, économique et environnemental par comparaison à d'autres cultures pures habituellement utilisées pour ces finalités. Les conséquences à l'échelle de la filière doivent aussi être évaluées notamment sur la faisabilité technique et économique du tri des espèces, si celui-ci est nécessaire pour une meilleure valorisation énergétique. Enfin, la question de la localisation des cultures associées par rapport à la localisation des sites de transformation se pose de façon cruciale pour la production de biomasse énergétique. En effet, il faut éviter de consommer trop d'énergie et de produire de la pollution atmosphérique (liée au transport) afin de s'assurer de ne pas perdre tout le bénéfice qu'on aura gagné en les cultivant.

---

<sup>591</sup> Heller J. 1996. *Physic nut Jatropha curcas* L. Italy, IPGRI, 66 p.

<sup>592</sup> Henning, Le pourghère, 1990, Mémoire de fin d'études traduit dans le cadre du programme Spécial Energie Mali, 277p.

## 5.2. Questions transversales

### 5.2.1. Conception et évaluation des systèmes de production

Quels sont les principaux facteurs à prendre en compte dans la conception et l'évaluation de systèmes de production (à décliner selon cultures de plein champ, plantations forestières et production confinée d'algues) : infrastructures, ressources liées à la mise en place (énergie, intrants), sécurité / robustesse des procédés / processus (confinement), impacts (sol, eau, biodiversité), marchés, filières de transformation (y compris co-, sous-produits, déchets), changements globaux, enjeux sociétaux, etc.

Les méthodes de conception et d'évaluation (outils multi-critères, analyse de cycle de vie) de systèmes de production actuelles sont-elles adaptées ou adaptables à ces systèmes spécifiques ou mixtes ? Quels besoins en modélisation ?

On peut distinguer schématiquement 4 types de tâche liées à la conception de systèmes de culture<sup>593</sup>: (i) celles liées à la définition des contraintes et objectifs reposant sur le système de culture ; (ii) celles liées à la conception/génération de systèmes de culture ; (iii) celles liées à l'évaluation des systèmes de culture ; (iv) celles liées à la dissémination des systèmes innovants. Les tâches (ii) et (iii) ont été celles qui ont été le plus formalisées en termes méthodologiques par les agronomes. Il est légitime de distinguer des démarches de conception et d'évaluation, mêmes si ces démarches peuvent être liées. On peut imaginer la conception *ex-nihilo* de systèmes de cultures, tandis que l'évaluation de ces systèmes requière, de manière intrinsèque, des informations sur le comportement des cultures. Une revue de la littérature fait apparaître que quel que soit la méthodologie utilisée pour l'évaluation (analyse statistique, modèle conceptuel, modèle numérique, indicateurs de diagnostic, évaluation multicritère, analyse en cycle de vie), deux types de problèmes se posent pour l'évaluation : le nombre élevés de critères à prendre en compte pour juger de la qualité des systèmes, et l'agrégation de ces critères pour hiérarchiser les systèmes entre eux. Dans un contexte de cultures utilisées à des fins chimiques ou énergétiques, la problématique reste identique.

Les méthodes de conception et d'évaluation de systèmes de culture sont *a priori* adaptées à la mise au point de nouveaux systèmes de production végétale. Des méthodes ont été récemment développées en agronomie pour pouvoir réaliser des évaluations multicritères de systèmes de culture (ex modèle MASC, à partir de l'outil DEXI). On peut penser que les méthodes « outils multi-critères et analyse de cycle de vie » sont conceptuellement adaptées à la conception de nouveaux systèmes de production végétale. Mais, il sera sans doute nécessaire de prendre en compte des critères objectifs différents et plus variés que ceux utilisés dans les systèmes de culture traditionnels. La hiérarchisation des critères à prendre en compte et leur pondération constitueront une étape clé car l'évaluation sera nécessairement « multicritères », mais elle sera aussi certainement limitée à un petit nombre de critères. Par là, il est probablement peu légitime, si ce n'est pour établir un catalogue, de vouloir identifier les principaux facteurs à prendre en compte pour la conception et l'évaluation, sans définir plus avant les systèmes innovants étudiés. Plusieurs niveaux catégoriques peuvent en revanche être définis, vis-à-vis des critères d'évaluation. On peut par exemple distinguer les variables souvent quantifiées dans les démarches agronomiques actuelles et pour lesquelles l'introduction d'un nouveau type de plante ou d'une nouvelle technique de production ne modifie pas le principe de quantification, des critères spécifiquement liés à l'innovation introduite et pour lesquels un référentiel sera à construire afin de permettre l'évaluation. Ainsi par exemple, les pertes nitriques par lixiviation ou l'efficacité d'utilisation de l'eau sont des variables accessibles à la mesure par expérimentation ou modélisation et les méthodes utilisées pour leur quantification sont peu susceptibles d'être modifiées par l'innovation technologique

<sup>593</sup> Loyce et Wery, 2006

introduite. Même si, dans le cas d'une évaluation à l'aide d'un modèle mathématique, un nouveau travail de paramétrage sera nécessaire. Dans le cas de la production de biomasse énergétique, l'évaluation de l'efficacité énergétique apparaît cruciale au même titre que le bilan de CO<sub>2</sub>. Il conviendra d'être capable de bien quantifier les émissions de gaz à effet de serre de ces nouveaux systèmes de culture au même titre que la prise en compte des intrants utilisés. Il faut noter que dans ces critères classiques d'évaluation des systèmes de cultures, certains ont fait l'objet d'un important travail de recherche et sont désormais mesurés et/ou modélisés de manière robuste. D'autres indicateurs, comme par exemple les pertes d'oxyde d'azote et les flux de pesticides dans le milieu, ne sont pas encore évalués correctement dans bon nombre de situations agricoles. Cette lacune risque donc de se poser également pour les nouvelles cultures si des programmes spécifiques ne sont pas mis en œuvre dès le début des travaux.

Dans les critères spécifiquement liés à l'innovation introduite, il conviendra probablement d'inclure plusieurs caractéristiques qualitatives et quantitatives des plantes (profils moléculaires, biomasse, etc.). Dans ce cas, la mise au point d'indicateurs pour l'évaluation des systèmes de culture nécessite un double travail : le premier consiste à s'assurer de la pertinence et de la fiabilité des indicateurs choisis, le second à évaluer la manière dont les techniques culturales sont susceptibles d'affecter ces indicateurs. L'acquisition de connaissances dans le fonctionnement des cultures nouvelles issues de plantes peu ou pas cultivées actuellement sera nécessaire. Des travaux de modélisation peuvent être utiles pour pouvoir réaliser des expérimentations virtuelles visant à connaître le potentiel de production dans différentes régions agricoles ou pour évaluer rapidement leur zone d'adaptation, en particulier pour des espèces ayant des exigences physiologiques particulières. Un enjeu sera de simuler le bilan environnemental de ces cultures. Le travail de modélisation pourrait sans doute s'appuyer sur les nombreux modèles de culture existants mais des adaptations plus ou moins importantes devront être réalisées, en terme de formalisation des processus surtout si les variables simulées s'avèrent très différentes de celles simulées habituellement pour la production végétale. Ainsi, si les modèles de culture sont généralement aptes à simuler la composition en carbone et azote (protéines totales) de la biomasse aérienne ou des graines, voire la teneur en sucre (betterave, canne) ou en huile (tournesol, soja), il existe peu de modèles de culture simulant la composition biochimique ou simulant directement le bilan énergétique en variables de sorties.

Parallèlement à l'évaluation, la démarche de conception de système de cultures consiste à définir la meilleure suite logique d'actes techniques dans des parcelles agencées dans l'espace pour aboutir à un objectif de production donné. On peut distinguer classiquement trois méthodes de conception : (i) à partir de modèles, (ii) à partir d'un diagnostic agronomique, ou (iii) à partir d'expertise. Pour ce qui concerne des plantes peu cultivées, pour lesquelles les références existantes sont limitées, on peut faire l'hypothèse que la conception par expertise (catégorie dans laquelle on peut ranger le prototypage) est la plus adaptée pour l'obtention de résultats rapides. Quelle que soit la méthode choisie, une phase ultérieure d'évaluation est nécessaire, reposant quasi obligatoirement sur la mise en œuvre expérimentale des systèmes de culture candidats. La difficulté peut reposer sur l'évaluation des effets de long terme (impacts environnementaux et économiques notamment) induits par la mise en œuvre du nouveau système de culture. La communauté des agronomes insiste, dans le cas d'une volonté de diffusion de systèmes de culture innovants, sur une démarche participative et l'implication précoce des acteurs de la production (agriculteurs et techniciens de terrains). Le temps nécessaire à l'introduction d'une innovation peut dépendre du degré de bouleversement que cette innovation impose au fonctionnement de l'exploitation. On peut ainsi hiérarchiser l'impact de l'innovation du point de vue du système de production : elle peut affecter une partie d'un itinéraire technique, nécessiter l'adaptation ou l'évolution des facteurs de production de l'exploitation, ou bouleverser l'organisation des cultures et le fonctionnement écologique de l'exploitation.

Un autre aspect concerne la question de l'insertion de nouvelles cultures annuelles ou pluriannuelles de court terme (2-3 ans) dans la rotation ou tout au moins sa position dans la succession de cultures par rapport aux cultures plus traditionnelles. Il sera nécessaire de quantifier et si possible de prédire l'effet précédent pour les cultures suivantes, surtout si ces cultures sont pluriannuelles car des effets cumulatifs peuvent se produire et devenir prépondérants. De même l'analyse de la sensibilité du suivant aux différents états générés par ces cultures ne devra pas être négligée surtout si la variabilité de l'effet précédent s'avère importante (par exemple si les conditions de récolte sont très défavorables et induisent une forte compaction des sols,...).

Enfin, un point important concerne l'évaluation au niveau régional, voire national ou global de l'insertion de ces nouvelles cultures dans l'économie liée à l'agriculture et à ces impacts environnementaux. Des travaux récents de modélisation et d'évaluation multicritères et à diverses échelles ont été réalisés en ce sens dans le cadre du projet européen Seamless. Les outils et modèles produits par les équipes de ce projet pourraient être remobilisés et adaptés à l'évaluation de ces nouvelles cultures sur les plans agronomique, environnemental et économique.

En conclusion, on peut penser que les méthodes de conception et d'évaluation actuelles (outils multicritères, analyses de cycle de vie) et de modélisation sont *a priori* adaptées ou adaptables à ces futurs systèmes de production végétale. Par contre, un travail de paramétrage spécifique pour chaque nouvelle espèce devrait être réalisé, ce qui peut constituer une étape fastidieuse mais néanmoins indispensable.

### **5.2.2. Cultures énergétiques, territoires et biodiversité**

Le développement de cultures non alimentaires pour produire de l'énergie est non seulement un enjeu de compétitivité mais aussi un moteur des dynamiques territoriales. En effet, il faut adapter les systèmes de culture, de collecte et de transformation des produits agricoles et ces changements nécessitent une coordination dans l'organisation du territoire.

#### ***Adapter les systèmes de culture***

Dès lors que l'on s'intéresse à des critères de qualité nouveaux, les modes de production agricoles doivent être adaptés, d'autant plus que certaines cultures énergétiques sont pérennes (taillis à courte rotation, miscanthus, ...).

L'INRA a mis au point à la fin des années 90 des techniques de culture spécifiques pour le blé destiné à produire du bioéthanol. Ces techniques tiennent compte de l'extractibilité de l'amidon du grain, de la teneur en protéines des tiges permettant leur utilisation en alimentation du bétail, de l'optimisation du bilan énergétique, tout en cherchant à minimiser le coût de production du litre de biocarburant. L'itinéraire cultural proposé diffère de celui du blé panifiable par le choix de la variété, une réduction de 40 à 50 % des engrais azotés et de 30 % des semences et par la suppression des traitements fongicides et régulateurs de croissance. On réduit ainsi fortement les nuisances dues aux pesticides et le coût de production du quintal de grain. Cet itinéraire technique « optimisé » a été élaboré grâce à l'utilisation d'un modèle informatique, BETHA, qui permet de répondre à un cahier des charges complexe, intégrant objectifs économiques et environnementaux.

Un travail analogue reste à faire pour d'autres cultures et d'autres débouchés. Comme pour le blé, il sera nécessaire de recourir à la modélisation, car elle permet de tester rapidement et à peu de frais des solutions techniques très diverses, avec leurs conséquences sur la production, la qualité et l'environnement.

### ***Préserver la biodiversité cultivée et sauvage***

Les débouchés non alimentaires de l'agriculture offrent une opportunité de diversifier les espèces cultivées. Cette diversification sera bienvenue, car la spécialisation régionale actuelle favorise le développement des adventices et parasites des cultures (donc l'usage des pesticides) et la simplification des assolements et des successions culturales simplifient les paysages et réduit les habitats pour la faune sauvage.

En ce qui concerne les biocarburants, seul le développement des filières lignocellulosiques, fondées sur la luzerne, le sorgho, le miscanthus ou les taillis à courte rotation, permettra une diversification des assolements. Ces couverts végétaux, pérennes ou pluriannuels nécessitent de nouvelles régulations territoriales, et peuvent contribuer à l'émergence d'éléments de la « trame verte » (Grenelle de l'environnement). En attendant que ces filières se développent, on peut craindre d'assister à un accroissement des surfaces en céréales et oléagineux dans des régions déjà spécialisées.

En particulier, les sous-produits de la fabrication de biocarburant à partir de céréales et oléagineux, tels que les tourteaux de colza ou les drèches de céréales, pourraient contribuer à faire disparaître du paysage agricole le pois protéagineux, qui occupe en partie le même créneau en alimentation animale. Le pois protéagineux possède en effet un grand intérêt agronomique et environnemental, de par sa capacité à fixer l'azote atmosphérique. La fabrication de l'engrais azoté coûtant de l'énergie fossile, la présence du pois dans la rotation permet d'améliorer le bilan énergétique et de réduire l'émission de gaz à effet de serre.

La mise au point des procédés de transformation de la lignocellulose en biocarburant, qui prendra quelques années, nous offre un délai qui devra être mis à profit pour intégrer les impacts écologiques des cultures énergétiques dans la planification des implantations industrielles. Par exemple, des usines de taille importante et spécialisées sur un seul produit génèreront des monocultures dans leurs environs. La polyvalence des usines, leur taille et leur répartition géographique seront des paramètres essentiels de l'impact des biocarburants sur la biodiversité. Il faudra sans doute également veiller à ce que les petites forêts paysannes, qui abritent aujourd'hui des espèces végétales et animales, très diversifiées, ne soient pas remplacées, après exploitation de leur biomasse, par des forêts monospécifiques à forte vitesse de croissance.

A l'interface entre économie, agronomie et écologie, il y a donc une réflexion à mener pour organiser les bassins de production tout en préservant la biodiversité.

### ***Organiser la coexistence des filières sur le territoire agricole***

La diversification des usages non alimentaires pourrait entraîner la multiplication dans les paysages de variétés d'une même espèce, dédiées à des filières différentes. En effet, on parle aujourd'hui de sélection de variétés spécifiques pour la production énergétique. Cette cohabitation entraîne des risques de contamination des récoltes, soit par des fécondations croisées, soit par des repousses. Il y a aussi des risques de mélange lors de la collecte ou dans les silos.

Tout dépendra des seuils de contamination ou de mélange tolérés par les normes de qualité sanitaire et les marchés. Une fois ces seuils fixés, on pourra recourir à la modélisation pour calculer les distances nécessaires entre parcelles, définir les dates de semis pour décaler les floraisons entre champs voisins, ou les techniques pour maîtriser les repousses. Des modèles combinant spatialisation des systèmes de culture et simulation des échanges génétiques entre parcelles (et bordures) existent d'ores et déjà pour



le colza et le maïs, et sont en cours de conception pour d'autres espèces.

### **Gérer les dynamiques territoriales**

On voit que le développement des cultures pour la production de biocarburants devrait marquer les territoires : nouvelles espèces cultivées, concentration de certaines cultures autour d'usines, gestion de coexistence, mais aussi nouveaux emplois ruraux, évolution des sources d'alimentation du bétail et des pratiques d'élevage et, sans doute, changements dans la perception des agriculteurs par leurs voisins... L'INRA est très attentif à ces dynamiques territoriales, et à leur diversité, (i) pour identifier les sources potentielles de tensions et conflits, (ii) pour repérer les solutions innovantes concoctées localement et qui pourraient être utiles ailleurs, ou (iii) pour identifier les leviers que pourraient utiliser les pouvoirs publics en vue d'agir sur ces dynamiques dans le sens de l'intérêt général.

Parmi les exemples de dynamiques territoriales déjà à l'œuvre, on voit émerger des collectifs réunissant des agriculteurs et souvent leurs voisins non-agriculteurs, organisés autour de la production locale d'énergie, pour le chauffage collectif ou le biocarburant. On voit aussi des collectivités locales promouvoir le développement des bio-ressources sur leur territoire, en valorisant de la biomasse, en utilisant des terrains contaminés par les métaux lourds pour les cultures non alimentaires. Plus généralement, on a vu ces dernières années émerger des dispositifs collectifs pour la gestion des paysages incluant cultures, forêts, parcours et espaces interstitiels où agriculteurs et autres acteurs du territoire se concertent pour la ressource en eau ou la protection d'espèces (Fertimieux, SAGE, Natura 2000,...). Pourquoi pas pour l'accompagnement du développement des bio-ressources ?

#### **5.2.3. Domestication versus OGM**

Les tâches du sous-atelier B ont montré que certains synthons pouvaient être obtenus par différentes espèces et/ou par transformation d'espèces déjà bien maîtrisées au plan agronomique et des filières.

Il s'agit d'une question transversale aux tâches de VegA pour laquelle la tâche a à s'interroger de la façon suivante : Quel éclairage la conception de systèmes de production peut apporter au choix de la stratégie en termes d'espèces : transfert de gènes vers des cultures déjà présentes ou domestication ? Dans les cas où plusieurs espèces (y compris génétiquement modifiées) sont susceptibles de produire les mêmes molécules (les identifier), est-on capable de tirer des enseignements génériques sur les avantages/inconvénients de la domestication d'espèces par rapport à la modification génétique d'espèces déjà « adaptées », au-delà des spécificités de chaque situation ?

Cette thématique nécessite la mise en place d'outils d'évaluation *ex ante* de filières quant à leurs coûts de développement, aux compétences requises pour ce développement et à leurs impacts économiques, techniques, organisationnels, sociaux et environnementaux.

### **5.3. Pistes de recherche**

L'état de l'art décrit ci-dessus a fait ressortir un certain nombre de verrous de connaissances qui permettent de dégager des pistes de recherche dont certaines sont communes à la plupart des systèmes de production de biomasse abordés et d'autres plus spécifiques. Le présent chapitre tente de synthétiser quelques pistes de recherche génériques alors que l'annexe 1 détaille les pistes par filière. Ces pistes de recherche génériques sont structurées autour de deux grands axes, qui se distinguent par l'échelle spatiale d'étude. Le premier axe a pour objet d'étude la parcelle (ou l'entité) de production alors que le second aborde l'échelle de l'exploitation agricole ou du territoire.

### 5.3.1. Quelles connaissances et méthodes sont nécessaires pour concevoir et évaluer des systèmes de culture durables et adaptés aux conditions locales de production en intégrant de multiples exigences à différentes échelles temporelles ?

Dans ce premier axe, l'objet d'étude est constitué de la parcelle agricole (ou l'incubateur ou le bassin de production pour les algues). Le développement de systèmes de production de biomasse devrait se traduire d'une part par le développement de nouvelles cultures (nouvelles espèces, nouvelles variétés ou nouvelle valorisation d'une culture existante) et d'autre part, par l'exploitation de nouveaux milieux de production (zones marginales pour les cultures terrestres, eaux pour les algues), ces milieux pouvant par ailleurs être soumis à des conditions climatiques nouvelles. En ce qui concerne les nouvelles zones de production qui pourraient être utilisées pour la biomasse et, par conséquent, nécessiter des systèmes de production adaptés, on peut mentionner :

- Des zones à fortes contraintes naturelles (ex : sols très sableux, acides, salés, en forte pente, hydromorphes),
- Des zones polluées (friches industrielles, bords de routes, sols miniers, zones d'épandages, proximité d'usines polluantes etc.),
- Des zones à faible rentabilité économique (éloignement, fragmentation).

Cette diversification des cultures et des zones de production se traduira par une diversification accrue des systèmes de production.

#### 5.3.1.1. Adéquation entre cultures de biomasse et conditions de milieu

##### **Objectifs**

Du fait de la concurrence pouvant s'exercer entre les cultures dédiées à la production de biomasse et les cultures alimentaires sur les terres agricoles, il est important d'évaluer la capacité d'exploration de zones marginales (à faible potentiel de production notamment) par les cultures lignocellulosiques, d'autant que ces cultures peuvent rendre des services environnementaux à l'échelle d'un territoire. Par exemple, la localisation de cultures pérennes (ex : taillis à courte rotation, miscanthus) ou l'insertion de cultures pluriannuelles (ex : switchgrass) dans les successions de cultures dans des sols hydromorphes et/ou des zones à excédent structurel en azote pourrait contribuer à limiter le drainage en période hivernale et réduire ainsi les risques de lixiviation de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Au delà des types de sols explorés, il s'agit également de caractériser l'aire d'adaptation des cultures lignocellulosiques en se situant dans une perspective de changement climatique.

##### **Questions de recherche**

Deux grandes séries de questions se posent sur les deux leviers que nous avons identifiés pour atteindre cet objectif:

a) Acquérir des références de terrain pour évaluer les performances des cultures dans des conditions pédoclimatiques contrastées

Ces dispositifs, de type multi-locaux et pluriannuels, peuvent être : (i) des expérimentations en réseau (avec un protocole commun de conduite des cultures) en vue de comparer les performances relatives de différentes cultures (voire différents génotypes d'une même culture) dans différents milieux selon les usages d'utilisation de la biomasse envisagés, (ii) des enquêtes en parcelle agricole (pas de contrôle des facteurs de production) en vue de caractériser la variabilité des performances des cultures (rendement, aptitude à la transformation, impacts environnementaux, efficacité énergétique, etc.) et d'en préciser les déterminants.

b) Acquérir une meilleure connaissance sur l'écophysiologie des espèces étudiées

Un certain nombre de lacunes sont à combler sur la caractérisation des stress hydriques et azotés perçus par les cultures dédiées selon les milieux rencontrés : quel(s) indicateur(s) d'état de nutrition azoté considérer pour des plantes pérennes ou pluriannuelles qui stockent de l'azote dans leurs rhizomes ? Quelles sont les périodes de sensibilité des cultures à ces stress et les impacts associés sur la production et l'environnement ? La présence de bioagresseurs des cultures dédiés (qui peut être variable selon les milieux considérés) et leurs effets sur les cultures sont également à étudier.

Les données et connaissances acquises peuvent nourrir (i) une activité de modélisation en vue de simuler les performances des cultures pour différents types de sols et différents scénarios climatiques, en lien avec les changements climatiques à l'œuvre et à venir, (ii) une réflexion sur les techniques culturales (choix du génotype inclus) à mettre en œuvre à l'échelle du cycle cultural pour aboutir à une meilleure adaptation des cultures aux conditions de milieux rencontrées.

### 5.3.1.2. Changements d'usages des parcelles et des cultures

#### **Objectifs**

Les recherches devraient permettre de faire sauter les verrous qui s'opposent à l'adoption de culture d'espèces végétales, nouvelles dans les systèmes. En particulier, il s'agit d'apporter des réponses aux questions que posent les phases de transition de début, mais aussi de fin de culture (par exemple la conversion d'un champ de miscanthus en blé).

#### **Questions de recherche**

Deux grandes séries de questions se posent sur les :

- Pratiques agricoles : la culture de nouvelles espèces soulève des problèmes techniques de domestication et d'adaptation aux contraintes climatiques, de définitions et de maîtrise des itinéraires techniques appropriés. Elle entraîne également des questions socio-économiques et culturelles : ces opérations doivent être économiquement rentables pour l'exploitant ; elles exigent en outre une phase d'apprentissage par les acteurs, elle-même conditionnée par leur perception de ces transitions : un agriculteur producteur de denrées alimentaires peut considérer sa conversion en producteur d'énergie comme un changement de métier. Des problèmes culturels peuvent notamment se poser dans les pays en développement, où la distribution des genres et des âges peut encore s'accroître, entre production alimentaire de subsistance et production commerciale.

- Dynamiques temporelles : il importe d'envisager d'emblée les questions de rentabilité économique et d'impacts environnementaux à long terme. Les craintes sur l'irréversibilité de la conversion alimentaire/énergie peut peser sur son acceptabilité. Cette conversion est-elle rentable à long terme si l'on prend en compte un risque de dévalorisation des terres (par difficulté de gestion des rhizomes par exemple) ? Certaines cultures sarclées dans les pays du Sud, comme le *jatropha curcas*, ne vont-elles pas entraîner des processus d'invasion, d'érosion des sols, de dépendance accrue à l'usage de fertilisants, d'herbicides et de pesticides industriels, voire d'irrigation ? L'introduction de ces nouvelles espèces ne va-t-elle pas accentuer des différences dans une spécialisation accrue des terres, les plus fertiles étant dévolues aux cultures commerciales, les plus marginales aux cultures vivrières, avec un risque accru de crise alimentaire ?

### 5.3.1.3. Amélioration de l'efficacité d'utilisation des ressources naturelles (eau, sols, énergie lumineuse) et des intrants externes fossiles

#### Objectifs

La concurrence entre les cultures alimentaires et les cultures bioénergétiques pour l'utilisation des terres est déjà au centre des préoccupations des agriculteurs aussi bien que des politiques. Afin de limiter au mieux cette concurrence, les terres « sous-optimales » ou marginales (ici dans le sens de parcelles à faible productivité en raison d'une qualité du sol médiocre, d'une topographie accidentée, d'une taille réduite ou d'une disposition peu judicieuse au sein de l'exploitation, par exemple) seront sans doute privilégiées pour l'installation de ce type de cultures aux fins de production de bioénergie. Comme pour toute culture, et particulièrement dans le cas de terres peu fertiles, une croissance optimale des plantes est dépendante d'apports hydriques et azotés. Dans le contexte actuel, la fertilisation et l'irrigation de grandes surfaces dédiées aux cultures bioénergétiques n'est cependant pas une solution économiquement viable en raison des besoins d'optimisation d'une filière encore largement balbutiante. La dépendance aux intrants industriels peut potentiellement être réduite en jouant sur plusieurs facteurs afin de limiter les pertes, de boucler les cycles biogéochimiques ou d'optimiser l'utilisation des ressources présentes. Ces facteurs sont principalement de deux ordres : choix raisonné d'itinéraires techniques et sélection de matériel végétal adapté.

#### Questions de recherche

Une optimisation des itinéraires techniques spécifiques aux cultures aux fins bioénergétiques est nécessaire de façon à optimiser l'utilisation des ressources présentes dans le milieu. Les itinéraires techniques doivent être raisonnés en fonction de la biologie / phénologie des plantes et des caractéristiques du milieu. La densité de plantation, la fréquence des coupes, le moment de l'année auquel elles interviennent sont autant de facteurs sur lesquels il est possible de jouer pour minimiser les besoins en intrants. Par exemple, une densité de plantation importante implique de plus forts besoins en eau et est donc théoriquement à éviter pour les sites secs. Les très courtes rotations entraînent l'exportation de bois très jeunes, riches en écorce et en éléments minéraux, et doivent donc être proscrites sur sols peu fertiles. Les récoltes devraient idéalement être faites lorsque la mise en réserve dans les organes pérennes des plantes est optimale de façon à limiter les exportations d'éléments minéraux hors de la plantation et prévenir un appauvrissement rapide des sols. Dans le cas des arbres, les coupes devraient avoir lieu lorsque la chute des feuilles est complète de façon à permettre un retour de l'azote au sol et à la plante. Bien sûr, cela n'est pas toujours possible lorsque les sols ne sont pas portants en hiver, comme c'est le cas dans certaines régions. La combinaison de ces éléments repose néanmoins sur une bonne connaissance de la biologie des plantes (cinétique et dynamique de mise en réserve dans les organes pérennes, besoins en eau et en nutriments, etc.) qui reste à acquérir pour la plupart.

Outre la manière dont les plantations sont gérées, la nature du matériel végétal planté est également un facteur sur lequel il est possible de jouer pour minimiser les besoins en intrants fossiles. Les associations variétales permettent de réduire les risques d'infestations par les pathogènes et donc les besoins en traitements phytosanitaires. Les associations céréales-légumineuses (ou l'utilisation d'espèces d'arbres telles que l'aulne et le robinier qui fixent l'azote atmosphérique) peuvent théoriquement favoriser les apports « naturels » en azote. Néanmoins, des problèmes de compétitions entre espèces ou entre variétés peuvent apparaître et le comportement de ce type de mélanges nécessite des études approfondies.

La sélection et l'utilisation d'espèces et de variétés ou de génotypes présentant des qualités adaptées

aux conditions du milieu sont également un moyen de maximiser la production à moindre coût en apports externes (eau, nutriments, mais aussi protection chimique ou mécanique contre les contraintes du milieu) :

- Utilisation efficace de l'eau et des nutriments (définis comme le rapport entre la biomasse accumulée et la quantité d'eau ou de nutriments consommés) ; ces traits sont très variables entre espèces et au sein des espèces et il est donc possible de sélectionner un matériel végétal efficient, d'autant plus lorsque le milieu est pauvre ; la robustesse de ces traits pour une espèce ou un génotype donné doit néanmoins encore être documentée.
- Résistance accrue aux contraintes aussi bien abiotiques (sécheresse, froid, chaleur, ennoyage, vent, etc.) qu'abiotiques (pathogènes, ravageurs, compétition avec les adventices, etc.) ; plusieurs types de stratégies existent pour survivre à ces différents types de stress (tolérance, évitement, échappement, etc.) et de larges gammes de niveaux de résistances sont disponibles même au sein d'une espèce donnée ; la sélection d'un matériel végétal adapté aux aléas environnementaux est donc possible.

Les liens entre ces différentes qualités, leur robustesse quelque soit l'environnement dans lequel elles sont estimées, et leurs réponses aux conditions du milieu nécessitent d'être explorés. Un équilibre entre productivité, d'une part, et résistance ou efficacité, d'autre part, pourrait signifier l'impossibilité de sélectionner des génotypes ou variétés présentant ces deux types de propriétés à la fois.

#### 5.3.1.4. Evaluation de la durabilité des systèmes de culture

##### **Objectifs**

Les recherches devront permettre de fournir des connaissances, des outils et des méthodes pour évaluer la durabilité des systèmes de culture candidats. Ces évaluations multi-critères pourront porter à la fois sur les impacts environnementaux (locaux et globaux), économiques et sociaux. Les connaissances acquises à ce niveau pourront aussi être utilisées dans des évaluations à l'échelle de la filière (ACV) ou du territoire.

##### **Questions de recherche**

- Impacts sur l'environnement : quelles sont les conséquences de ces nouveaux systèmes de culture sur le fonctionnement des agro-écosystèmes ? quelles méthodes et outils pour une évaluation *ex-ante* de ces conséquences ? – Les recherches devront aborder le cycle de l'eau (impacts sur l'ETR, le ruissellement, le drainage), les cycles biogéochimiques (flux de nitrates, émissions de N<sub>2</sub>O, stockage/déstockage de carbone dans les sols), l'utilisation de substances polluantes (produits phytosanitaires), le fonctionnement et la préservation des sols, la biodiversité (risques liés à l'introduction de nouvelles espèces). Les opportunités offertes par ces nouveaux systèmes pour la phytoremédiation des sols pollués pourront être étudiées. Un effort particulier pourra porter sur la production d'outils ou de méthodes d'évaluation génériques prenant en compte le contexte local de production (utilisation de modèles, d'indicateurs, etc.).
- Impacts économiques et sociaux : quelle serait l'efficacité économique de ces systèmes de culture ? quelles seraient leurs conséquences au niveau social ? – Ces questions comprennent les calculs économiques (coûts de production, marges nettes, etc.), l'adaptation des produits aux exigences des filières (qualité de la biomasse), les besoins en main d'œuvre et les conséquences possibles sur l'organisation du travail, etc. Là aussi, les recherches devront porter sur l'acquisition de connaissances et aussi sur l'élaboration de méthodes et d'outils d'évaluation.

### **5.3.2. Quelles connaissances et méthodes pour raisonner le positionnement des cultures dans les exploitations et les territoires et en évaluer les impacts multiples ?**

Sur ce second axe, l'échelle d'étude considérée est l'exploitation agricole et le territoire dans lequel s'insère les filières de production de biomasse.

#### **5.3.2.1. Analyse des déterminants de l'usage des terres**

En fonction des scénarios d'évolution des modes de vie et de développement de la biomasse, la compétition entre filières alimentaires et non-alimentaires sera plus ou moins forte (Cf analyse des scénarios). Néanmoins, quel que soit le scénario, au niveau des territoires et de l'exploitation agricole, la question du choix des cultures et de leurs débouchés est soulevée. Il apparaît donc nécessaire de mieux comprendre les déterminants du choix des agriculteurs en termes de cultures et d'usages des terres et d'analyser comment ces choix s'articulent à l'échelle des territoires pour approvisionner de manière durable et compétitive les différentes filières de production.

A l'échelle de l'exploitation agricole, deux questions méritent d'être traitées avec attention. La première a trait à la prise en compte du risque dans les décisions des agriculteurs, car ceux-ci devront faire des choix entre des cultures dont on connaît mal les perspectives en terme de prix et qui parce qu'elles seront nouvelles pour eux ne seront pas immédiatement bien maîtrisées techniquement. La seconde est relative au caractère pérenne de nombreuses cultures lignocellulosiques (de quelques années pour certaines : luzerne, à plus de dix ans pour d'autres : miscanthus, voire plusieurs dizaines d'années dans le cas des taillis forestiers). L'engagement des agriculteurs dans ces productions dépend de décisions qui les engagent à plus ou moins long terme et donc de leurs préférences intertemporelles. D'autres déterminants interviennent également dans l'adoption de cultures à finalité énergétique : préférences environnementales des agriculteurs, gestion du travail, etc... La nature des contrats qui sont proposés aux agriculteurs est également un thème à étudier spécifiquement, et à mettre en relation avec différents scénarios de contexte économiques (évolution des prix des autres productions agricoles) et de politiques agricoles (découplage, diminution des aides, mesures agri-environnementales).

Des travaux de recherche seront également nécessaires au niveau du territoire d'abord pour optimiser (en particulier en prenant en compte les coûts de transport) l'approvisionnement des usines, ensuite pour analyser les impacts environnementaux du développement de ces productions. Un des atouts importants des biocarburants de seconde génération (par rapport à la première génération) est de pouvoir être produit à partir de nombreuses cultures adaptées à des contextes pédoclimatiques variés. La question de la localisation des productions (terres marginales / terres les plus productives) est donc une question cruciale du point de vue des impacts à la fois sur l'ampleur de la concurrence avec la production alimentaire et sur l'environnement (possibilités de constituer des trames vertes par exemple). Cette question nécessite des recherches notamment en économie publique, pour définir les politiques les plus à même d'inciter au choix de la localisation des cultures pouvant générer des paysages variés et contribuer positivement à l'environnement.

#### **5.3.2.2. Quelles méthodes d'évaluation spatio-temporelle des modes de gestion multicritères de ces nouvelles cultures ? Quelle échelle pour une analyse pertinente du territoire ?**

##### **Questions de recherche**

a) Quelle est la bonne échelle territoriale ? Il est primordial de définir quelle est la bonne échelle d'analyse au niveau spatial et temporel suite au changement d'usage des terres. Comment effectuer le changement d'échelle entre la parcelle et le bassin d'approvisionnement et/ou le territoire ? Le

dimensionnement des unités industrielles va dépendre de leur positionnement géographique par rapport au gisement de productions végétales, des critères économiques, des bilans énergétiques et des paramètres environnementaux et sociaux du moment. S'il existe beaucoup de connaissances et de savoir faire au niveau de la parcelle, il n'en n'est pas de même au niveau du territoire.

b) Quelles sont les méthodes d'analyse pertinentes pour appréhender la problématique de l'insertion des nouvelles cultures à l'échelle du territoire ? Les exigences des différents acteurs suite à l'insertion de nouvelles cultures vont nécessiter des méthodes nouvelles et originales d'intégration impliquant la modélisation et les jeux d'acteurs. Les méthodes existantes devront être adaptées en hiérarchisant et déterminant les liens privilégiés ; c'est le problème par exemple du positionnement des exploitations dans les territoires en fonction de l'évolution des systèmes de cultures qui découlent des nouveaux débouchés économiques. Il sera nécessaire d'en évaluer les impacts multiples, de réaliser une extension spatiale entre parcelles et territoire, d'envisager le bassin dans son ensemble et d'éviter de faire une simple agrégation des différentes parcelles qui constituent le territoire. Il faut intégrer les déterminants environnementaux et socio-économiques dans les systèmes de production ou dans des modèles micro-économiques de fonctionnement des exploitations.

c) Comment appréhender l'analyse multicritères à l'échelle territoriale ? Comment traiter ce type de question au niveau méthodologique ? Il est indispensable d'estimer la bonne dimension du territoire en fonction des critères agronomiques, économiques et sociaux. La biomasse à mobiliser devra être adaptée aux procédés de transformation. Par exemple, la production de biocarburants par conversion thermochimique nécessitera des bassins d'approvisionnement étendus conformes aux équipements à mobiliser. Outre les problèmes logistiques occasionnés, il sera difficile de privilégier une seule plante très performante et il faudra être en mesure de proposer un panel de cultures qui pourront s'adapter aux différents types de sols et de climats rencontrés. Enfin chaque agriculteur a des contraintes spécifiques liées à son système d'exploitation. Il faudra donc imaginer le développement de ces cultures nouvelles dans une optique d'aménagement du territoire en prenant en compte les demandes concernant les services écologiques et les externalités comme l'accroissement de la biodiversité ou le maintien en cultures de terres marginales. Le critère d'acceptabilité doit également être pris en considération. Il y a donc obligation de raisonner les nouvelles cultures dans l'organisation globale socio-économique du territoire.

d) Comment optimiser conjointement (i) la productivité, (ii) l'optimisation du bilan énergétique, (iii) les services écologiques et (iv) réduire les impacts négatifs. Il est nécessaire d'évaluer le potentiel agronomique du territoire (surface, productivité, intérêt économique, etc). Il est indispensable de prévoir comment faire cohabiter les espaces de production intensive, les espaces protégés pour la biodiversité et les services écologiques (sorte de zones tampon pour l'écologie). Il faut à tous prix éviter les conflits d'intérêt. Il est nécessaire de confronter les contraintes environnementales à l'optimisation énergétique et économique.

e) Analyse des besoins hydriques et des conséquences pour l'écosystème. Il faut tout d'abord estimer les différents besoins en eau pour les cultures, en tenant compte des lieux de production, de traitement et de transformation de la biomasse, et des besoins de la population autochtone. Il est nécessaire ensuite d'évaluer les ressources en eau, de préserver des zones d'épuration d'eau douce et d'évaluer les pollutions locales (eaux superficielles et souterraines notamment) générées par les intrants. Il est important de prendre en compte le changement d'usage des terres dans la modélisation des cycles C/N/H<sub>2</sub>O et d'étendre la simulation de devenir à des systèmes physiques plus vastes.

Pour favoriser l'intégration des nouvelles cultures dans un territoire, les besoins de recherche concernent la définition du niveau d'échelle pertinent (variable selon la finalité des productions,

biomolécules ou biomasse) et l'élaboration de méthodes d'analyse adaptées (socio-économique, agronomique, écologique,...) qui permettront de répondre aux différentes exigences et contraintes (sensibilités des milieux, coût d'approvisionnement, biodiversité, possibilité d'insertion dans les systèmes de production en place, acceptabilité sociale,...).

### **5.3.2.3. Quel potentiel dans les zones « marginales » pour les cultures à vocation non alimentaire ?**

Pour limiter la compétition avec les cultures alimentaires, l'exploration des potentialités des zones dites « marginales » est une piste importante à approfondir. Ces zones constituent des surfaces dont certaines peuvent recevoir des cultures non alimentaires. Ceci dit toutes ne sont pas cultivables pour des raisons qui peuvent être bien différentes

#### **Questions de recherche**

Dans un premier temps il sera nécessaire de définir une typologie de ces zones en choisissant les critères qui permettent de toutes les classer et d'en déterminer leurs capacités à être utilisées. Attention, il s'agira de prendre en compte autant les ressources terrestres que les ressources aquatiques.

Pour chaque groupe de la typologie, on s'attachera à évaluer le potentiel agronomique et économique. Comment choisir des méthodes qui soient communes à tous les groupes et qui permettent, à travers une grille, d'en apprécier la valeur en regard des contraintes liées à leur mise en œuvre ?

Enfin, dernier critère important, l'interaction de ces zones marginales avec leur environnement. Certaines de ces zones ont un enjeu écologique concernant la ressource en eau ou en biodiversité. Comment évaluer l'importance de ces zones ? Quels critères prendre en compte qui permettent de définir la localisation territoriale des zones marginales qui puissent être cultivées sans risques pour l'environnement ?

### **5.3.2.4. Comment raisonner le choix des espèces et génotypes à introduire dans un environnement donné vis-à-vis des ressources naturelles et flux de gènes et d'interactions biotiques (pathogènes, prédateurs, auxiliaires...) et leur insertion spatiale ?**

De façon générale, il s'agit d'étudier les modes de gestion des espèces et génotypes dans le temps et l'espace qui permettent de favoriser la productivité, optimiser les bilans énergétiques, valoriser les impacts positifs et réduire les impacts négatifs. Dans ce cadre, l'insertion de nouvelles cultures doit être pensée pour améliorer l'efficacité globale des systèmes de production agricoles.

#### **Questions de recherche**

Plusieurs questions de recherche devraient être adressées :

- Quelles conséquences l'introduction de nouvelles espèces ou génotypes va-t-elle avoir sur la biodiversité (flore et faune) des espaces cultivés et celle des milieux naturels ?
- Quel est le niveau de résilience des milieux et écosystèmes ? Comment évaluer la réversibilité de ces nouvelles cultures ?
- Quels sont les risques d'invasions biologiques et d'introduction de réservoirs de pathogènes et prédateurs en fonction des cultures introduites et de leur mode de gestion ?
- Comment exploiter la diversité génétique et la déployer sur le territoire pour réduire les risques liés aux bio-agresseurs ?



- Quelles associations d'espèces à bénéfices mutuels faut-il déployer à l'échelle du paysage pour accompagner les filières de production ?
- Comment organiser les systèmes de culture à l'échelle du territoire pour préserver la qualité requise des productions (flux de gènes) et la qualité de l'environnement (e.g., eau de consommation dans les zones de captage) ?

Pour prévenir les risques liés à l'introduction de nouvelles espèces et de leurs cortèges associés (pathogènes, prédateurs, auxiliaires,...) et orienter des choix de génotypes, une analyse approfondie des risques encourus comprendra des approches expérimentales et de modélisation.

### **5.3.2.5. Quelles sont les conditions requises au niveau de l'exploitation agricole ou de la ferme aquacole et de la filière pour favoriser l'insertion de ces nouvelles cultures ?**

Les surfaces agricoles qui pourront être utilisées en tant que cultures non alimentaires et plus particulièrement pour la production de biomasse énergétique seront forcément limitées. Il semble évident que des conflits sur l'insertion spatiale de ces nouvelles cultures apparaîtront rapidement avec plus ou moins d'intensité. Une situation particulièrement critique concerne la concurrence sur l'usage des terres avec la production de biens alimentaires dans les pays du Sud. Ce problème se pose avec plus d'acuité dans ces pays notamment en Afrique.

Il est donc nécessaire de prévoir à quel endroit et avec quelle intensité les points de résistance ou de blocable se manifesteront. Ainsi il conviendra d'évaluer les logiques des acteurs de la filière selon différents points de vue : choix de l'agriculteur, choix de l'industriel, choix du gestionnaire des ressources en eau et de la biodiversité ? Au final, la question est de savoir comment concilier les intérêts probablement divergents des différents acteurs ?

D'autres aspects devront être évalués tels que : (i) l'acceptabilité sociale de l'insertion de ces nouvelles cultures, (ii) les conditions de rentabilité au niveau de l'exploitation agricole ou de la ferme aquacole et (iii) au niveau du territoire. Il s'agit donc d'évaluer les conditions requises pour l'insertion de ces nouvelles cultures dans les exploitations agricoles et les filières au niveau d'un territoire donné.

### **Questions de recherche**

Les questions de recherche devront être traitées sous les quatre angles thématiques suivants :

- a) Evaluation micro-économique au niveau de l'exploitation agricole : quel serait l'impact de l'insertion de ces nouvelles cultures sur le bilan financier de l'exploitation agricole ?
- b) Valorisation des co-produits : la valorisation des co-produits peut être un critère décisif de l'intérêt économique de ces nouvelles cultures. Quel est le niveau de valorisation potentiel des co-produits ?
- c) Capacités d'adoption des innovations par les agriculteurs : la capacité d'adoption des agriculteurs peut être un élément déterminant du développement d'une nouvelle filière. Quelles sont les conditions techniques, organisationnelles et économiques qui favoriseront l'adoption des innovations ?
- d) Aversion au risque et réversibilité

L'adoption de ces nouvelles espèces pourrait se heurter au problème de réversibilité notamment pour des cultures pérennes. Il est donc essentiel d'analyser l'aversion au risque des agriculteurs pour l'introduction de ces nouvelles cultures au sein de leur exploitation agricole ainsi que les déterminants économiques ou de rentabilité qui réduiraient significativement les freins à la culture de ces nouvelles espèces ou modes de production des espèces déjà cultivées pour d'autres usages.

## 5.4. La bioraffinerie

### 5.4.1. Notions générales

#### 5.4.1.1 Définition et frontières de la bioraffinerie

Il existe de nombreuses définitions de la bioraffinerie (cf. paragraphe 1.2) Dans ce document, le concept de bioraffinerie est défini comme une succession de procédés physiques, chimiques et/ou biologiques de déconstruction, séparation et fonctionnalisation visant à transformer de façon durable de la biomasse en produits commerciaux intermédiaires ou finis. (Figure 20)

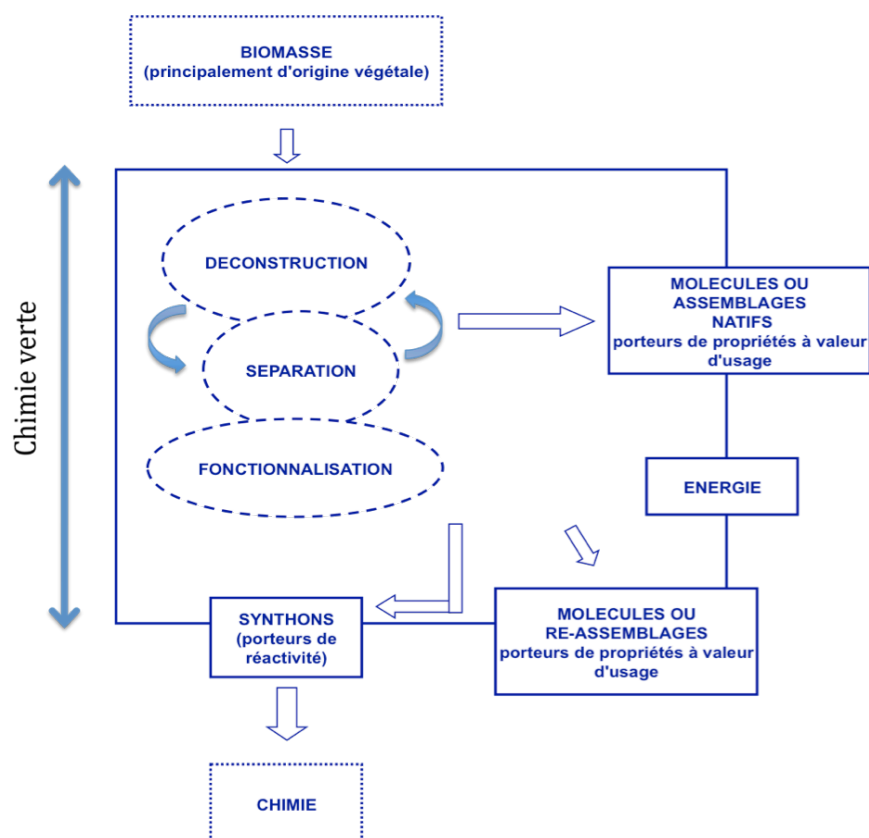


Figure 20 : Représentation schématique de la bioraffinerie

Ce schéma comporte trois groupes d'opérations unitaires définies de la façon suivante :

- Déconstruction ou déstructuration: correspond à une dissociation physique des polymères (ex des fibres) ou à la rupture des structures chimiques. La déconstruction peut être analysée à différentes échelles du végétal : les organes, les tissus ou les molécules.
- Séparation : Action permettant de trier les entités constitutives d'un mélange.
- Fonctionnalisation (y compris pour la notion d'« assemblage ») : consiste à modifier une molécule ou un assemblage pour lui conférer des propriétés à valeur d'usage .

L'entrée correspond à de la biomasse généralement d'origine végétale soit sous forme de plante entière, soit en tant que co-produits, notamment issus de la transformation de la matière première pour l'alimentaire ; l'intérêt de ce couplage est de prendre en compte les quantités parfois importantes non valorisées à ce jour dans le domaine alimentaire, et éviter d'occuper des surfaces importantes pour seulement le non alimentaire. Les sorties sont (i) des molécules (simples, polymères ou complexes) ou

des assemblages plus ou moins natifs, à valeur d'usage, ou (ii) des synthons porteurs de réactivité (doubles liaisons, électrons délocalisés, etc...). Ces sorties représentent soit de la substitution de production, soit du développement de nouveaux produits pour de nouvelles fonctionnalités. Dans les deux cas, pour aboutir à un réel intérêt économique, il faut (i) obtenir un produit à forte valeur ajoutée si son volume de vente est faible, ou bien (ii) obtenir un produit à faible marge sur un marché de volume important (éthanol, lysine, etc.).

Les frontières proposées pour la bioraffinerie sont représentées sur la figure 20 en traits pleins. Bien qu'elles incluent des interfaces structurées avec des acteurs « utilisateurs » (chimistes pour les synthons, et au cas par cas – cosmétique, pharmacie, producteurs d'additifs, formulateurs – selon les propriétés considérées), la bioraffinerie ne recouvre pas ces différents métiers. En terme industriel, les sous-ensembles constituant une bioraffinerie peuvent être disjoints et/ou opérés par des entités différentes, mais ils sont généralement regroupés géographiquement (notion d'écologie industrielle).

Par le biais de ses revendications de valeur environnementale positive, la notion de bioraffinerie fait appel au concept de « green chemistry », dans son sens « chimie propre et sobre » théorisé par les règles d'Anastas et Warner<sup>594</sup>.

#### 5.4.1.2. Autres définitions de la bioraffinerie

Selon les conclusions récentes (mars 2009) de deux projets européens ayant pour objectif de dresser un état des lieux sur les bioraffineries, il existerait 4 à 5 types de bioraffineries, qui répondraient aux définitions génériques suivantes :

- Pour Biorefinery Euroview : « Biorefineries are integrated bio-based industries, using a variety of different technologies to produce chemicals, biofuels, food and feed ingredients, biomaterials (including fibers) and power from biomass raw materials »
- Pour Biopol : « Biorefinery is the sustainable processing of biomass into spectrum of marketable products and energy ».

En synthèse, les deux projets ont retenu la définition suivante : « Biorefineries are integrated bio-based industries, using a variety of different technologies to make products such as chemicals, biofuels, food and feed ingredients, biomaterials (including fibers) and heat and power, aiming at maximising the added value along the three pillars of sustainability (Environnement, Economy and Society) ». De façon surprenante, dans cette dernière définition, ne figure plus formellement la notion de biomasse, présente dans les deux définitions précédentes.

Les différents types de bioraffineries à considérer portés par Biorefinery Euroview et Biopol sont résumés dans le tableau 51.

Tableau 51 : Eléments de différenciation des concepts de bioraffineries.

Biorefinery Euroview	Biopol
Cereal Biorefinery / dry grains	Whole Crop Biorefinery (WC-BR) / dry mill
Green Biorefinery / wet biomass	Green Biorefinery (G-BR) / wet biomass
Forest-based and Lignocellulosic Biorefinery	Lignocellulose Feedstock Biorefinery (LCF-BR)
Oilseed Biorefinery (with an option using waste oil)	
Waste Biorefinery / organic wastes, manure,...	

<sup>594</sup> Anastas P.T., Warner J.C. 1998. Green chemistry theory and practice. Oxford University Press, Oxford, 135 p.

Les différents types de bioraffineries pourraient s'intégrer suivant le schéma de la figure 21.

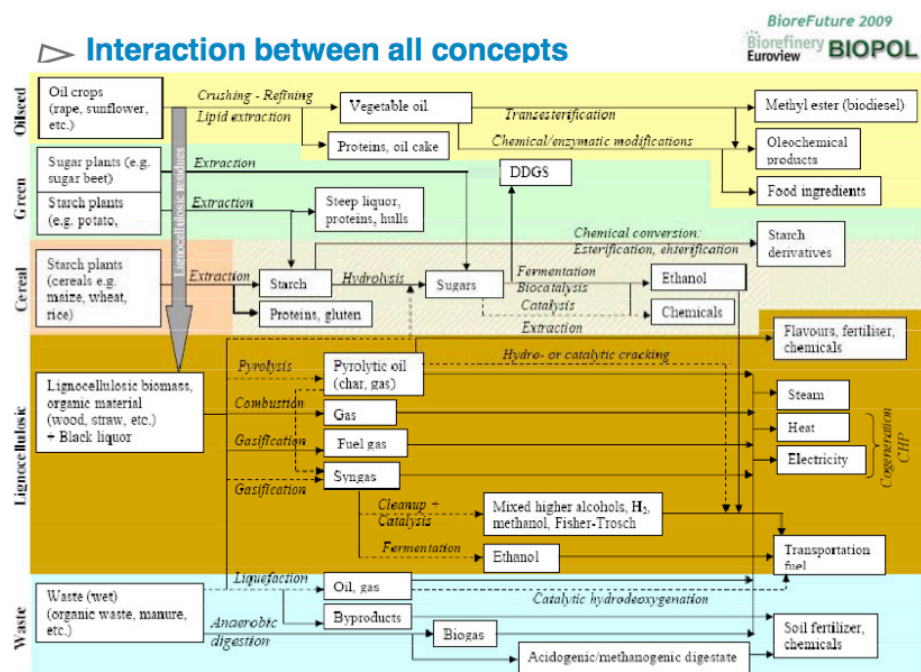


Figure 21 : Interactions entre les différents types de bioraffineries

Ces travaux montrent aussi qu'il existe principalement deux modèles industriels de bioraffinerie :

- Celui basé sur des matières premières d'importation, sur le modèle du port de Gand
- Celui basé sur une utilisation optimisée des ressources locales directes (matières premières agricoles) et intermédiaires (échanges entre usines proches selon le concept d'écologie industrielle), sur le modèle de la zone agro-industrielle de Reims-Bazancourt.

Dans les deux cas de figures, des fractions d'origine biologique sont mises en œuvre, avec trois termes, déchets, sous-produits et co-produits. Il existe évidemment une continuité de nature économique entre ces trois classes. D'ailleurs, un co-produit peut être un « ex-sous-produit », pour lequel une valorisation a été trouvée. Par exemple, selon le cas, la pulpe de betterave pourra être considérée comme un sous-produit ou comme un co-produit.

Un des principes des bioraffineries est d'appréhender de façon similaire le produit principal et les co-produits, de minimiser le nombre de sous-produits, et de réduire au maximum la quantité de déchets.

### 5.4.1.3 Caractéristiques liées à la matière première biologique

Certaines des caractéristiques des matières premières végétales (et animales) impactent directement le concept de bioraffinerie. Sans entrer dans le détail, et en excluant volontairement les différences qui sont traitées dans les autres tâches de l'ARP Vêga (par exemple les caractéristiques de composition), on peut mentionner :

- La diversité des sous-éléments disponibles à partir d'une plante entière ou d'un sous-élément de cette plante (imbrication des structures) et la possibilité de piloter, notamment *via* la génétique, la conduite des cultures ou les différences inter-espèces, les répartitions / compositions / interactions de ses sous-éléments.

- La compatibilité entre ces structures, créées par des processus biologiques et des procédés de transformation biologique ; on peut en déduire que la plupart des molécules (ou structures) présentes dans les végétaux seront bio-compatibles.
- L'hétérogénéité d'un constituant ou d'un sous-élément (par exemple les 3 types de lignines ou les différentes protéines d'une couche structurale), qui est en général déterminée par la programmation génétique, à la différence de la variabilité mentionnée ci-après.
- La variabilité de la composition et/ou des propriétés dans le temps et dans l'espace de la matière première, notamment en fonction des conditions de milieu ou de culture.
- L'évolutivité par rapport aux phases de stockage, et dans une moindre mesure par rapport aux opérations de récolte, durant lesquelles des transformations microbiennes, enzymatiques ou structurales (maturation) peuvent avoir [ont] lieu.

Parmi ces caractéristiques les deux premières sont intrinsèquement positives, la troisième introduit une complexité « déterministe » dans les schémas de valorisation, la quatrième est négative du point de vue de l'industriel, et la cinquième est une zone d'optimisation qui bien que correspondant à des situations réelles (par exemple séchage du bois, rouissage du lin, ensilage du maïs à biogaz, etc...) est actuellement très peu travaillée.

Les notions de diversité, d'hétérogénéité, et de variabilité, toutes trois définies ci-dessus, reflètent la capacité d'adaptation des systèmes biologiques par rapport aux milieux dans lesquels ils se développent, mais ne doivent pas être confondues.

La diversité génétique est un atout qui permet d'adapter la plante à son contexte environnemental (conditions pédo-climatiques, résistance aux maladies, etc...) et/ou à son contexte d'utilisation (maïs waxy ayant des propriétés particulières, blé dur vs blé tendre, etc...). Les conduites de culture, bien maîtrisées et adaptées au matériel génétique et au milieu, contribuent à l'adaptation du produit à son contexte d'utilisation.

L'hétérogénéité à l'intérieur d'un sous-ensemble d'une plante (3 types de lignines, 2 molécules d'amidon, x protéines dans une sous-couche d'aleurone, etc...) est un facteur de complexité vis-à-vis des utilisations industrielles de ce sous-ensemble que la génétique devrait s'efforcer de réduire.

Une fois que « la ligne de base » est fixée parmi les diverses options proposées par la diversité génétique suite au choix d'une espèce et d'une variété, la variabilité décrit les oscillations par rapport à cette ligne de base. La variabilité est un défaut car elle est préjudiciable au rendement global des procédés de transformations. En effet, le produit final doit avoir une qualité constante, dans une fourchette d'autant plus resserrée que son usage sera plus technique, donc la variabilité de la matière première entraîne des réglages et ajustements fréquents du procédé qui conduisent celui-ci à fonctionner de manière non optimale.

#### **5.4.1.4 Complexité des voies de valorisation possibles**

Les figures 20 et 21 ci-dessous, issues de divers documents et regroupées à titre d'exemple, sont représentatifs de la complexité des flux et des interactions inhérents au concept de bioraffinerie. La question est de savoir, dans le champ des possibles qu'ils représentent, quelles sont les zones les mieux (ou les moins bien) décrites, où sont les voies les plus probables, où sont les questions prioritaires, quels sont les verrous génériques, etc...

Il est probable que la réponse à cette question passe par des représentations plus structurées et multidimensionnelles (croisant des aspects techniques, bibliographiques, économiques, de stratégie

industrielle, etc...). Divers outils informatiques de représentations et de structurations des connaissances pourraient être utilisés pour générer et manipuler ces réseaux complexes.

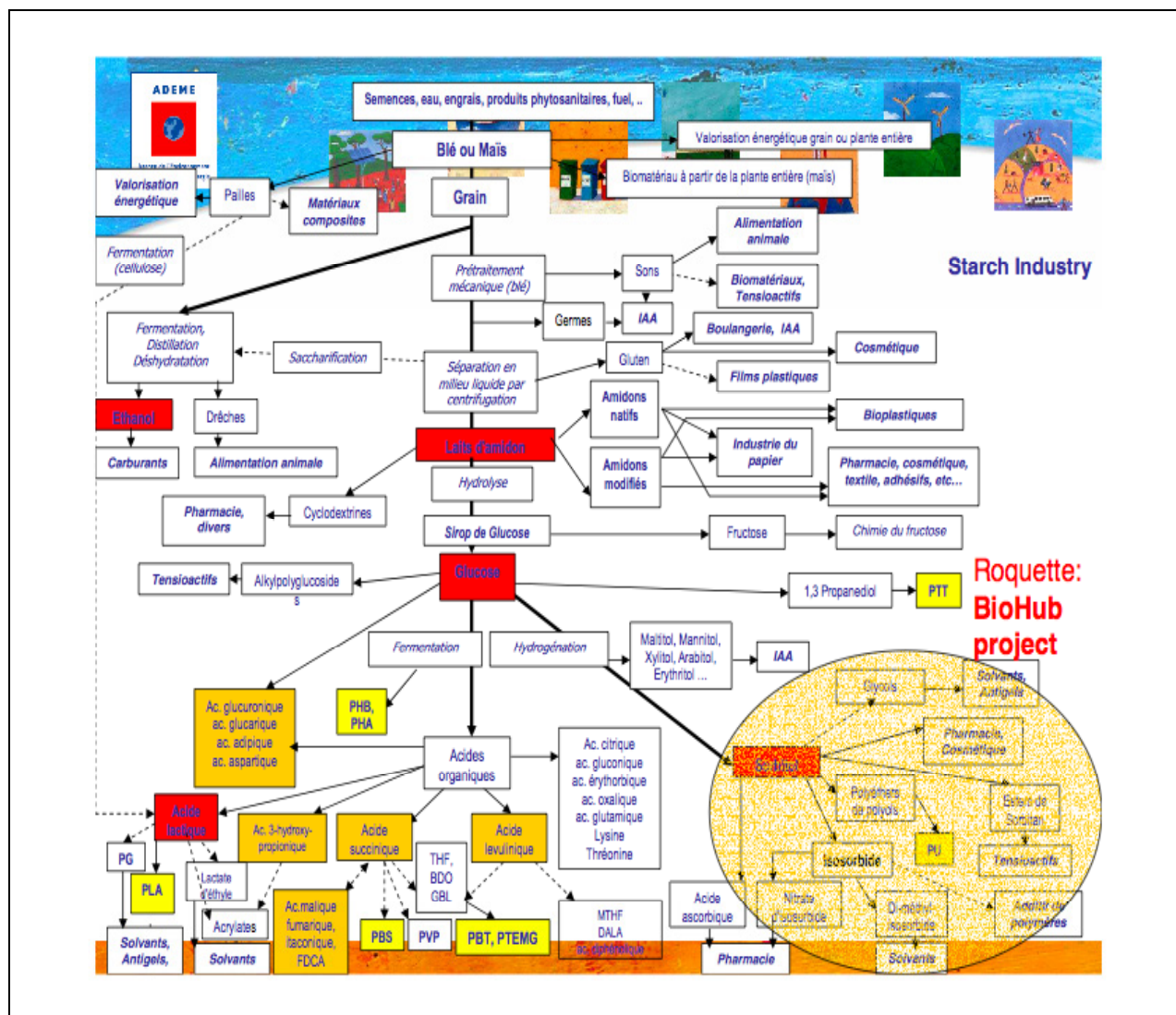


Figure 22 : Représentation schématique d'une bioraffinerie à partir de céréales (source Roquette)

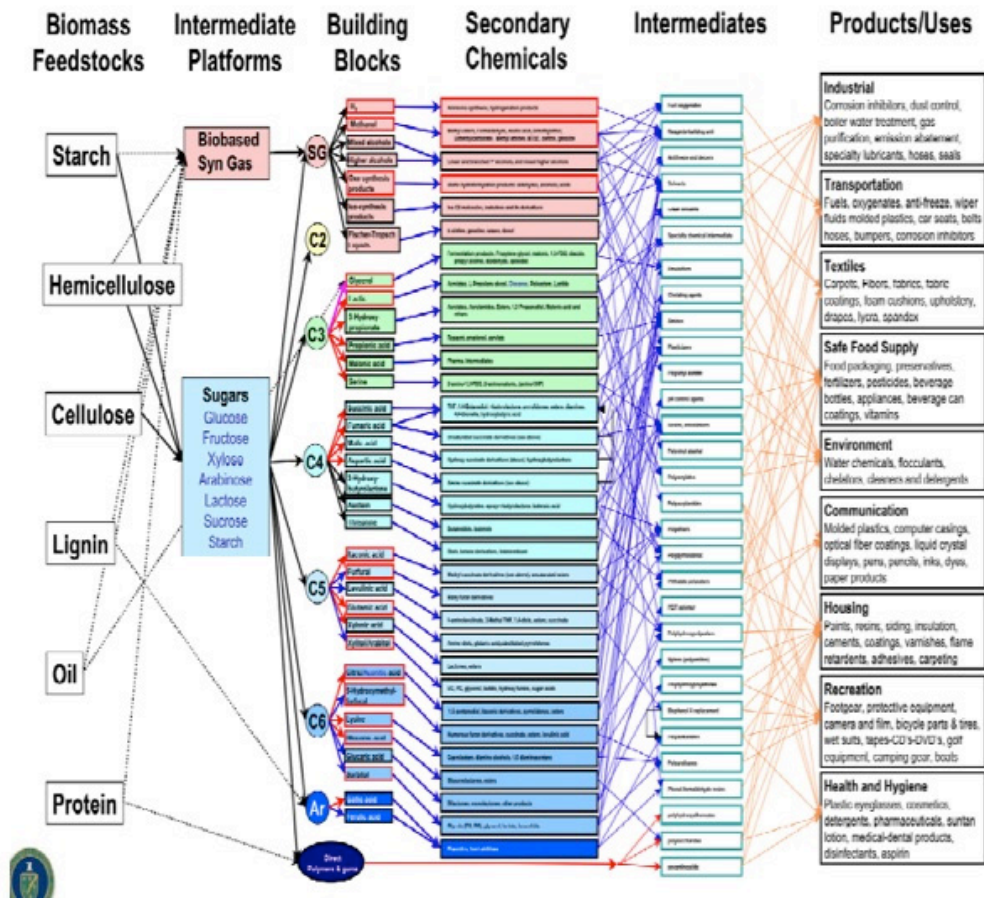


Figure 23 : Complexité des flux et interactions au sein d'une bioraffinerie

## 5.4.2. les opérations unitaires de la bioraffinerie et leurs contraintes

Dans cette partie, les différentes opérations unitaires de la bioraffinerie sont présentées, en mettant l'accent sur les contraintes qu'elles imposent aux matières premières végétales. Les verrous et les questions de recherches qui en résultent ont pour objet d'adapter les caractéristiques des matières premières végétales à ces opérations unitaires.

### 5.4.2.1. Généralités

Les étapes de transformation à mettre en œuvre en bioraffinerie s'appuient sur la diversité des technologies existantes et peuvent être classées en deux ensembles (en fonction de leur effet sur la matière).

Les transformations physiques :

- mécaniques (réduction de taille, rupture de parois cellulaires)
- séparation / solide divisé (densité, taille)
- séparation / milieux polyphasiques
  - liquide-solide, liquide-liquide, filtration frontale et technologies membranaires, centrifugation
  - liquide-vapeur, distillation, pervaporation
- extraction par pression, solubilisation

Les transformations chimiques (et biochimiques) :

- simple rupture de liaisons entre unités de base : hydrolyse, alcoolyse (méthanolyse)
- introduction d'une fonction organique : par exemple redox (introduction d'un atome d'oxygène, hydrogénation)
- transformation complexe : fermentation, thermolyse.

Chaque étape de transformation physique ou chimique peut exercer soit un seul effet (déconstruction / fractionnement / fonctionnalisation), soit deux, voire les trois effets en même temps. Dans cette analyse les processus biologiques ne se distinguent pas nécessairement des autres types de transformations définis ci-dessus, les premiers pouvant comme les autres exercer un effet aussi bien sur la déconstruction que sur la fonctionnalisation (cf tableau 1).



Tableau 52 : Action sur la biomasse des étapes de transformation applicables en bioraffinerie végétale

TRAITEMENT		ACTION EN BIORAFFINAGE		
		DESTRUC- TURATION	SEPARATION	FONCTIONNA LISATION
PHYSIQUE	Mécanique / broyage Ultrasons, champs électriques pulsés	X		X
	Densité, flottation Centrifugation		X	X
	Filtration / MF, UF, NF électrochimique		X	X
	Dissolution		X	
	Précipitation		X	X
	Déshydratation	X	X	X
	Distillation		X	X
	Hydratation	X		X
	Pression	X	X	X
	Extrusion	X	X	X
Détente	X	X	X	
CHIMIQUE	Hydrolyse , alcoolyse	X		X
	Thermolyse	X	X	X
	Redox	X		X
BIOLOGIQUE	Catalyse enzymatique	X		X
	Procédés fermentaires	X	« X »	X

Ces différentes étapes de transformation imposent des limitations qui doivent être repoussées ou contournées, constituant autant de verrous vis-à-vis de l'optimisation de la bioraffinerie.

De nombreux produits d'origine végétale sont d'ores et déjà disponibles sur le marché non alimentaire. Ils regroupent principalement des dérivés de sucres et d'amidon (alcools, acides), des huiles et dérivés (glycérine, acides gras et alcools et aminés dérivés, acides-dimères,...), des gommes et dérivés du bois (résines, lignosulfonates,...) ainsi que des dérivés de celluloses et de fibres (viscose, cellulose acétate,...). Le développement de bioraffineries reposant sur l'utilisation des plantes entières devrait permettre d'élargir le panel de molécules issues du végétal mises sur le marché. Dans ce contexte, diverses étapes de déconstruction / séparation / fonctionnalisation de la biomasse végétale sont nécessaires afin d'obtenir des produits pouvant substituer les molécules issues de la raffinerie pétrolière et de la pétrochimie. Un enjeu pour le développement des bioraffineries est également de permettre l'émergence de nouvelles propriétés fonctionnelles à l'origine de nouvelles applications et donc de nouveaux marchés.

#### 5.4.2.2. Déconstruction / fractionnement de la biomasse

Cette étape est une étape critique, et aujourd'hui mal optimisée (sauf dans quelques cas, comme la production de pâte à papier), des procédés de bioraffineries. C'est pourquoi nous avons choisi de présenter en détail l'état de l'art, en distinguant plusieurs grandes catégories : procédés en voie sèche, procédés en voie humide, transformation en gaz de synthèse (syngaz).

#### 5.4.2.2.1 Etat de l'art – Procédés voie sèche et voie humide

La mise en œuvre de la biomasse ligno-cellulosique dans les bioraffineries nécessite des pré-traitements dont le broyage constitue très généralement la première étape, en premier lieu pour des raisons de manipulation et de transport. Les opérations de broyage permettent de réduire la taille des particules, de modifier leur forme, d'augmenter la densité apparente du produit, d'améliorer ses propriétés d'écoulement, d'augmenter la surface de réaction et la porosité<sup>595,596,597</sup>.

Dans les schémas de bio-raffinage actuels, un broyage grossier est en général appliqué, suivi d'une opération de déstructuration hydrothermique et/ou chimique (explosion à la vapeur, aux bases, aux acides,..., procédés AFEX, organosolv,...)<sup>598,599</sup>. La matière récupérée est très hétérogène mais présente une bonne accessibilité de la cellulose. En revanche, les hémicelluloses sont souvent dégradées, des inhibiteurs enzymatiques peuvent être générés et les lignines sont modifiées.

Dans une perspective d'exploitation durable de la biomasse, la valorisation de la plante entière sera le mot d'ordre. Les avantages d'un fractionnement sec sont l'économie d'eau, l'absence d'effluents et de séchage, la préservation des structures natives et l'augmentation de réactivité des particules. En revanche, les procédés de fractionnement par voie sèche sont connus pour être gourmands en énergie<sup>600,601</sup>. Ainsi on considère que la réduction granulométrique de la matière première consomme plus du tiers de l'énergie nécessaire à la conversion en bioéthanol<sup>601</sup>. De même, pour l'obtention d'une granulométrie identique, la dépense énergétique est 70 % plus importante par broyage que par explosion à la vapeur<sup>602</sup>. Ces données concernent des tailles de particules supérieures à 0,1 mm qui sont couramment utilisées dans les bio-raffineries pour pouvoir mettre en œuvre efficacement des procédés liquides ultérieurs incompatibles avec les très fines particules.

Le coût énergétique du broyage croît fortement avec la diminution de taille des particules<sup>603,604</sup> (Himmel et al, 1985 ; Mani et al, 2004) ce qui semble condamner le broyage ultra-fin, mais avec cependant une large variabilité qui dépend du mode de sollicitation (type de broyeur), de la matière première et des conditions opératoires (teneur en eau, température, prétraitements,...)<sup>599,601</sup>. Les progrès réalisés dans

---

<sup>595</sup> Schell D.J., Hardwood C. 1994. Milling of lignocellulosic biomass : results of pilot scale testing. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 45/46, 159-168.

<sup>596</sup> Chau C-F., Wen Y-L., Wang Y-T. 2006. Effects of micronisation on the characteristics and physicochemical properties of insoluble fibres. *J. Sci. Food Agric.* 86, 2380-2386.

<sup>597</sup> Zhu J.Y., Wang G.S., Pan X.J., Gleisner R. 2009. Specific surface to evaluate the efficiencies of milling and pre-treatment of wood for enzymatic saccharification. *Chemical Engineering Science*, 64 474-485

<sup>598</sup> Sun Y., Cheng J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production : a review. *Bioresource Technology* 83, 1-11.

<sup>599</sup> Mosier N., Wyman C., Dale B., Elander R., Lee Y.Y., Holtzapple M., Ladisch M. 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 96, 673-686.

<sup>600</sup> Bitra V.S.P., Womac A., Chevanan N., Miu P., Igathinathane C., Sokhansanj S., Smith D.R. 2009. Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass, wheat straw and corn stover and analysis of their particle size. *Powder Technology*, 193, 32-45

<sup>601</sup> Kumar P., Barrett D. M., Delwiche M. J., Stroeve P. 2009. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 3713-3729.

<sup>602</sup> Holtzapple M.T., Humphrey A.E., Taylor J.D. 1989. Energy requirements for the size reduction of poplar and aspen wood. *Biotechnol. Bioeng.* 33, 307-210.

<sup>603</sup> Himmel M., Tucker M., Baker J., Rivard C., Oh K., Grohmann. 1985. Comminution of biomass : hammer and knife mills. *Biotechnol. Bioeng. Symposium*, vol 15, pp39-58

<sup>604</sup> Mani, S., Tabil L.G., Sokhansanj, S. 2004. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass Bioenergy* 27 (4), 339-352.

les procédés de fractionnement par voie sèche à l'échelle ultra-fine<sup>605</sup> montrent qu'il peut néanmoins y avoir un intérêt certain à fractionner ainsi les ligno-celluloses pour obtenir des fractions concentrées en divers agro-polymères (principalement cellulose, hémicelluloses, lignines) et en d'autres constituants du végétal (silice, pigments, phénols, lipides,...) qui pourront ensuite entrer dans les différentes voies de conversions ou d'utilisations. La réduction granulométrique vers des tailles voisines ou inférieures à dix micromètres permet d'augmenter considérablement la surface de réaction des particules et les phénomènes de diffusion ; des pré-traitements chimiques et physiques peuvent être appliqués pour fragiliser les structures clés<sup>606,607</sup> ou même fonctionnaliser les particules en cours de broyage (le broyeur étant alors vu comme un réacteur).

Le tri des particules en fonction de leur composition en agropolymères pourra se faire par la combinaison des techniques de tris dimensionnel, aérodynamique et électrostatique<sup>608</sup>. De tels travaux pourraient permettre de préciser les relations structure / propriétés mécaniques / fractionnabilité / réactivité des matériaux issus de la biomasse ligno-cellulosique et orienter les fractions obtenues vers les voies de transformation les mieux adaptées.

La compétitivité du fractionnement par voie sèche vis-à-vis d'autres technologies de pré-traitements de la biomasse (par ex. explosion) devra être appréciée non pas sous le seul angle de la consommation énergétique spécifique du broyage et de la séparation des particules, mais de manière beaucoup plus globale dans une analyse de type ACV qui prendrait en compte l'ensemble des coûts, avantages et inconvénients, depuis le champ ou la forêt jusqu'à la molécule (de glucose dans le cas du bio-éthanol, la suite du process étant générique), incluant la possibilité d'un pré-traitement à proximité du lieu de production, les gains de transport d'une matière densifiée, la valorisation potentielle de l'ensemble des constituants, l'absence d'inhibiteurs pour les bioprocédés ultérieurs, l'économie d'eau, l'absence de réactifs chimiques et de polluants etc...

Les procédés de déconstruction (ou prétraitements) en voie humide ont été largement étudiés en recherche pour la production d'éthanol à partir de la biomasse lignocellulosique (bioéthanol de deuxième génération). Plusieurs synthèses bibliographiques peuvent être citées<sup>608,609,610,611,612,613</sup>. Taherzadeh et Karimi<sup>614</sup> ont publié une revue bibliographique sur les prétraitements des déchets lignocellulosiques pour améliorer la production de bioéthanol et de biogaz mais il ressort que les prétraitements des résidus

---

<sup>605</sup> Hemery Y., Rouau X., Lullien-Pellerin V., Barron C., Abecassis J. 2007. Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality. *J. Cereal Sci.* 46, 327-347.

<sup>606</sup> Mani, S., Tabil L.G., Sokhansanj, S. 2004. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass Bioenergy* 27 (4), 339-352.

<sup>607</sup> Hemery Y., Rouau X., Lullien-Pellerin V., Barron C., Abecassis J. 2007. Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality. *J. Cereal Sci.* 46, 327-347.

<sup>608</sup> Kumar P., Barrett D. M., Delwiche M. J., Stroeve P. 2009. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 3713-3729.

<sup>609</sup> Didden I ; Destain, J ; Thonart, P, Le bioéthanol de seconde génération : la production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique, Les presses agronomiques de Gembloux, 2009, 128 p.

<sup>610</sup> Galbe, M. and G. Zacchi (2002). A review of the production of ethanol from softwood. *Applied Microbiology and Biotechnology* 59(6): 618-628.

<sup>611</sup> Galbe, M. and G. Zacchi (2007). Pretreatment of lignocellulosic materials for efficient bioethanol production. *Biofuels*. Berlin, SPRINGER-VERLAG BERLIN. 108: 41-65.

<sup>612</sup> Demirbas (2005). Bioethanol from cellulosic materials: A renewable motor fuel from biomass. *Energy Sources* 27(4): 327-337.

<sup>613</sup> Sun Y., Cheng J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production : a review. *Bioresource Technology* 83, 1-11.

<sup>614</sup> Taherzadeh, M.J., Karimi K. 2008. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(9): p. 1621-1651

lignocellulosiques ont été essentiellement couplés à la production de bioéthanol ou à l'hydrolyse enzymatique de la cellulose ; le couplage des prétraitements avec la production de biogaz a quant à lui été largement appliqué aux boues d'épuration mais très peu à la biomasse lignocellulosique<sup>615</sup>.

Les prétraitements sont généralement classés en procédés physico-chimiques et procédés biologiques.

- Procédés physico-chimiques :

- L'explosion à la vapeur est un des procédés les plus couramment utilisés<sup>616</sup>. La biomasse est traitée avec de la vapeur saturée à des températures comprises entre 160°C et 240°C, correspondant à des pressions comprises entre 6 et 34 bars. La pression est ensuite subitement réduite. Ce procédé entraîne la dégradation et la solubilisation de l'hémicellulose et la transformation de la lignine augmentant ainsi le potentiel d'hydrolyse de la cellulose. Le traitement à la vapeur peut être amélioré par l'utilisation d'un catalyseur acide tel que H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ou SO<sub>2</sub><sup>617</sup>.

- L'hydrothermolyse (ou liquid hot-water treatment, LHW), consiste en un traitement en solution aqueuse à haute température. Cette méthode est similaire au traitement à la vapeur, mais des températures et des concentrations en matières sèches plus faibles sont utilisées. Ainsi plus de poly- et oligosaccharides sont récupérés<sup>618,619</sup>.

- Les prétraitements à l'acide, qui sont généralement opérés en milieu acide dilué (par exemple l'acide sulfurique à des concentrations généralement inférieures à 4 % massique), à des températures comprises entre 140 et 200°C et pendant quelques minutes à une heure<sup>620,621</sup>. Les hémicelluloses sont hydrolysées et la majeure partie se retrouve sous forme de monomères. Des composés toxiques peuvent être détectés dans les hydrolysats (eg., furfural, hydroxyméthyl furfural)<sup>622,623</sup>. Les prétraitements à l'acide concentré (30 à 70 %) et des températures plus faibles (inférieures à 100°C) ont été testés mais les problèmes de corrosion rendent le prix du procédé prohibitif<sup>624</sup>.

- Les prétraitements alcalins, qui utilisent de la soude, de la chaux, de l'ammoniaque<sup>625</sup>. Ils provoquent la rupture des liaisons entre la lignine et les polysaccharides et le gonflement des pores de la biomasse. La majeure fraction de la lignine est solubilisée avec une partie des hémicelluloses. Le principal mécanisme étant la délignification, ces procédés sont plus efficaces sur les résidus agricoles

<sup>615</sup> Carrère, H. 2008. Co-traitements physico-chimiques. Chapitre 11. In La méthanisation, R. Moletta (ed.), Editions Tec & Doc Lavoisier. 251-300.

<sup>616</sup> Varga, E.; Reczey, K.; Zacchi, G. 2004. Optimization of steam pretreatment of corn stover to enhance enzymatic digestibility. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 113, 509-523.

<sup>617</sup> Brownell HH, Yu EKC, Saddler JN (1985) Steam-explosion pretreatment of wood: Effect of chip size, acid, moisture content and pressure drop, *Biotechnology Bioengineering* 28:792-801.

<sup>618</sup> Bouchard J, Nguyen TS, Chornet E, Overend RP (1989) Analytical methodology for biomass pretreatment. Part 2: Characterization of the filtrates and cumulative product distribution as a function of treatment severity, *Bioresource Technology* 36:121-131

<sup>619</sup> Griebel A, Lange T, Weber H, Milacher W, Sixta H (2006) Xylo-oligosaccharide (XOS) formation through hydrothermolysis of xylan derived from viscose process *Macromolecular Symposia* 232:107-120

<sup>620</sup> Talebnia, F.; Bafrani, M.P.; Lundin, M.; Taherzadeh, M.J. 2008. Optimization study of citrus wastes saccharification by dilute acid hydrolysis. *BioResources*, 3, 108-122.

<sup>621</sup> Saha, B.C., Iten, L.B., Cotta, M.A., Wu, Y.V. 2005. Dilute acid pretreatment, enzymatic saccharification, and fermentation of rice hulls to ethanol. *Biotechnol. Progr.*, 21, 816-822.

<sup>622</sup> Palmqvist E, Hahn-Hägerdal B (2000) Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: inhibitors and mechanisms of inhibition, *Bioresource Technology* 74:25-33

<sup>623</sup> Larsson S, Palmqvist E, Hahn-Hägerdal B (1999) The generation of fermentation inhibitors during dilute acid hydrolysis of softwood *Enzymatic Microbiology Technology* 24:151-159

<sup>624</sup> Didden I ; Destain, J ; Thonart, P, Le bioéthanol de seconde génération : la production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique, Les presses agronomiques de Gembloux, 2009, 128 p.

<sup>625</sup> Kassim, E.A.; El-Shahed, A.S. 1986, Enzymatic and chemical hydrolysis of certain cellulosic materials. *Agr. Wastes* 17, 229-233

ou sur les cultures herbacées que sur le bois<sup>626</sup>. Les prétraitements utilisant la chaux sont particulièrement adaptés aux résidus agricoles (eg. la paille de blé ou les bois durs tels que le peuplier<sup>627,628</sup>. L' ammoniacque (10-15 % massique) peut également être utilisé en percolation sur la biomasse à température élevée (150-170°C) et est ensuite recyclé, il s'agit du procédé ARP (ammonia recycle percolation)<sup>629</sup>. Le procédé AFEX (Ammonia fibre explosion) est opéré à pression élevée (> 3 MPa) et température modérée (< 100°C)<sup>630,631</sup>. Les hémicelluloses sont dégradées en oligomères et sont déacétylées<sup>632</sup>, mais seule une petite fraction des solides est solubilisée (la lignine et les hémicelluloses ne sont quasiment pas solubilisées). Cependant la structure de la biomasse est modifiée, résultant en une plus grande capacité de rétention d'eau<sup>633, 634</sup>.

- Le prétraitement au peroxyde d'hydrogène alcalin conduit à la délignification de la biomasse, au gonflement des pores et à la réduction de la cristallinité de la cellulose<sup>635, 636</sup>. L'absence de furfural ou d'hydroxyméthyl furfural a été soulignée par Saha et Cotta<sup>638</sup>.

- L'oxydation en voie humide implique le traitement de la biomasse en milieu aqueux avec de l'air ou de l'oxygène à des températures supérieures à 120°C<sup>637</sup>. Le procédé est exothermique et devient autosuffisant du point de vue de la chaleur une fois la réaction amorcée<sup>638</sup>. Les hémicelluloses sont clivées en monomères, la lignine est clivée et oxydée et la cellulose est partiellement dégradée<sup>639</sup>.

- L'ozonation permet de dégrader la lignine et une part de l'hémicellulose sans produire de composés inhibiteurs, résultant en l'augmentation de la digestibilité de résidus lignocellulosiques<sup>640</sup>.

- L'explosion au CO<sub>2</sub> supercritique en présence d'eau a permis d'améliorer la digestibilité enzymatique de bois doux et durs<sup>641, 642</sup>. La délignification peut être améliorée par l'utilisation de cosolvants (éthanol-eau ou acide acétique-eau)<sup>643</sup>.

---

<sup>626</sup> Galbe, M. and G. Zacchi (2007). Pretreatment of lignocellulosic materials for efficient bioethanol production. *Biofuels*. Berlin, Springer-Verlag Berlin 108: 41-65.

<sup>627</sup> Sierra, R., Granda, C., Holtzapfle, M.T. 2009. *Biotechnology Progress* 25(2):323-332.

<sup>628</sup> Chang, V.S., Nagwani, M., Kim, C.H. et al. 2001. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 94(1) :1-26.

<sup>629</sup> Lyer, P.V., Wu, Z.W., Kim, S.B. et al. 1996. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 57(8):121-132.

<sup>630</sup> Holtzapfle, M.T., Lundeen, J.E., Sturgis, R. et al. 1992. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 34(5):5-21.

<sup>631</sup> Teymouri, F., Laureano-Perea, L. Alizadeh, H. et al. *Bioresource Technology* 96(18):2014-2018.

<sup>632</sup> Gollapalli, L.E., Dale, B.E., Rivers, D.M. 2002. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 98:23-35.

<sup>633</sup> Hsu, T.A., Himmel, M., Schell, D. et al. 2002. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 57(8):3-18.

<sup>634</sup> Belkacemi, K. Turcotte, G., de Halleux, D. et al. 1998. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 70(2):441-462.

<sup>635</sup> Mishima, D.; Tateda, M.; Ike, M.; Fujita, M. Comparative study on chemical pretreatments to accelerate enzymatic hydrolysis of aquatic macrophyte biomass used in water purification processes. *Bioresource Technol.* 2006, 97, 2166-2172

<sup>636</sup> Saha, B.C.; Cotta, M.A. 2007. Enzymatic saccharification and fermentation of alkaline peroxide pretreated rice hulls to ethanol. *Enzyme Microb. Tech.*, 41, 528-532

<sup>637</sup> Varga, E.; Klinke, H.B.; Reczey, K.; Thomsen, A.B. 2004. High Solid Simultaneous Saccharification and Fermentation of Wet Oxidized Corn Stover to Ethanol. *Biotechnol. Bioeng.*, 88,567-574.

<sup>638</sup> Schmidt, A.; Thomsen, A. 1998. Optimization of wet oxidation pretreatment of wheat straw. *Bioresource Technol.*, 64, 139-151.

<sup>639</sup> Taherzadeh, M.J., Karimi K. 2008. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(9): p. 1621-1651

<sup>640</sup> Vidal, P.F.; Molinier, J. 1988. Ozonolysis of Lignin – Improvement of in vitro digestibility of poplar sawdust. *Biomass*, 16, 1-17

<sup>641</sup> Zheng, Y.; Lin, H.-M.; Wen, J.; Cao, N.; Yu, X.; Tsao, G.T. 1995. Supercritical carbon dioxide explosion as a pretreatment for cellulose hydrolysis. *Biotechnol. Lett.*, 17, 845-850.

<sup>642</sup> Kim, K.H.; Hong, J. 2001, Supercritical CO<sub>2</sub> pretreatment of lignocellulose enhances enzymatic cellulose hydrolysis. *Bioresource Technol.* 77, 139-144

<sup>643</sup> Pasquini, D.; Pimenta, M.T.B.; Ferreira, L.H.; Curvelo, A.A.d.S. Extraction of lignin from sugar cane bagasse and Pinus taeda wood chips using ethanol-water mixtures and carbon dioxide at high

- Dans le procédé Organosolv, la biomasse est chauffée (150-200°C) dans un mélange d'un solvant organique (alcools, esters, cétones, glycols, acides organiques, phénols, éthers) et d'eau<sup>641</sup>. Ce procédé permet la solubilisation de la lignine et d'une partie des hémicelluloses, laissant la cellulose dans la fraction solide. La lignine présente une pureté élevée après extraction de la phase organique<sup>644</sup>.

- Des prétraitements par des liquides ioniques ont été récemment mentionnés pour solubiliser la lignine<sup>645, 646</sup> ou pour améliorer la production de biohydrogène<sup>647</sup>.

- Procédés biologiques :

- Les procédés de prétraitements biologiques comprennent les prétraitements enzymatiques et les traitements par les microorganismes (« whole cell treatments »). Trois types d'enzymes sont impliqués dans les procédés de délignification : les laccases, les lignines-peroxydases et les manganèse-peroxydases<sup>648</sup>. Ces enzymes sont produites par des champignons (brown-, soft- et white-rot fungi)<sup>650, 649, 650</sup>. Le prétraitement par des white-rot fungi conduit à la dégradation sélective de la lignine et améliore l'hydrolyse enzymatique de la paille de riz<sup>651</sup>. De faibles besoins énergétiques, l'absence de réactifs chimiques et des conditions environnementales douces sont généralement reportées comme avantages de ces prétraitements. Toutefois les cinétiques sont très lentes<sup>652</sup>.

En résumé les prétraitements et procédés de déconstruction ont été principalement étudiés avec pour objectif l'hydrolyse enzymatique de la cellulose et la production de bioéthanol deuxième génération. Certains procédés notamment l'explosion à la vapeur et les prétraitements à l'acide dilué sont commercialisés ou en voie de l'être<sup>653</sup>. Les verrous mentionnés pour l'application bioéthanol sont :

- l'intégration de procédés de prétraitements avec les étapes en aval (hydrolyse enzymatique)
- le développement de procédés de prétraitements moins coûteux
- le développement de procédés de prétraitements en conditions plus douces pour limiter la production de composés inhibiteurs.

---

pressures. *J. Supercrit. Fluid.* 2005, 36, 31-39

<sup>644</sup> Pan, X.; Arato, C.; Gilkes, N.; Gregg, D.; Mabee, W.; Pye, K.; Xiao, Z.; Zhang, X.; Saddler, J. Biorefining of softwoods using ethanol organosolv pulping: Preliminary evaluation of process streams for manufacture of fuel-grade ethanol and co-products. *Biotechnol. Bioeng.* 2005, 90, 473-481.

<sup>645</sup> Pu, Y.Q., N. Jiang, and A.J. Ragauskas, Ionic liquid as a green solvent for lignin. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2007. 27(1): p. 23-33.

<sup>646</sup> Sun, N., Rahman, M., Qin, Y., Maxim, M. L., Rodriguez, H., Rogers, R. D., Complete dissolution and partial delignification of wood in the ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate. *Green Chemistry*, 2009. 11(5): p. 646-655

<sup>647</sup> Nguyen, T.A.D., Han, S. J., Kim, J. P., Kim, M. S., Oh, Y. K., Sim, S. J., Hydrogen production by the hyperthermophilic eubacterium, *Thermotoga neapolitana*, using cellulose pretreated by ionic liquid. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008. 33(19): p. 5161-5168.

<sup>648</sup> Kirk, T.K. and Farrell, R.L., (1987). Enzymatic combustion: the microbial degradation of lignin. *Ann. Rev. Microbiol.* 41: 465-505.

<sup>649</sup> Szklarz G.D., Antibus R.K., Sinsabaugh R.L. and Linkins A.E. (1989) Production of Phenol Oxidases and Peroxidases by Wood-Rotting Fungi *Mycologia*, 81, (2):234-240.

<sup>650</sup> Dey S., Maiti T.K. and Bhattacharyya B.C.. (1994) Production of some extracellular enzymes by a lignin peroxidase-producing brown rot fungus, *Polyporus ostreiformis*, and its comparative abilities for lignin degradation and dye decolorization. *Appl Environ Microbiol.* 60(11): 4216-4218.

<sup>651</sup> Taniguchi, M.; Suzuki, H.; Watanabe, D.; Sakai, K.; Hoshino, K.; Tanaka, T. 2005. Evaluation of pretreatment with *Pleurotus ostreatus* for enzymatic hydrolysis of rice straw. *J. Biosci. Bioeng.*, 100, 637-43.

Varga, E.; Reczey, K.; Zacchi, G. 2004. Optimization of steam pretreatment of corn stover to enhance enzymatic digestibility. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 113, 509-523.

<sup>652</sup> Taherzadeh, M.J., Karimi K. 2008. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(9): p. 1621-1651

<sup>653</sup> Galbe, M. and G. Zacchi (2007). Pretreatment of lignocellulosic materials for efficient bioethanol production. *Biofuels*. Berlin, SPRINGER-VERLAG BERLIN. 108: 41-65.

Un large champ d'investigation sur l'optimisation des procédés de prétraitement / déconstruction pour d'autres applications (autres biocarburants, matériaux, synthons) reste ouvert. De plus, les procédés en voie sèche et voie humide ne sont pas exclusifs l'un de l'autre, et pourraient être combinés de façon complémentaire.

#### **5.4.2.2 Etat de l'art – Transformation en gaz de synthèse**

Les caractéristiques de la biomasse rendent nécessaire des étapes de conditionnement et de prétraitement, qui ont pour objectif de transformer la ressource végétale en un matériau homogène et injectable dans un gazéifieur. Bien que des essais soient conduits pour injecter la biomasse brute simplement séchée et broyée, il s'agit, le plus souvent, de transformations thermique et mécanique qui conduisent soit à un mélange liquide/solide ou slurry, soit à un solide finement divisé. On distingue deux voies principales : la pyrolyse et la torréfaction.

##### ***Le pré-traitement par pyrolyse***

Sous l'action de la chaleur, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine subissent des craquages primaires, ruptures de liaisons carbone-carbone et carbone-oxygène, suivis de réactions secondaires de recombinaison. La pyrolyse, appelée aussi thermolyse, conduit ainsi à une décomposition partielle des produits carbonés de la biomasse en trois phases : solide (charbon), liquide (bio-huile) et gaz (principalement CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>). La distribution entre ces trois phases dépend principalement de la température, de la vitesse de chauffe et du temps de séjour.

L'application la plus connue de la pyrolyse est la fabrication du charbon de bois qui s'effectue avec des vitesses de chauffe faibles (< 50°C/min), une température de l'ordre de 350°C et des temps de séjour de plusieurs heures. Cette technologie, appelée aussi carbonisation, présente un intérêt puisqu'elle produit un solide qui pourrait, après broyage, être finement divisé pour être introduit dans un gazéifieur. Malheureusement, c'est une pyrolyse lente dont les rendements matières et énergétiques sont assez faibles.

D'un développement plus récent, la pyrolyse rapide produit majoritairement du liquide, ou bio-huile avec des quantités plus ou moins grandes de charbon et de gaz. Un tel liquide ou un mélange liquide / solide est, *a priori*, facilement transportable et injectable dans un gazéifieur. Les conditions requises pour maximiser leur production consistent à imposer de fortes densités de flux de chaleur à la biomasse et à limiter les réactions secondaires de craquage des vapeurs en phase gazeuse en minimisant leur température et leur temps de séjour.

A cause de la forte présence d'eau (de 20 à 50 %) et d'oxygène, les bio-huiles ont un pouvoir calorifique voisin de la biomasse, ~18 kJ/kg. Leur masse volumique, d'environ 1 200 kg/m<sup>3</sup>, est en revanche plus élevée que celle du bois, 600 kg/m<sup>3</sup> et surtout que celle de la paille. Elles contiennent plusieurs centaines de produits chimiques différents dans des proportions très variables, notamment des phénols, sucres, alcools, acides organiques et des composés aromatiques. Elles présentent la particularité de n'être complètement miscibles, ni avec l'eau, ni avec des hydrocarbures. Il faut noter que des recherches sont menées pour essayer de valoriser ces huiles par extraction de molécules d'intérêt ou par hydrogénation en vue d'en faire des carburants. Ces voies, même si elles sont séduisantes, paraissent difficiles à industrialiser à cause de la très grande variété chimique des composés présents ou des quantités importantes d'hydrogène nécessaire pour augmenter leur pouvoir calorifique.

### ***Le pré-traitement par torréfaction***

Le bois torréfié a fait l'objet de nombreux travaux depuis les années 80 pour des applications spécifiques. Tout d'abord envisagé comme substitut au charbon de bois, il est apparu que l'altération qui en résultait conférait aux bois ainsi traités, en particulier pour les espèces les moins nobles, une très bonne résistance aux attaques de champignons et de certains insectes. Ce traitement permet effectivement au matériau d'avoir une plus grande durabilité et donc une utilisation pertinente pour l'habitat, mais il lui confère également une moins bonne résistance mécanique. Cette particularité qui rend son broyage plus facile présente ainsi un intérêt pour obtenir un solide finement divisé adapté à certaines technologies de gazéification.

La torréfaction, appelée aussi « réification », peut être assimilée à un séchage ultime. Elle est caractérisée par une succession de réactions thermiques obtenues au cours de l'augmentation progressive de la température jusqu'à un palier final compris entre 240°C et 300°C. Le temps de séjour est de quelques minutes jusqu'à 1 heure, selon la température. A l'issue de l'opération, le bois doit être conservé sous atmosphère inerte jusqu'à son refroidissement à température ambiante. S'effectuant à des températures beaucoup plus basses, la torréfaction est donc un processus beaucoup moins exigeant en énergie que la pyrolyse.

### ***La gazéification***

La dégradation thermique et chimique de la biomasse conditionnée, solide ou liquide, s'effectue en plusieurs étapes qui sont fonction de la température. Même en absence d'agent oxydant, au delà de 600°C, la biomasse se décompose thermiquement, très majoritairement en gaz mais aussi en charbon de bois et en sels minéraux. En présence de vapeur d'eau ou d'oxygène, une oxydation plus ou moins complète du carbone en CO et en CO<sub>2</sub> est réalisée jusque vers 900 ou 1000°C. Même à ces températures, certains produits carbonés aromatiques, appelés goudrons, sont difficiles à oxyder. En l'absence de catalyseur, il faut porter ces produits aux environs de 1 200 ou 1 300°C pour les éliminer. Cette température est également favorable pour réaliser simultanément l'élimination du méthane.

Aucune technologie spécifique de gazéification de la biomasse n'est vraiment arrivée au stade industriel, surtout pour les fortes puissances. Les procédés commerciaux produisent du gaz de synthèse à partir de méthane, de charbon ou de pétrole. Dans certains cas, des appoints de déchets végétaux ou même animaux ont été gazéifiés (par exemple à Puertollano en Espagne) pour produire de l'énergie.

Les principaux débouchés prometteurs pour la gazéification de la biomasse sont la production d'électricité, la production de méthanal ou de DME et la production de carburants par synthèse Fischer-Tropsch. L'un des principaux problèmes est la trop haute concentration en goudrons dans le syngaz lorsqu'on opère à basse température dans le gazéifieur. Cela peut empêcher un bon fonctionnement des turbines à gaz et des moteurs ou désactiver les catalyseurs nécessaires pour les procédés de synthèse.

En présence de catalyseur, il est théoriquement possible d'éliminer les goudrons à des températures inférieures à 1 200°C. Dans les technologies en lit fluidisé et lit fluidisé circulant, un matériau caloporteur et souvent catalytique (olivine, dolomite,...) est mis en œuvre. La chaleur est apportée dans l'enceinte de gazéification elle-même ou dans un réacteur séparé où s'effectue la combustion. Les températures de gazéification sont comprises entre 700 et 900°C. Malheureusement, les performances actuelles des catalyseurs ne sont pas suffisantes pour éliminer les goudrons à des limites acceptables. En outre, au-delà de 900°C, des phénomènes d'agglomération du solide dus à la fusion des cendres posent d'importants problèmes de fonctionnement de ces technologies.



En l'absence de catalyseur, la destruction des goudrons n'est opérante que pour des températures dépassant 1 200-1 300°C. A ces températures, obtenues dans les technologies à flux entraîné, les cendres (métaux) sont en fusion ; elles doivent être récupérées en fond du gazéifieur. Une partie des cendres peut également être vaporisée et se retrouver dans le gaz de synthèse lui même.

#### 5.4.2.2.3 Principaux verrous identifiés

D'une manière générale, les verrous identifiés pour les procédés de déconstruction et fractionnement sont les suivants :

- la nécessité de développer un seul procédé qui accepte divers (tous ?) types de biomasse, l'adaptation à la nature de la biomasse pouvant se faire par le réglage de ses paramètres. Ce procédé serait alors résilient par rapport à la variabilité de la biomasse.
- les problèmes d'accessibilité des composés d'intérêt dans la biomasse (exemple : cellulose).
- les verrous économiques.

Des questions générales se posent au sujet du concept de raffinerie sèche au moins à trois niveaux : les bases d'une faisabilité technique (« améliorer la résolution du fractionnement sec »), la viabilité économique (« minimiser la dépense énergétique et d'investissement du fractionnement sec »), la compétitivité des applications (« amplifier la réactivité et la fonctionnalité des fractions sèches »).

Ces verrous peuvent se décliner en plusieurs questions pour traiter :

- les bases physico-chimiques et mécaniques de la dissociabilité et de la fragmentabilité de la biomasse : maille pertinente pour un fractionnement optimisé en fonction des hétérogénéités naturelles (échelles du fractionnement).
- les relations entre taille des particules et microstructure modifiée vs réactivité (enzyme, combustion) et extractabilité de composés d'intérêt ; rôle de la répartition des constituants au sein des particules (optimisation de la taille des particules : quel type de broyage ? pour quelle réactivité ?).
- les relations entre énergie de cohésion et énergie minimale utile pour la dissociation dans l'optique de concevoir une technologie de broyage économe.
- les bases physico-chimiques des propriétés de surface des particules vs propriétés de masse / séparabilité et agglomération ; mécanismes du ré-assemblage des particules (interactions faibles, soudures).
- les suivis et contrôle du fractionnement : quels outils (marqueurs, analyse d'image) ?
- l'application de l'ACV à la raffinerie sèche .

Pour les procédés en voie humide, les questions générales sont de même nature, bien qu'elles s'expriment différemment : bases de la faisabilité technique (« améliorer la spécificité et diminuer les réactions couplées aboutissant à la formation de molécules complexes »), viabilité économique (« minimiser la dépense énergétique ou les quantités d'enzymes nécessaires »), la compétitivité des applications (« amplifier la réactivité et la fonctionnalité des fractions obtenues ») :

- les bases physico-chimiques et mécaniques de l'accessibilité aux enzymes et aux réactifs.
- la réactivité des constituants des végétaux et extractabilité de composés d'intérêt, et notamment spécificité des réactions d'intérêt.
- les interactions non productives (« piégeage ») entre enzymes (ou réactifs) et molécules présentes dans le milieu.
- les suivis et contrôles des procédés.
- l'application de l'ACV aux procédés humides.

## **Questions de recherche**

### ***Questions amont***

Compréhension des agencements et interactions moléculaires dans la biomasse pour mieux diriger les procédés de déconstruction. Prise en compte des différentes échelles spatiales de la biomasse pour les problématiques de déconstruction et fractionnement.

Compréhension des mécanismes impliqués dans les procédés de déconstruction / fractionnement.

### ***Questions sur la résilience des procédés par rapport à la variabilité de la biomasse***

A partir de quel degré de déconstruction peut-on fournir des intermédiaires pouvant alimenter un procédé unique ? Peut-on proposer des procédés spécifiques de chaque type (famille) de biomasse permettant d'accéder à ce degré de normalisation ?

Combien de procédés différents faut-il en tête de bioraffinerie pour pouvoir accepter tous les types de biomasses ?

Peut-on définir des paramètres de caractérisation de la biomasse permettant d'adapter et ou optimiser le procédé de déconstruction/fractionnement ?

### ***Questions sur l'accessibilité des composés d'intérêt***

Comment mesurer l'accessibilité aux enzymes, aux microorganismes et/ou aux réactifs chimiques d'un composé au sein de la biomasse ?

Liens entre caractérisation de la biomasse et accessibilité.

Comment améliorer l'accessibilité des composés au sein de la biomasse ?

### ***Questions sur l'optimisation des procédés***

Développement de synergies entre les différentes opérations unitaires, couplage de différentes opérations (chimiques/biologiques/mécaniques/thermiques..) et de synergies entre voies sèche et humide.

Développement de procédés de déconstruction et fractionnement étagés, chronologie des opérations unitaires ; ou à l'inverse, détermination de procédés permettant de déconstruire et transformer la biomasse en une seule étape.

Développement de procédés de déconstruction et fractionnement limitant la dégradation ou la perte des sucres et la formation de composés inhibiteurs des procédés biologiques.

Procédés originaux qui permettent une évolution voire une rupture technologique, par exemple procédés enzymatiques en milieux non conventionnels (hautes températures ou hautes pressions), combinaisons de procédés biologiques, chimiques, thermiques, mécaniques.

### ***Questions par rapport à la durabilité des procédés***

Intégration d'opérations unitaires efficaces, propres et sobres.

Procédés de déconstruction / fractionnement pouvant être alimentés par l'énergie produite par la bioraffinerie : vers une bioraffinerie énergétiquement autonome.

Procédés de déconstruction / fractionnement nécessitant peu d'intrants, en particulier une faible consommation d'eau.

Procédés de déconstruction / fractionnement conduisant à une bioraffinerie sans déchet (valorisation de l'intégralité de la biomasse) ?

### Autres questions

Développer des procédés de déconstruction dès la récolte et mettre ainsi à profit la période entre la récolte et l'introduction dans la bioraffinerie.

Développer une biomasse dont les parois végétales ont des points de fragilité, dans certaines conditions « pilotables » de l'extérieur (température, teneur en eau). Comment coupler cette étape avec un procédé de séparation des particules ?

Etude de procédés spécifiques à la biomasse algale (microalgues et macroalgues).

Optimisation de nouveaux gisements : un des gisements les plus importants pour la récupération d'énergie est constitué par les déchets organiques (municipaux, ménagers, agricoles,...). S'ils sont aujourd'hui beaucoup utilisés, leur valorisation pourrait être davantage optimisée. Le broyage fin et le tri en fractions adaptées pourraient contribuer fortement à l'amélioration des performances en termes de rendement en bio-gaz (fermentation anaérobie, méthanisation) de ces produits.

### 5.4.2.3 Séparation et extraction des molécules d'intérêt

#### 5.4.2.3.1 Etat de l'art

La production à partir de biomasse végétale, *via* différentes technologies, à la fois de produits chimiques, de synthons, d'énergie, d'agromatériaux, d'aliments et d'ingrédients à destination de l'alimentation humaine ou animale, implique une distinction dans les procédés de séparation mis en œuvre ; en particulier la fonction cible recherchée dans les fractions produites ne peut être obtenue sans des étapes de purification et/ou raffinage finales, et les critères de pureté sont différents selon les secteurs d'application.

Le choix des procédés d'extraction à intégrer dans les futures bioraffineries et leur enchaînement séquentiel (qui va jouer sur la préservation des structures moléculaires et donc des fonctionnalités ainsi que sur le rendement et la sélectivité de l'extraction ultérieure) est un paramètre clé, de façon à obtenir des filières « vertes » et durables de productions de molécules<sup>654</sup>. L'extraction sélective de molécules d'intérêt à partir de la biomasse s'envisage par l'utilisation par exemple de solvants alternatifs, comme le CO<sub>2</sub> supercritique ou l'eau subcritique, en sus de l'éthanol lui-même. Le CO<sub>2</sub> supercritique permet l'extraction des lipides dans des conditions intéressantes puisque dans le domaine de pression intéressant au plan économique, la solubilité varie en sens inverse de la température, ce qui permet d'opérer par exemple à 50°C et d'éviter la dégradation des composés d'intérêt. De plus ce solvant est beaucoup plus sélectif que l'hexane et le raffinage de l'huile s'en trouve simplifié. Les autres composants lipidiques peuvent à leur tour être extraits séquentiellement afin de satisfaire directement des marchés spécialisés (phospholipides comme agents émulsionnants par exemple). De plus la teneur en composants non voulus du tourteau est réduite et donc sa qualité améliorée, sans oublier l'absence d'hexane par rapport au procédé actuel. Enfin l'emploi d'un co-solvant – eau ou éthanol - élargit considérablement la palette des composants extractibles *via* cette technologie. Certains solvants comme les liquides ioniques sont particulièrement étudiés, avec un accent mis sur la biodégradabilité de certains d'entre eux<sup>655,656</sup>, et un des challenges pourrait être, dans le cas de la filière lignocellulosique, d'assister

<sup>654</sup> Clark JH, Deswarte FEI, Farmer TJ (2009) The integration of green chemistry into future biorefineries. *Biofuels Bioproducts & Biorefining-BioFPR*, 3 (1) 72-90.

<sup>655</sup> Yu YH, Lu XM, Zhou Q, et al. 2008. Biodegradable Naphthenic Acid Ionic Liquids: Synthesis, Characterization, and Quantitative Structure-Biodegradation Relationship Record contains structures. *Chemistry-A European Journal*, 14 (35) 11174-11182

<sup>656</sup> Zhao H 2006. Innovative applications of ionic liquids as green engineering liquids. *Chemical Engineering Communications*, 193 (12) 1660-1677.

la séparation de la cellulose par l'utilisation de ces liquides ioniques<sup>657, 658</sup>. L'eau reste aussi utilisable en bioraffinage et chimie verte, jouant à fois le rôle de réactif mais aussi de solvant au sens large, y compris pour extraire des composés non hydrosolubles mais existant dans le végétal sous une forme susceptible d'être entraînée sous forme de latex et autre milieu dispersé.

Par ailleurs, la lignine étant une source potentielle de composés aromatiques, l'étude de la production de petites molécules et de leur extraction à partir de la lignine est également d'intérêt.

Les procédés de fermentation restent bien sûr d'actualité pour la conversion de la biomasse afin de produire une large gamme de molécules<sup>659</sup>, leur extraction à partir du milieu de fermentation restant souvent à optimiser. Dans le cas de la production de synthons à partir de biomasse, à destination de la synthèse chimique par exemple, il existe peu de procédés industrialisés, sauf dans le secteur lipochimique qui débouche principalement sur des agents tensioactifs et des diacides (monomères pour le Nylon, résines glycérophtaliques) et dans celui des polyols.

Plus spécifiquement dans le domaine du bioéthanol, les alternatives les plus prometteuses pour compenser les coûts de production concernent la génération de co-produits valorisables, couplée à de l'intensification des procédés<sup>660</sup>.

Néanmoins, pour la mise en place de nouvelles bioraffineries, le choix devrait s'orienter vers des procédés de séparation énergétiquement plus économiques, avec prise en compte des critères de durabilité (économie d'eau, d'énergie). Dans ce contexte, l'emploi de certains procédés membranaires gagnerait à être développé, dans le domaine du bioéthanol notamment. En effet, une très large partie de la consommation d'énergie du procédé de fabrication de bioéthanol est liée à l'élimination de l'eau présente dans le moût alcoolisé<sup>661</sup>. Les procédés usuels de séparation sont dans ce cas la distillation, qui enlève la plus grande partie de l'eau mais qui est consommatrice d'énergie, suivie d'une étape de déshydratation finale à l'aide de tamis moléculaires. L'utilisation de procédés membranaires pour l'étape de déshydratation de l'éthanol n'est pas nouvelle, que ce soit de la pervaporation<sup>662</sup> ou de la perméation de vapeur<sup>663</sup>, en remplacement des tamis moléculaires. Le potentiel actuel de développement des procédés membranaires pour le domaine du bioéthanol peut être plus ambitieux que le remplacement des opérations de déshydratation seules, en envisageant donc de substituer également une partie des procédés de distillation. L'utilisation de membranes polymériques résistantes à la chaleur et aux solvants a été développée par la société Vaperma (Canada), qui a breveté cette technologie destinée à diminuer la consommation d'énergie tout en réduisant les coûts d'opération ainsi que les émissions de gaz à effet de serre reliées aux procédés traditionnels de fabrication d'éthanol<sup>664</sup>. L'impact de la nature de la

<sup>657</sup> Zhu SD, Wu Y, Chen Q, Yu Z, Wang C, Jin S, Ding Y and Wu G 2006. Dissolution of cellulose with ionic liquids and its application: a mini-review. *Green Chem.*, 8, 325–327.

<sup>658</sup> Myllymaki V and Aksela R (2005) Dissolution method for lignocellulosic material, WO Patent 2005/017001.

<sup>659</sup> Clark JH, Deswarte FEI, Farmer TJ (2009) The integration of green chemistry into future biorefineries. *Biofuels Bioproducts & Biorefining-BioFPR*, 3 (1) 72-90.

<sup>660</sup> Cardona C.A. and Sanchez O. J. (2007). Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology*, 98, 2415–2457.

<sup>661</sup> Kim S. and Dale B.E. (2005) Environmental Aspects of Ethanol Derived from No-tilled Corn Grain: Non Renewable Energy Consumption and Greenhouse gas Emissions. *Biomass and Bioenergy*, 28, 475-489.

<sup>662</sup> Huang, R.Y.M. (1991) *Pervaporation Membrane Separation Processes*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

<sup>663</sup> Ikeda S. and Watari M. (2005) Ethanol Dehydration by Nanoporous Zeolite Membrane-based Vapor Permeation, *Ethanol Producer Magazine*, April.

<sup>664</sup> Cote P, Roy C, Bernier N (2009) Energy Reduction in the Production of Ethanol by Membrane Dehydration. *Separation Science and Technology*, 44, (1) 110-120.

biomasse initiale ainsi que les contraintes de déshydratation et de pureté des produits sont des points qui peuvent faire l'objet de questions de recherche et qui commencent d'ores et déjà à être étudiés en France à petite échelle dans le cadre d'un programme financé par l'ADEME (appel à projets BIP2008, projet MIDIPER). L'intérêt des techniques membranaires déborde largement du seul domaine de la production d'éthanol, c'est également le cas du traitement des huiles, mais aussi plus généralement de la séparation entre la matrice végétale et la solution d'extraction. Enfin il ne faut pas oublier les perspectives ouvertes par le choix approprié du milieu d'extraction ou de fractionnement d'un extrait, en jouant sur l'aptitude à l'agrégation de certains solutés dotés de propriétés tensioactives ou encore en induisant la formation de superstructures (micelles, liposomes) capables d'entraîner sélectivement une classe de composants, alors séparables par micro- ou ultrafiltration.

#### **5.4.2.3.2 Principaux verrous identifiés**

Le verrou majeur dans le choix d'un procédé d'extraction, en lien avec l'amont, est la disponibilité (quantité, concentration, interactions avec la matrice,...) de la molécule d'intérêt ainsi que la connaissance des interactions entre la molécule à extraire et le milieu, de façon à pouvoir proposer les opérations unitaires, seules ou en couplage, permettant d'atteindre une sélectivité importante dans l'extraction.

Le prétraitement de la biomasse par différents procédés (broyage, extrusion, prétraitement chimique,...) en vue d'améliorer l'efficacité d'un traitement enzymatique ultérieur (meilleure accessibilité des sites et donc réduction de la quantité d'enzymes et des coûts) devrait également faire l'objet de recherches. On peut penser que les technologies basées sur les micro-ondes et les ultrasons, encore peu utilisées au plan industriel, sont bien placées, de par leur aptitude à agir au centre des cellules et des superstructures du végétal, sans nécessiter la rupture en série des parois successives.

De façon complémentaire à la question posée au paragraphe précédent qui s'intéresse aux structures rigides, il est indispensable non seulement de bien localiser les composés à extraire (déjà connu pour un certain nombre de végétaux, mais à systématiser) et aussi de mieux caractériser le système du point de vue physicochimique. C'est-à-dire de connaître la forme sous laquelle les molécules sont stockées (micelles, cristaux liquides et autres agrégats), les produits naturels ayant peu ou prou des parties polaires et d'autres non polaires leur conférant des propriétés de surface (à l'exception des triglycérides). Selon le but de l'extraction, les interactions moléculaires responsables de ces arrangements sont à préserver ou au contraire à détruire de façon ciblée, ce qui pose le problème de bien articuler d'une part la nécessaire déconstruction des parois végétales pour faciliter le transport de matière (extraction) traité au paragraphe précédent, avec d'autre part la préservation ou la destruction de la superstructure sous laquelle existent les composés à extraire.

Dans le cas de l'extraction de molécules d'intérêt, le choix d'un solvant d'extraction adapté reste un verrou, tant au niveau de la sélectivité de l'extraction que de la biocompatibilité et de la biodégradabilité des solvants. L'intégration de nouveaux solvants comme les solvants ioniques et les fluides à l'état supercritique (CO<sub>2</sub>) devra passer par l'examen de leurs fonctions, coûts et propriétés au regard de ce verrou.

En ce qui concerne les bio-huiles produites par pyrolyse, la France accuse un retard au plan recherche par rapport aux pays nord américains et germaniques. Cette technologie est principalement utilisée au plan industriel pour la production de composés aromatiques à partir de copeaux de bois. Mais des verrous importants portent, outre le développement de technologies à bas coût et mobiles, surtout sur le fractionnement des acides organiques contenus dans ces biohuiles pour des utilisations en chimie. L'extrême complexité chimique des mélanges bruts qui s'apparente à celle du pétrole fait peser un

sérieux doute sur les chances réelles d'emploi de ces technologies pour la production de synthons. On conçoit en effet que cette démarche de craquage chimique par définition non sélectif n'est pas adaptée à la valorisation des structures complexes et ordonnées, résultat de la sélectivité biochimique, par comparaison à d'autres alternatives. Même la production de carburants à partir de ces bruts, qui n'implique pourtant pas de pureté chimique, demande la mise en pratique de technologies lourdes mises en œuvre en raffinage pétrolier où elles sont là pleinement justifiées (par exemple désoxygénation, désazotation). Par contre ces technologies (pyrolyse, torréfaction) ont probablement un potentiel d'application pour densifier la biomasse sur le lieu de production afin de limiter l'impact GES et les coûts de transport, avant sa transformation en gaz de synthèse ou en chaleur (cas des pays en voie de développement).

De façon générale, plusieurs verrous économiques peuvent être identifiés car à côté de la faisabilité technique, se pose la question de la viabilité économique d'un nouveau procédé d'extraction ainsi que sa compétitivité vis-à-vis de procédés déjà existants. L'avantage par rapport à la pétrochimie pourra venir de l'accès aisé à de nouvelles structures et fonctionnalités, certaines pouvant exister déjà dans la biomasse de départ, probablement en tirant parti de la présence simultanée d'hétéroatomes (fonctions oxygénées) et d'autres groupements (chaîne hydrocarbonée portant une insaturation spécifique, cycles aromatiques).

## **Questions de recherche**

### ***Déconstruction de la paroi et accessibilité des molécules cibles***

Un des verrous de la déconstruction de la biomasse concerne les fibres (désassemblage) mais aussi les polymères tels que la cellulose. Pour rompre les nombreuses liaisons faibles présentes par exemple dans la cellulose cristalline, il faut recourir à un couplage de traitements physique et enzymatique. Comment améliorer les procédés pour ne recourir qu'à la catalyse enzymatique (conditions non conventionnelles) ?

Cette question peut bénéficier de travaux de « théorisation » d'ensembles dont la cohésion résulte d'un grand nombre de liaisons faibles (par rapport à la chimie classique qui s'intéresse majoritairement aux liaisons covalentes et à la chimie macromoléculaire qui s'intéresse surtout aux liaisons par enchevêtrements).

En vue d'extraire les composants des molécules (ou macromolécules), qui sont soit hydrosolubles, soit des lipides ou d'autres molécules de faible polarité, l'apport de l'ensemble des techniques de caractérisation du solide et des colloïdes est nécessaire, pour connaître la matière première et les altérations induites par l'ensemble des traitements physiques, chimiques, enzymatiques, applicables, au cours du prétraitement et de l'extraction.

Dans les deux cas (désassemblage ou extraction), on pourra alors chercher à induire une évolution du végétal au niveau du génome, ce qui pose des questions de recherche dans le domaine de l'adaptation du végétal au procédé en fonction de critères technologiques.

### ***Couplage extraction-fonctionnalisation***

On peut imaginer faire démarrer le processus de fractionnement des édifices moléculaires dès la phase de trituration des graines par exemple. Ce serait possible *via* l'inclusion d'une étape de transformation chimique de l'un des composants (hydrolyse de glycérides pour extraire directement des acides gras par exemple), ou *via* l'addition d'enzymes au stade opportun du procédé.

A plus long terme cela conduit à envisager la production de systèmes enzymatiques réactifs dans des compartiments tissulaires différents de ceux qui contiennent les substrats macromoléculaires. Par exemple d'un côté l'albumen, de l'autre l'embryon, ou bien dans des cultures dédiées portant chacune l'un des composants qui seraient mis en présence par trituration du mélange des récoltes.

### ***Développement de synergies entre les différentes opérations unitaires***

On pense en premier lieu à la technologie membranaire dont l'usage devrait être encouragé dans le cas du traitement des huiles mais aussi plus généralement dans celui de la séparation entre la matrice végétale et la solution d'extraction. Enfin il ne faut pas oublier les perspectives ouvertes par le choix approprié du milieu d'extraction ou de fractionnement d'un extrait, en jouant sur l'aptitude à l'agrégation de certains solutés dotés de propriétés tensioactives ou encore en induisant la formation de superstructures (micelles, liposomes) capables d'entraîner sélectivement une classe de composants, alors séparables par micro- ou ultrafiltration.

Le potentiel actuel de développement des procédés membranaires (permeation vapeur, pervaporation) pour le domaine du bioéthanol peut être plus ambitieux que le remplacement des opérations de déshydratation seules, en envisageant donc de substituer également une partie des procédés de distillation. L'impact de la nature de la biomasse initiale ainsi que les contraintes de déshydratation et de pureté des produits sont des points qui peuvent faire l'objet de questions de recherche. Dans le cas particulier de la transformation de la biomasse cellulosique en éthanol, le fait d'avoir peu de sucres induit des concentrations réduites en éthanol dans les moûts fermentés, ce qui signifie que des volumes encore plus importants d'eau doivent être retirés, et l'amélioration de telles technologies est un challenge en soi, afin de pouvoir relever le défi de la séparation de l'éthanol produit à partir de la biomasse cellulosique.

### ***Questions générales relatives aux procédés***

Il faut viser l'intensification *via* le couplage de technologies, en recherchant de plus une synergie. Au-delà des questions précédentes regardant la matière première et son prétraitement, il faut s'intéresser aux systèmes solvants respectueux de l'environnement (fluides supercritiques) en poussant les travaux au-delà du domaine « académique » auquel ils restent souvent cantonnés, afin de permettre une réelle évaluation de l'intérêt du procédé les incluant (sélectivité, rendements, propriétés des produits, coût de production).

On encouragera aussi la mise en œuvre de technologies émergentes (ultrasons, microondes), avec en amont l'étude de l'action de ces dernières sur la structure végétale particulière d'une application donnée. Les questions de transport de matière sont au cœur de l'efficacité de l'extraction, on s'attachera donc à caractériser ces matrices végétales et les changements induits par les processus mis en œuvre, notamment en encourageant l'utilisation des concepts disponibles du génie des procédés.

### ***Question sur la durabilité des procédés***

D'une façon générale l'étude comparative des procédés d'extraction sélectifs, adaptés aux matrices, devra inclure une étude d'impact environnemental des technologies envisagées. D'où la diffusion des outils et du savoir faire nécessaire auprès des chercheurs, et l'inclusion parmi les attendus d'une action de recherche dans ce domaine.

## **5.4.2.4 Maintien ou obtention des propriétés fonctionnelles**

### **5.4.2.4.1 Etat de l'art**

Sauf exception, il est raisonnable de considérer qu'aucun végétal ne constitue en l'état une matière première industrielle utilisable telle quelle comme matériau ou pour une transformation chimique ou fermentaire ; la fonction cible recherchée dans les fractions produites ne peut être obtenue sans des étapes de concentration, purification et/ou raffinage. Par exemple la réalisation de panneaux de bois

aggloméré demande déjà au minimum l'étape de production de copeaux ; au-delà de cette évidence, même la production d'éthanol par fermentation de biomasse cellulosique n'intervient qu'après l'étape de fractionnement / séparation.

Une valorisation optimisée des différents composants d'une biomasse plaide donc en faveur de l'utilisation de végétaux les mieux adaptés possibles aux usages, afin de contourner un certain nombre de contraintes liées à la composition chimique et à la structure de la matière première. Ces limites, forcément imposées par le végétal *in fine*, nécessitent donc aussi le recours à des étapes de transformation constituant un procédé de bioraffinage ; ces procédés doivent à leur tour être optimisés pour aboutir à des fractions dotées des propriétés recherchées. La fonctionnalisation est la modification d'assemblages de macromolécules ou l'introduction de groupements chimiques (dans des molécules ou macromolécules) pour conférer des propriétés à valeur d'usage.

En pratique, des avancées respectives sont nécessaires à la fois dans le domaine du végétal et dans celui des procédés, ces deux domaines étant à appréhender de manière complémentaire. L'optimisation de cet ensemble « biomasse-procédé » qui vise à proposer les meilleurs débouchés pour les différents organes ou composants d'organes végétaux récoltés, bute sur un certain nombre de verrous constituant autant de questions de recherche.

De nombreux produits d'origine végétale sont d'ores et déjà disponibles sur le marché non alimentaire et regroupent principalement des dérivés de sucres et d'amidon (alcools, acides), des huiles et dérivés lipidiques (glycérine, acides gras, ...), des gommes et dérivés du bois (résines, ...) ainsi que des dérivés de celluloses et de fibres (cellulose acétate, ...). Le développement de bioraffineries reposant sur l'utilisation des plantes entières devrait permettre d'élargir le panel de molécules issues du végétal mises sur le marché. Dans ce contexte, diverses étapes de déconstruction / séparation / fonctionnalisation de la biomasse végétale sont nécessaires afin d'obtenir des produits pouvant substituer les molécules issues de la raffinerie pétrolière et de la pétrochimie. Un enjeu pour le développement des bioraffineries est également de permettre l'émergence de nouvelles propriétés fonctionnelles à l'origine de nouvelles applications et donc de nouveaux marchés.

En terme de propriétés fonctionnelles, les potentialités des produits issus de bioraffineries sont assez vastes et concernent des champs d'application tels que l'énergie, les polymères, les lubrifiants, les solvants, les adhésifs, les herbicides, les molécules pharmaceutiques,... Les molécules d'application pour la chimie organique représentent un enjeu majeur pour substituer les molécules d'origine fossile. Sur la base d'évaluations techniques, industrielles et économiques, Werpy et Peterson<sup>665</sup> ont établi une liste de 12 molécules (building-blocks) issues du végétal à fort potentiel d'utilisation dans l'industrie chimique. Ces molécules (acide itaconique, acide 3-hydroxypropionique, ...), pour la plupart obtenues par fermentation de sucres, présentent des groupes fonctionnels variés et peuvent être converties en diverses molécules chimiques et matériaux à haute valeur ajoutée. De nombreuses recherches portant sur le développement de voies chimiques de transformation des sucres, des lipides et des terpènes ont été menées lors des 20 dernières années<sup>666</sup>.

La figure de la page 8 (« BioHub Project » de la société Roquette) illustre de manière synthétique le potentiel de la biomasse dans le domaine de la chimie (le schéma présenté concerne une biomasse particulière : blé ou maïs, mais une partie de ce qui est présenté reste valable en partant de la biomasse

<sup>665</sup> Werpy T. and Petersen G. 2004. Top value added chemicals from biomass: vol.1 - \_ results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas. Report No. NREL/TP-510-35523; National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.

<sup>666</sup> Corma A., Iborra S. and Velty A. 2007. Chemical routes for the transformation of biomass into chemicals. Chem. Rev. 107: 2411-2502.



lignocellulosique). On voit que le glucose est une véritable plaque tournante, à la fois vers des polymères spécifiques (qui sortent du répertoire de la pétrochimie et des polymères qui en découlent), mais aussi, par des voies originales, vers des grands produits de la pétrochimie : par exemple le 1-3 propane diol (procédé désormais industriel), et le PTT qui en dérive, ou les glycols *via* le sorbitol, ou les acrylates *via* l'acide lactique. Bien que cela ne soit pas mentionné, l'éthanol est aujourd'hui sérieusement considéré comme un précurseur d'éthylène (en lieu et place du naphta pétrolier). Bien entendu, il ne faut pas croire qu'une même « bioraffinerie » pourra produire de manière efficace l'ensemble des produits et coproduits aux spécifications requises. Il faut choisir au préalable le ou les produits finaux principaux recherchés, ce qui détermine la qualité des intermédiaires, et par la même, la nature et la qualité des sous-produits.

Les applications actuelles de la lignine sous forme polymérique sont basées sur ses propriétés de polyélectrolytes (dispersants, émulsifiants, séquestrants). Généralement, ces applications ne requièrent pas ou peu de modifications autres qu'une sulfonation ou qu'une thio-hydroxyméthylation. La structure phénolique et la réactivité des lignines permet aujourd'hui d'envisager une large gamme d'utilisations dans le domaines des adhésifs (substitution du phénol dans les résines phénoliques, obtention de résines époxy par ajout d'agents classiques de réticulation). Pour ces applications, l'origine et le procédé d'obtention des lignines ont une influence sur les performances finales des adhésifs, la structure chimique et la masse molaire étant deux paramètres déterminants<sup>667</sup>. Une fonctionnalisation préalable des lignines, notamment par voie enzymatique, permet de pallier leur hétérogénéité chimique et d'accroître leur réactivité. Un autre ensemble d'applications potentielles concerne l'utilisation des lignines dans des matrices thermoplastiques, d'origine naturelle ou non. L'effet des lignines sur ces matrices est dans ce cas principalement conditionné par l'existence d'une fraction de lignine soluble dans la matrice et par la proportion de groupements réactifs (OH phénoliques libres)<sup>668</sup>. Enfin, il est possible de synthétiser de nouveaux polymères à partir des lignines, les méthodes mises en œuvre jusqu'à présent étant essentiellement de nature chimique<sup>669</sup>. Très récemment, un laboratoire du DOE (USA) a développé un procédé économiquement viable à base de lignines produites par un procédé Organosolve pour substituer les fibres de carbone. La nature des lignines et leur mode d'obtention sont déterminants dans l'obtention des propriétés fonctionnelles obtenues.

Dans le cas de la recherche d'obtention de nouvelles propriétés fonctionnelles, la chimie classiquement mise en œuvre dans la pétrochimie pourrait mieux exploiter les caractéristiques des molécules issues de la biomasse végétale. En effet, ces dernières sont très oxygénées et polaires (dans la plupart des cas) comparativement aux molécules d'origine fossile. Si l'objectif est de substituer la biomasse à une matière première fossile (en pratique coupe pétrolière ou condensat de gaz naturel), le fait que les molécules issues de la biomasse sont oxygénées (alcools ou acides en particulier) peut être considéré comme un avantage. En effet, si l'on examine les intermédiaires nécessaires pour l'élaboration des grandes familles de polymères, une fraction importante fait intervenir des précurseurs oxygénés. C'est le cas pour les acrylates, les polyesters, et les polyuréthanes. Or, lorsqu'on part d'hydrocarbures (fossiles), en général saturés et peu réactifs, l'étape difficile et généralement limitante est précisément une réaction d'oxydation, conduite le cas échéant de manière non catalytique, avec des réactifs coûteux et délicats d'emploi. En partant de la biomasse, il est possible de développer de nouveaux schémas d'obtention des mêmes précurseurs, *via* des réactions en partie biocatalytiques « propres ».

---

<sup>667</sup> Stewart D. 2008. Lignin as a base material for materials applications: chemistry, application and economics. *Ind. Crops Prod.* 27: 202-207.

<sup>668</sup> Pouteau C., Dole P., Cathala B., Averous L., Boquillon N. 2003. Antioxidant properties of lignin in polypropylene. *Polym. Degrad. Stab.* 81: 9-18.

<sup>669</sup> Hu T.Q. (Ed.), 2002. *Chemical modification, properties and usage of lignins*. Kluwer Academic/plenum Publishers, Hardbound. 302 p.

#### 5.4.2.4.2 Principaux verrous identifiés

##### **Conservation de la fonctionnalité**

Sauf exception, les méthodes de déconstruction actuellement envisagées (tel que le fractionnement) modifient les propriétés fonctionnelles naturelles des constituants végétaux. La conservation de la fonctionnalité peut revêtir plusieurs aspects, suivant qu'il s'agit de ne pas altérer la composition chimique ou de ne pas altérer la structure supramoléculaire.

Dans ce domaine les travaux de recherche visent la connaissance et la maîtrise des conditions nécessaires à la préservation des structures supramoléculaires. Ceci passe notamment par la mise en œuvre de techniques non destructives de caractérisation de la structure du solide « en ligne » et en fonction des conditions appliquées (comparables à celles susceptibles d'être rencontrées pendant les étapes du bioraffinage).

Eviter la dégradation moléculaire (composés extractibles, polymères) nécessite déjà de connaître le domaine de stabilité de chaque composant – y compris au sein de la matrice végétale afin de tenir compte de l'influence de cette dernière et relève ensuite d'une démarche analogue à celle décrite ci-avant. Les technologies émergentes (ultra sons, eau sub et super critique, détente, champs électriques pulsés, ozonolyse, etc.) et leur couplage sont des facteurs d'innovation. Il sera ainsi possible de choisir les technologies les mieux adaptées et les conditions d'applications, permettant de préserver les molécules naturelles et leurs assemblages.

##### **Introduction de nouvelles propriétés**

L'introduction de nouvelles propriétés pour une fraction dérivée de la biomasse ou « fonctionnalisation » est l'un des grands axes de recherche en bioraffinerie. Deux voies d'accès sont possibles, soit la modification de la composition chimique, soit la modification des assemblages (et de leurs propriétés). Il peut s'agir par exemple d'obtenir directement l'ester méthylique (biocarburant) à partir de graines et d'extraire ce produit.

La catalyse est l'une des voies de recherche à privilégier pour la modification de la composition. Elle permet de travailler dans des conditions plus douces, *a priori* moins énergivores et évitant la dégradation des biostructures natives. De plus elle autorise l'utilisation de composés moins réactifs (mais aussi moins dangereux ou moins onéreux) ou l'introduction d'un groupement sur un site lui-même peu activé. Ligases, isomérases, oxydoréductases encore peu explorées ont un fort potentiel. La recherche portera sur le screening à haut débit et les modifications génétiques.

L'application des catalyseurs à la biomasse initiale ou en cours de déconstruction suppose une bonne accessibilité des sites à fonctionnaliser, et est donc liée aux questions relatives à la déconstruction et à l'adaptation du végétal, plus en amont. Catalyse hétérogène et catalyse enzymatique présentent des avantages complémentaires et conviennent bien pour la fonctionnalisation de fractions déjà isolées. La catalyse hétérogène facilite la séparation catalyseur / milieu réactionnel.

L'« hétérogénéisation » de catalyseurs en phase homogène reste donc une voie intéressante, dans la mesure où elle permet d'atteindre un niveau d'activité plus élevé par atome métallique, par comparaison à la catalyse hétérogène ; l'hétérogénéisation concerne aussi la catalyse enzymatique. Dans cette voie, on peut encourager la mise en œuvre de membranes poreuses dotées de fonctions catalytiques.

L'autocatalyse, par exemple grâce à l'eau et au CO<sub>2</sub> super ou sub-critiques, voie encore peu

explorée fournit une alternative intéressante notamment en cas de faible accessibilité des sites réactionnels, ce d'autant plus que ces fluides offrent par ailleurs de multiples options d'extraction sélective et des avantages en termes d'impact environnemental.

Dans ce domaine des réactions de fonctionnalisation ne nécessitant pas l'addition d'un catalyseur, la lyse de liaisons couplant des unités de base (liaisons ester ou éther osidique par exemple) est du plus grand intérêt. Une meilleure connaissance des structures physiques impliquées et des conditions de réaction est nécessaire, permettant de contrôler taux de lyse et sites de réaction, donc d'agir à la fois sur la déconstruction et sur la fonctionnalisation chimique (accessibilité de sites pour une autre réaction, modification de la masse moléculaire moyenne, libération de monomères).

Enfin, la recherche de catalyseurs sélectifs et robustes, permettra de travailler sur des fractions très complexes, en milieu aqueux, évitant la purification préalable (biomasse en cours de déconstruction par exemple). L'empoisonnement des catalyseurs et leur recyclage (donc leur durée de vie) qui impactent la rentabilité économique du procédé restent des verrous pour leur utilisation.

Au-delà de la simple transformation d'un groupement chimique, c'est le domaine des transformations par les microorganismes qui est à développer, pour la production de dérivés actifs (à plus haute valeur) mais aussi pour des « commodités » qui constitueront les gros marchés notamment ceux des monomères (cf étude DOE-USA). La production d'enzymes nouvelles et à faible coût fait aussi partie de la contribution attendue des procédés fermentaires (extrémophiles /pH, température, concentration du substrat, poisons ; compréhension de la régulation croissance / production de métabolites ; voies métabolites vers de nouveaux produits). Ce thème est explicité dans la tâche 4.

### ***Fonctionnalisation sans modification de composition chimique***

La fonctionnalisation sans modification de composition chimique relève de la modification des interactions entre molécules. Elle implique une bonne connaissance des structures physiques initiales et des transformations à induire. Ces recherches relèvent de la physicochimie, les architectures résultant le plus souvent de liaisons faibles (type « hydrogène ») et de conformations préférentielles liées à des gênes stériques.

En fait, cette voie de fonctionnalisation fait appel aux recherches déjà signalées à propos de la préservation des propriétés de la biomasse native (accessibles *via* des techniques non destructives de caractérisation de la structure du solide).

### ***Besoin d'intégration et de couplage***

La possibilité de coupler la fonctionnalisation aux deux autres actions (déconstruction, séparation) est un levier très puissant en faveur de l'innovation et des performances des futurs procédés de bioraffinage aux niveaux économique et environnemental ; par exemple la déconstruction qui doit économiser de l'énergie pour fragmenter la biomasse peut aussi être un pas vers la fonctionnalisation et vers la séparation (extraction plus facile).

### ***Caractérisation des molécules issues des bioraffineries***

L'utilité finale d'un produit de bioraffinerie dépendra de la disponibilité de la ressource d'origine, du coût du procédé d'obtention du produit et de l'intérêt de la molécule : substitution d'une molécule d'origine fossile ou nouvelle propriété pour nouveau marché. Dans ce dernier cas, même si beaucoup de données existent concernant les voies de transformations des végétaux et l'obtention de synthons à partir de la

biomasse, peu d'informations sont disponibles quant à la caractérisation des molécules issues de la transformation des synthons (propriétés, comportement, stabilité, ...). Ce manque de connaissances empêche de mieux définir quels constituants et quels synthons à cibler pour développer une bioraffinerie viable économiquement. La détermination des propriétés des molécules d'intérêt est un point clé dans le choix d'un procédé de séparation / extraction.

Par exemple, la fraction lignine de la biomasse récupérée sera très variable (poids moléculaire, solubilité, réactivité, teneur en groupements phénoliques libres, types de substitutions, types de liaisons, ...) selon la ressource lignocellulosique et les procédés développés dans la bioraffinerie. Or, l'industrie chimique est basée sur l'utilisation de matières premières uniformes et constantes. Il est donc nécessaire de développer des technologies permettant d'uniformiser et de stabiliser les molécules obtenues à partir de la biomasse. Le développement de nouvelles applications (telles que les adhésifs, les résines, ...) pour les polymères de lignine nécessite de disposer de technologies adaptées pour modifier et contrôler la réactivité chimique de la lignine. La dépolymérisation sélective de la lignine pourrait permettre la production d'un large panel de molécules aromatiques.

### Questions de recherche

- Composition chimique des différentes classes de composés : localisation des composants, accessibilité des structures, interactions moléculaires entre les différentes classes. Exemple : pectine « hydratable » : imaginable pour favoriser la déconstruction des parois végétales.
- Transformation des synthons : mieux comprendre et développer des bases de données répertoriant les propriétés, les performances, la stabilité, ... des produits chimiques issus de la transformation des synthons.
- Comment exploiter au mieux les potentiels fonctionnels des produits issus des bioraffineries : ingénierie reverse (d'un produit final ciblé vers un couple constituant de la biomasse-synthon) ou non (d'un couple constituant de la biomasse-synthon vers un produit final ciblé).
- Technologies de séparation : comment maintenir une fonctionnalité naturelle durant les étapes de déconstruction / séparation ? Développement de technologie de séparation des constituants, notamment de la lignine, dans des conditions douces préservant leurs structures. Développement de technologies de scission hautement spécifiques des liaisons de la lignine et développement de techniques de séparation des molécules aromatiques produites.
- Transformations chimiques : besoin de connaissances et de développements technologiques (oxydations douces, réductions sélectives, ...). Nouvelles chimies et nouveaux catalyseurs pour l'obtention de nouvelles fonctionnalités. Nouvelles technologies de polymérisation, d'oxydation, de réticulation, d'estérification en continu (micro-ondes, extrusion réactive, ozonolyse....).
- Transformations biologiques : améliorer les connaissances (i) des voies métaboliques des bactéries, champignons et levures, (ii) des mécanismes enzymatiques ; développer des souches utilisables à l'échelle industrielle ; améliorer la tolérance des enzymes et des souches aux conditions réactionnelles (température, pH, potentiel rédox, ...) ; développer l'utilisation des enzymes en milieu non conventionnel ; Etudier des couplages avec les procédés d'extraction, afin de développer un mode de fonctionnement continu, visant à augmenter la productivité.

### Questions de recherche d'ordre général concernant les opérations unitaires

Plusieurs questions de recherche relèvent de la durabilité de la bioraffinerie :

- Intégration d'opérations unitaires efficaces, propres et sobres.
- Production de l'énergie *in situ* et opérations unitaires pouvant être alimentées par l'énergie produite par la bioraffinerie ; vers une bioraffinerie énergétiquement autonome.

- Optimisation et combinaison d'opérations unitaires nécessitant peu d'intrants, en particulier faible consommation d'eau
- Optimisation et combinaison d'opérations unitaires conduisant à une bioraffinerie sans déchets (valorisation de l'intégralité de la biomasse)
- Analyse de cycle de vie des différentes combinaisons d'opérations unitaires (lien avec le chapitre 5.4)

La question du facteur d'échelle est aussi une question fondamentale, car bien que de nombreux procédés soient économiquement plus performants pour de gros volumes de production du fait des coûts énergétiques, des solutions locales à plus petite échelle, peuvent amener à l'avenir à repenser les procédés classiques de façon globale, notamment en considérant des contraintes environnementales. En effet, des procédés comme la distillation sont viables et rentables à grande échelle, mais ne le sont pas pour des productions à moindre échelle. Explorer des procédés économiquement rentables et implanter des solutions durables adaptées à chaque type de production, en prenant en compte des critères de flexibilité sont à intégrer dans le développement de nouveaux procédés.

### **5.4.3. Production, récolte, stockage, transport des matières premières végétales – contraintes et opportunités**

#### **5.4.3.1. Généralités**

Bien que les sources de biomasse soient abondantes, elles représenteront à long terme un facteur limitant en raison de compétitions pour l'usage des terres. Néanmoins, cette biomasse reste encore sous-exploitée sous forme de gisements fatals directement disponibles concentrés (ex. déchets industriels) ou diffus (ex. rémanents d'exploitations forestières ou pailles agricoles), soit au travers des marchés organisés des productions des cultures et boisements traditionnels soit du développement de nouvelles cultures agricoles et forestières dont il faut construire les filières. Elles seront mobilisables pour de nouvelles utilisations dans le cadre d'une exploitation rationnelle tenant compte des utilisations préexistantes de la biomasse : vitales comme l'alimentation ou traditionnelles comme la papeterie, la construction, l'ameublement, le chauffage,...

Au delà d'un objectif de maximisation de la production du point de vue quantitatif, d'autres critères doivent être considérés, notamment la facilité de récolte et de stockage ou l'aptitude à la transformation. Cette aptitude à être utilisée en bioraffinerie constitue un facteur déterminant qui dépend d'un ensemble de paramètres relevant à la fois de la composition chimique et de l'organisation structurale des constituants des matières premières mises en œuvre. En conséquence, les améliorations de productivité devront s'élaborer dans le cadre d'une optimisation globale prenant en compte les attentes des utilisateurs industriels en termes de coût et de processabilité, ainsi que de critères environnementaux et territoriaux.

#### **5.4.3.2. Etat de l'art**

##### **5.4.3.2.1. Production**

Les facteurs de production doivent être ici considérés suivant deux axes : d'une part en fonction de leur performance à produire et d'autre part en tant que matière première de la bioraffinerie. Dans cette acception, les facteurs de production sont à analyser d'après la nature de la biomasse à produire, de sa disponibilité réelle et de son aptitude à la transformation

### **Détermination de la disponibilité réelle de biomasse**

L'existence de biomasse dans une région donnée ne signifie pas pour autant qu'elle soit disponible pour être valorisée industriellement. En effet, pour des raisons techniques (difficulté d'accès pour l'exploiter,...), économiques (utilisation par des filières déjà existantes,...), agronomiques (favoriser l'activité biologique des sols et leur stabilité structurale), souvent la totalité de cette biomasse ne peut être entièrement collectée. Pour prendre en compte cette réalité, il faut soustraire au volume de biomasse total une fraction dite biomasse non exportable. On définit alors ce que l'on peut appeler le « gisement de biomasse », c'est-à-dire ce qui est réellement disponible pour une nouvelle utilisation et non pas uniquement ce qui est présent. Cet exercice est généralement complexe du fait du nombre de paramètres qui entrent en jeu et peut varier dans de larges limites en fonction de données locales. Si l'on considère par exemple la paille de blé : sa production est d'environ 4 t/ha par an et sa collecte est techniquement maîtrisée. Mais cela ne signifie pas que sur l'ensemble du territoire où est cultivé du blé cette quantité soit toujours disponible. En effet, la paille peut déjà être utilisée pour l'élevage par exemple. Si cette paille n'est pas déjà exploitée, il faut prendre en considération les conséquences que pourrait avoir son exportation hors du champ, à long terme, sur la qualité des sols. Si les deux points précédents ne sont pas limitants, il est alors possible qu'il y ait un intérêt économique pour les producteurs à rendre disponible cette ressource. En France, sur les quelques 28 à 29 millions de tonnes de paille produites par an, on évalue entre 3 et 5 millions de tonnes (soit 1,5 Mtep d'énergie primaire) ce qui serait disponible pour de nouveaux usages, tout en préservant la fertilité des sols et la demande des éleveurs. Cette valeur globale peut toutefois masquer de grandes disparités locales. Seule une étude de gisements à partir des disponibilités locales permettrait de déterminer le réel potentiel de paille disponible. Ce stock de biomasse disponible serait accru par les co-produits des filières bois et par les cultures dédiées.

#### **5.4.3.2.2. Aptitude de la biomasse à la bioraffinerie**

L'aptitude de la biomasse à être transformée dans les bioraffinerie dépend à la fois de la composition chimique et de l'assemblage structural de ses différents constituants. Même si jusqu'à présent, peu de travaux de sélection ou d'optimisation d'itinéraires cultureux ont été développés en vue d'adapter la biomasse à son utilisation en bioraffinerie, plusieurs facteurs critiques ont été identifiés.

#### ***Aptitude à la déconstruction***

Ce critère constitue le principal facteur critique à considérer mais reste aujourd'hui à mieux caractériser en fonction des procédés utilisés. Cette aptitude a fait l'objet de nombreuses études pour les bioraffineries de 1ère (meunerie) et 2ème générations (amidonnerie) qui ont permis de définir des cahiers des charges auxquels devaient répondre les matières premières entrant dans ces usines. Ces cahiers des charges incluant quelques indicateurs compositionnels sont régulièrement utilisés pour analyser les livraisons de matières premières.

Ces cahiers des charges devraient encore se complexifier en fonction des produits et des marchés visés par les bioraffineries « de spécialités ». En effet, les produits issus de ces usines s(er)ont très diversifiés : molécules à propriétés spécifiques pour l'agroalimentaire, la pharmacie, la cosmétique, des polymères et résines pour les matériaux, des solvants, des émulsifiants, des fluxants, des lubrifiants, des additifs industriels, des produits pour l'alimentation animale,... Dans ce cas, les valorisations énergétiques ne viendraient qu'à la fin du processus d'extraction-purification pour assurer, si possible, l'autonomie énergétique de l'usine.

Cette aptitude à la déconstruction requiert une connaissance plus précise de l'organisation structurale et des facteurs de cohésion au sein des structures de la plante et entre polymères constitutifs. La principale difficulté provient de la complexité des parois cellulaires qui est beaucoup plus difficile à déconstruire que les organes de réserve des plantes. Les propriétés de cette paroi résultent de l'organisation et des interactions au sein de cette paroi de trois polymères (cellulose, hémicelluloses et lignines). Les différents facteurs influents (génétiques, agronomiques et environnementaux) sur le détail de la cohésion pariétale restent encore aujourd'hui mal connus.

### ***Hétérogénéité et variabilité***

L'aboutissement du concept de bioraffinerie suppose une valorisation complète de la plante entière. Dans cette acception, l'hétérogénéité compositionnelle des matières premières végétales peut être considérée comme un atout pour donner à la fois des produits à forte valeur ajoutée sur des segments à faible volume (chimie fine) ou bien des produits de masse à faible valeur ajoutée (carburants), en passant par des produits intermédiaires en termes de volume et de prix (polymères, tensioactifs, etc...), tout en produisant de l'énergie pour répondre aux besoins de production. C'est aussi le cas pour les algues. Une étude de faisabilité sur l'utilisation des algues marines pour la production de biocarburants semble indiquer que seule une approche de bioraffinage permettant de valoriser plusieurs produits (alginates, protéines, minéraux,...) simultanément est envisageable économiquement.

Par contre, la variabilité constitue un défaut intrinsèque des matières premières agricoles et aquatiques qui en fonction de la variabilité génétique, des itinéraires agronomiques et des conditions agroclimatiques peuvent entraîner des modifications sensibles d'aptitude à l'utilisation pour une même source de biomasse ou entre deux sources proches conduisant à des écarts importants de rendement (ou de qualité) des opérations unitaires de transformation.

#### **5.4.3.2.3. Récolte, transport et stockage**

Les questions liées à la récolte, au transport et au stockage sont en grande partie dépendantes de la nature de la biomasse considérée. Pour la biomasse d'origine agricole constituée de plantes annuelles, ces aspects sont déjà en grande partie maîtrisés. En effet, la culture des grains et graines s'est développée en raison de leur siccité au moment de la récolte, de leur densité et de leur stabilité au cours du stockage. Par exemple, pour la bioraffinerie de Bazancourt, son approvisionnement en biomasse repose principalement sur le blé (900 000 T /an) en provenance de différentes régions de France et sur la betterave (2 MT /an) produite localement sur un rayon de 30 km. Cependant, ces approches traditionnelles, principalement conçues pour le maintien de caractéristiques adaptées à l'usage alimentaire, pourraient être revisitées dans le cas de schémas innovants d'approvisionnement.

En revanche, pour les autres ressources végétales, plusieurs problèmes spécifiques vont se poser. Pour les biomasses agricoles d'origine pérenne, les techniques de récolte et de densification pour le transport sont à résoudre. Il en est de même pour les ressources d'origine forestière auxquelles pourront s'ajouter des problèmes d'accès aux chantiers de collecte. De même les autres sources de biomasse constituées de co-produits d'industries existantes ou de résidus pourront nécessiter de créer des chaînes logistiques d'approvisionnement de ces différents produits. Un autre point à considérer est le transport de la biomasse qui dépend du rayon de collecte. En effet, les bénéfices environnementaux peuvent être réduits voire annulés par l'énergie fossile consommée et les gaz à effet de serre émis lors du transport. Inversement, la concentration autour des usines d'espèces dédiées peut homogénéiser les mosaïques paysagères et créer des situations de monoculture défavorables à l'environnement. L'exploitation de la biomasse doit donc être pensée à partir de la réalité d'un territoire donné et dans un périmètre qui reste restreint pour qu'en soient retirés des bénéfices environnementaux réels.

Pour la récolte des algues, des chalutiers faucardeurs sont utilisés en Norvège pour couper la canopée de laminaires adultes de grande taille, laissant les petites tailles attachées à la roche. En France, on utilise le « Scoubidou » qui enroule les laminaires autour d'un crochet et les arrache par traction. L'outil est mis en rotation dans le sens inverse pour libérer des algues à l'intérieur du bateau<sup>670</sup>. En utilisant l'un ou l'autre des deux systèmes, un homme seul dans un bateau peut collecter plusieurs tonnes d'algues par jour. Cependant, la récolte d'algues est une activité saisonnière en Europe. Il est nécessaire de trouver un autre usage pour le bateau pour ne pas grever le prix des algues. Pour les algues d'échouage, un outil de ramassage efficace est en cours de développement, basé sur un matériel amphibie équipé d'un tapis convoyeur à griffe et drainant. De plus, les algues sont une matière coûteuse à transporter en raison de leur teneur en eau élevée (80-85 %). L'élimination de l'eau peut être effectuée par pressage au moyen de tapis convoyeurs presseurs utilisés pendant la collecte des algues sur le rivage. Ils permettent de laisser l'eau sur la plage et de minimiser le transport de l'eau vers l'usine. Pour un stockage stable et rentabiliser le transport, le séchage est quasi indispensable. A partir de 10 % d'humidité et en dessous, la conservation des algues est excellente sur plusieurs années. S'il est utilisé, le séchage entraîne une forte augmentation du coût de l'ensemble du processus, car l'énergie nécessaire pour évaporer l'eau d'une biomasse contenant 70 à 80 % d'eau est importante. Cela conduit à localiser les usines à proximité des lieux de récolte pour éviter les coûts de transport. Néanmoins, la logistique d'approvisionnement doit aussi être conçue avec précision pour éviter les stockages de matières premières trop importants.

Par ailleurs, dans la plupart des cas les matières premières devront subir une opération de nettoyage pour éliminer certaines impuretés. Par exemple, dans le cas des algues d'échouage, on note la présence de grandes quantités de sable qui peuvent représenter jusqu'à 1/3 de la masse récoltée. De même, le dessalement des algues requiert un lavage à l'eau douce qui entraîne des coûts tant pour l'eau que pour le traitement des effluents riches en sels mais une simple dilution à l'eau douce peut-être suffisante pour permettre un rendement de fermentation adéquate en procédé biologique.

La phase de récolte et de stockage est souvent associée à une étape de densification (tri des constituants, séchage) qui s'opère entre le champ et l'utilisation dans l'usine. Ces opérations peuvent constituer une opportunité pour effectuer un pré-conditionnement (déconstruction, séparation voire fonctionnalisation) des matières premières végétales avant leur utilisation en bioraffinerie. C'est par exemple le cas avec les opérations de rouissage du lin qui permettent la déconstruction enzymatique ou physico-chimique des fibres.

La stabilité des produits au cours du stockage constitue un autre facteur critique d'autant plus important que leur teneur en eau ou leur sensibilité à l'oxydation est élevée. Par exemple, l'acidité des huiles végétales qui varie de 0,5 à 3 % du fait de l'action de lipases lors du stockage des graines constitue un critère déterminant pour le rendement de transformation en biocarburant. De même, la durée de conservation des algues brunes est relativement longue - elles peuvent être stockées à température ambiante pendant des heures voire des jours sans commencer à se détériorer – alors que les algues vertes sont très sensibles à la dégradation microbienne et doivent être traitées immédiatement ou séchées.

#### **5.4.3.2.4. Organisation de la chaîne logistique**

La structuration et l'organisation de la chaîne logistique jusqu'à la bioraffinerie est un autre point crucial.

---

<sup>670</sup> Werner, A. and Kraan, S. 2004. Review of the Potential Mechanisation of Kelp Harvesting in Ireland; Marine Environment and Health Series, No. 17. Galway : Marine Institute and Taighde Mara Teo.



Les chaînes logistiques vont-elles se construire à partir d'industries déjà existantes (amidonnerie, huilerie, sucrerie) qui intégreront progressivement le traitement d'autres organes végétaux jusqu'à la plante entière ou bien les chaînes logistiques vont-elles se structurer à partir de nouvelles ressources de biomasse et quel sera le point d'équilibre et la compatibilité entre ces deux voies de structuration ? A cette question, s'ajoutent deux autres questions relatives à la bioraffinerie : sa localisation (proche ou non de bassins de production) et sa capacité de production.

Dans leur version traditionnelle, de nombreuses agroindustries fabriquent à partir d'organes végétaux particuliers (grains, racines, tiges, ...) un seul produit plus ou moins raffiné (huile, sucre, amidon, éthanol première génération, cellulose, extrait végétal) et des co-produits de valeur inférieure en quantité relativement importante. Ces usines doivent pouvoir intégrer progressivement de nouveaux ateliers leur permettant d'utiliser toutes les parties de la plante et de transformer leurs sous-produits en composés plus élaborés. Aujourd'hui, il existe 3 filières industrielles de valorisation de la biomasse agricole qui connaissent des évolutions profondes en raison des nouveaux produits ou molécules qu'elles cherchent à produire : (i) l'amidonnerie qui développe des molécules de plus en plus nombreuses à partir de l'hydrolyse de l'amidon en glucose, (ii) les unités de biodiesel adossées aux huileries, qui fabriquent des esters et du glycérol dont les dérivés et les applications sont de plus en plus nombreuses et (iii) la sucrerie suit le même schéma de développement.

Le développement des biocarburants va permettre indirectement de soutenir l'essor d'une chimie du végétal qui pourra s'appuyer sur la mise en place d'outils industriels modernes produisant des fractions végétales nouvelles et des commodités chimiques en quantité comme le glycérol et le bioéthanol. Ainsi avec le développement des carburants de seconde génération à partir des pailles, des plantes entières et du bois, le traitement des fractions cellulose, hémicellulose et lignine va ouvrir l'accès à un champ plus grand de molécules d'intérêt par rapport aux agro-industries traditionnelles et aux usines de biocarburants de première génération. Dans ces conditions, on peut penser que de nouvelles raffineries se développeront en parallèle au développement de production de plantes pérennes. Il serait possible d'envisager une organisation territoriale spécifique notamment autour de zones marginales qui pourraient être valorisées par la culture de végétaux à vocation industrielle. De même, les algues permettraient de valoriser de nouveaux espaces tout en présentant l'avantage de limiter les besoins en eau.

Ces considérations tendent à impliquer une localisation des bioraffineries au plus près des bassins de production pour limiter les coûts d'approche. Cependant, une autre typologie semble se dessiner. Elle correspond à des bioraffineries localisées dans les ports (exemple Gand) où pourrait être transformée de la biomasse acheminée par voie maritime en complément de ressources provenant de l'intérieur des terres, ce qui permettrait de garantir un approvisionnement en continu sur des volumes importants. Il semblerait indispensable que ces options industrielles ne soient pas arbitrées sur des critères exclusivement économiques, mais prennent en compte l'ensemble des conséquences environnementales et sociales de l'implantation des usines : impacts sur les territoires jouxtant les usines (emploi, diversification / homogénéisation des assolements, usage de pesticides, habitats pour la biodiversité, ...); impacts à distance (implications économiques, sociales et écologiques du développement de sources d'approvisionnement extra-européennes).

Reste à savoir à quelle vitesse ces bioraffineries vont se développer, quelles quantités seront utilisées, et quels seront les prix proposés aux agriculteurs. Seuls des prix suffisants permettront d'assurer la rentabilité économique des cultures et de garantir un développement de ces chaînes logistiques. Face au défi énergétique et aux nouveaux besoins industriels, la question est aussi de savoir quelle surface agricole sera consacrée à ces nouveaux usages.

### **5.4.3.3. Principaux verrous identifiés**

Il paraît logique d'identifier et adapter d'abord les structures végétales aux exigences du bioraffinage, puis ensuite de mettre au point le procédé qui devrait s'en trouver simplifié, réduisant les coûts de production. Cependant il faut considérer aussi les pas de temps : la mise au point de nouvelles variétés pour les exigences du bioraffinage mais conservant des caractéristiques agronomiques intéressantes va demander plus d'une décennie, en particulier pour les espèces pérennes, délai normalement plus long que la mise au point d'un procédé adapté à une biomasse donnée. C'est pourquoi, il convient de coupler les approches amélioration génétique et génie des procédés même si, à terme, l'obtention de fonctions particulières de la biomasse dépendra dans une large mesure d'innovations génétiques.

Dans cette optique de couplage entre la production des matières premières et leur utilisation en bioraffinerie, plusieurs verrous ont été identifiés :

#### **5.4.3.3.1. Améliorer la processabilité de la biomasse**

Les matières premières potentiellement mobilisables pourront provenir de différentes sources de biomasse : agricoles (plantes annuelles, plantes pérennes dédiées) ; forestières ; ou encore d'autres origines (algues, sous-produits de l'agriculture ou de l'industrie). Ces futures ressources doivent faire l'objet de programmes de sélection et d'amélioration basés sur des critères agronomiques, mais aussi sur des critères de modification de composition / structure (lignines, ...) pour une meilleure dégradabilité. Par exemple, la densification de ces biomasses devrait consister en un broyage suivi d'une séparation. Un critère d'aptitude au fractionnement (broyabilité / séparabilité) pourrait conduire à créer des plantes se réduisant, à moindre coût, en poudres plus facilement utilisables.

La facilité de dégradation de la paroi végétale (cette propriété dépend aussi des enzymes utilisées pour assurer sa dégradation) en lien avec sa composition et son état d'organisation doit être évaluée pour comparer les différentes sources de biomasse, améliorer les ressources végétales et développer des procédés qui permettent d'accroître la réactivité de ces polymères et faciliter ainsi les opérations de déconstruction.

Pour les applications qui reposent sur l'extraction de molécule particulières, la facilité d'accès aux organes contenant ces molécules, ainsi que les structures (micelles, liposomes, etc..) qui les contiennent doivent aussi servir de critères de sélection.

#### **5.4.3.3.2. Assurer la stabilité des approvisionnements des bioraffineries**

Veiller à la sécurité des approvisionnements concerne l'ensemble des débouchés à la fois pour l'alimentation humaine, animale et pour la chimie végétale. Seule une approche systémique prenant en compte les complémentarités et les concurrences entre les différents usages du sol peut permettre de garantir cet approvisionnement. Cette démarche doit s'inscrire dans la durée pour offrir des ressources pérennes à l'échelle de plusieurs décennies. Cela implique de tenir compte des évolutions possibles : changement climatique, stabilité des sols, disponibilité de la ressource en eau, etc.... autrement dit, de la durabilité des systèmes de production de la biomasse (lien avec la tâche 10), tant au niveau de la parcelle que des exploitations et des territoires.

Au stade de la récolte se pose la question d'identifier le moment optimal correspondant à l'optimum technico-économique de la processabilité et de déterminer quel est le taux de matière végétale réellement exportable et la quantité à maintenir sur la parcelle pour assurer sa durabilité. Par ailleurs, l'utilisation de cultures dédiées de biomasse d'origine forestière ou de ressources aquatiques pose aussi

des questions relatives à l'accessibilité aux chantiers de collecte, aux moyens de récolte, de coût de transport ainsi que de réduction des pertes tout au long de la chaîne logistique.

Au niveau du stockage émergent 3 notions : le mélange, la densification et l'évolutivité de la biomasse. L'organisation de la production et de la récolte peuvent conduire à approvisionner simultanément des silos avec plusieurs sources de biomasse. Les questions de compatibilité entre différentes sources de biomasse pourront autoriser un stockage global indifférencié des biomasses ou bien imposeront des lignes de stockage spécifiques pour garantir un approvisionnement stable à l'échelle de l'année de récolte. La réduction de la variabilité de la biomasse *via* des mélanges impose que soient au préalable résolues toutes les questions de mélange / démélange (liées aux différences de densité, de forme,...). Cela ne semble pouvoir être traité qu'après une étape de densification.

La densification de la biomasse constitue elle-même une autre interrogation pour la mise en place des chaînes logistiques : quelle est la méthode de densification adaptée (séchage, broyage, pelletisation, ...) pour réduire les coûts de transports entre le champ et l'usine ? On peut penser que la réduction de la variabilité et des coûts de transport pourrait passer par un étagement du processus de déconstruction de la biomasse.

L'évolutivité de la biomasse constitue un autre écueil pour disposer d'une matière première tout au long de l'année. L'évolutivité correspond à des activités enzymatiques endogènes ou à des activités de microorganismes qui dépendent de la teneur en eau, de la température et de la durée de stockage. Par exemple, dans le cas des huiles végétales, on peut penser réduire leur évolution en modifiant la ressource végétale de telle sorte qu'elle ne produise pas de lipase dans ses graines. A l'inverse on peut aussi chercher à mieux exploiter les activités enzymatiques pour mettre à profit la phase de stockage pour amorcer la déconstruction de la biomasse. Il s'agira alors d'activer et contrôler des réactions enzymatiques permettant soit de modifier la structure du végétal, soit de fonctionnaliser une fraction.

#### **5.4.3.3. Réduire la variabilité de la biomasse**

La réduction de la variabilité de la biomasse végétale représente un objectif important pour en développer son utilisation. Il faut distinguer la variabilité intrinsèque pour une matière première donnée (liée à la variabilité génétique et aux conditions agroenvironnementales) de la diversité interspécifique venant de différentes sources de biomasse. Suivant les applications, il semble possible de concevoir un procédé / une usine espèce-dépendante mais il sera probablement difficile d'aboutir à un approvisionnement mono-source et mono-variétal. Dans ces conditions, il sera nécessaire de définir des seuils d'acceptabilité pour des caractéristiques critiques de la biomasse suivant les applications recherchées (notion de cahier des charges).

L'implantation de bioraffineries au sein de bassins de production conduira à les approvisionner à partir de ressources locales, probablement d'origines diverses. L'exploitation de ces ressources diverses débouche sur la notion de bioraffineries flexibles. Si cela est techniquement faisable, cela se fera probablement au détriment d'un coût énergétique. La prise en compte de ces coûts sera fonction des quantités de biomasse mises en œuvre et nécessitera de prendre en considération les notions de gestion du territoire (dimensions sociologique, économique et agronomique), de rotations agricoles, et aussi d'impact des cultures sur la biodiversité (lien avec la tâche 10).

Alternativement, on constate que la variabilité de la biomasse diminue avec les étapes de déconstruction de la ressource en ses composants élémentaires (glucose, pentoses, protéines, cellulose, ...). On peut donc penser lisser cette variabilité initiale de la biomasse en concevant en amont des bioraffineries proprement dites des unités de déconstruction de la biomasse en ses principaux agro-polymères. Ces

agropolymères pourraient alors rejoindre des unités de plus grosse taille utilisant des procédés plus standardisés. Une telle approche permettrait de densifier, homogénéiser, répartir et distribuer les produits de la biomasse en minimisant les coûts logistiques.

#### **5.4.3.3.4. Fonder des systèmes de production-transformation durables**

L'introduction de la production de biomasse dans les systèmes de production et son impact économique, environnemental et social fait l'objet de nombreuses interrogations. Ces questions sont en particulier abordées dans l'atelier C de l'ARP VégA.

L'incorporation de la biomasse dans les systèmes de culture pose d'abord la question de l'usage des terres et des autres ressources naturelles entre les différents usages. Elle impose d'engager une démarche systémique sur la durabilité des systèmes de production jusqu'à l'utilisation finale des produits avec un double regard à la fois au niveau global (valeur moyenne nationale ou régionale) et au niveau local (exploitation agricole, territoire).

A l'échelle de l'exploitation, la production de biomasse constitue une production nouvelle et pose des questions qui nécessitent l'acquisition de références sur les contraintes, les opportunités et les conséquences de l'insertion de ces productions dans les systèmes de culture actuels et à venir. Il faudra notamment s'assurer que ces productions sont respectueuses de l'environnement à l'échelle locale en prenant en compte d'autres ressources (consommation d'eau) ainsi que des transferts entre les cultures et l'environnement (qualité des eaux, des sols et de l'air) et leur contribution à la biodiversité jusqu'au niveau territorial.

A l'échelle des filières, d'autres questions émergent, notamment celles liées aux arbitrages entre les différentes sources de biomasse. Le choix s'opérera-t-il à partir d'une seule approche économique, qui en sera le prescripteur et sur quel(s) critère(s) (rendement agronomique, processabilité, création de valeur par l'ensemble des produits de la bioraffinerie) ? Quelle sera l'influence réelle des autres critères de durabilité (environnement et société) ? Ceci pose des questions sur la définition d'indicateurs fiables (ACV conséquentielle, modélisations de territoires) et suffisamment précis pour la prise de décision.

Le choix de l'échelle (locale, nationale, mondiale) reste un facteur critique pour l'analyse de la structuration de ces filières. Néanmoins, l'échelon territorial semble indiqué pour aborder globalement la conception d'un système couplé de production et de transformation de la biomasse visant à satisfaire à la fois les besoins pour l'alimentation humaine, l'alimentation animale et pour d'autres usages de la chimie et de l'énergie.

### **Questions de recherche**

#### ***Caractériser les sources de biomasse***

*Analyser et quantifier les fonctions d'intérêt de la biomasse*

- Analyse comparative de l'intérêt des sources de biomasse à produire les fonctions recherchées : quantité et spécificité en tant que source de Food, Feed, Fibre et Fuel ; Analyse de la valeur jusqu'au bout de la chaîne de transformation (co-produits).
- Elaboration d'une BDD pour tenir un inventaire permanent de la disponibilité des ressources et des avantages compétitifs comparés en fonctions du lieu de production, des types de bioraffineries et des usages envisagés.

- Méthodes rapides d'analyse de la composition de la biomasse en vrac (méthodes spectroscopique, analyse d'images, etc.).
- Développer des cultures présentant les fonctions requises *via* l'amélioration génétique ; équilibrer la production de fonctions *via* la mise au point d'itinéraires agronomiques (améliorer l'indice de récolte).

### **Aptitude à la transformation**

*Identifier les facteurs critiques de l'aptitude des biomasses à l'utilisation en bioraffinerie :*

- Amélioration des connaissances de base sur la structure et les propriétés de la paroi végétale, des voies de synthèse et des mécanismes de régulation : connaissance des interactions physicochimiques entre différents composants, résultant de liaisons faibles (non covalentes) et réversibles, responsables des structures supramoléculaires, parois cellulaires notamment, mais aussi localisation concentration d'autres composants.
- Minimisation de ces interactions moléculaires ou macromoléculaires, afin de faciliter les traitements technologiques dans le végétal dès la biosynthèse ou après récolte (activation enzymatique)
- Modifications génétiques par l'introduction de gènes adaptés (voir tâches 6, 7,8).
- Réduction de l'hétérogénéité moléculaire, pour certaines applications (ex : lignine monoconstituant).
- Mettre au point des méthodes de caractérisation de l'aptitude à la transformation :
  - Méthodes à haut débit de screening pour des marqueurs spécifiques de l'aptitude à la déconstruction, par exemple.
  - Méthodes de suivi des modifications structurales au cours du stockage et au cours des procédés.
  - Modèles reliant les propriétés des composés lignocellulosiques et leurs interactions avec les procédés de déconstruction.

### **Organiser et optimiser la chaîne logistique**

*Stabiliser les approvisionnements*

- Améliorer les outils et les conditions de récolte : définition de la date optimale (maturité de la graine / processabilité ? teneur en métabolites secondaires, teneur en eau ?) amélioration des techniques de récolte et taux de récolte (retour au sol).
- Définir à quel stade de la chaîne logistique et suivant quelles modalités doit intervenir la densification de la biomasse pour faciliter les opérations ultérieures de transformation et réduire les pertes logistiques.
- Organisation du stockage : évolutivité / stabilisation de la biomasse, aptitude au mélange de différentes sources de biomasse et formulation de lots, intégration ou initiation de prétraitements contrôlés pour la déconstruction de la biomasse ; est-il possible d'ajuster les conditions de stockage pour initier le déclenchement d'activités enzymatiques endogènes ou exogènes permettant d'initier un pré-fractionnement des matières végétales. Dans ce cas, comment maîtriser la cinétique réactionnelle pour initier la phase de déconstruction au moment opportun et ne pas induire une nouvelle source de variabilité dans les caractéristiques des matières premières ?

*Organisation générale des filières*

- Optimiser la répartition de la production des différentes sources de biomasse agricoles (équilibre plantes annuelles et pérennes), développer l'aquaculture et rationaliser les exploitations forestières et la collecte des déchets agricoles.
- Aide à la conception des cahiers des charges : Dans quelle mesure les procédés de transformation de la biomasse peuvent-ils s'adapter à la variabilité de la biomasse ? Existe-t-il des

seuils qualitatifs et/ou quantitatifs, au delà ou en deçà desquels la biomasse n'est plus utilisable par une bioraffinerie pour des raisons techniques ou économiques ? Qualification des matières premières et aptitude aux différents procédés (combustion / méthanisation / 2ème génération,...).

- Structuration des filières : analyse technico-économique de différents modèles de développement des bioraffineries en lien avec le développement des territoires agricoles : modèle centralisé vs modèle territorial et complémentarités entre ces modèles (ateliers territoriaux de densification et de déconstruction partielle en amont de bioraffineries centralisées). Quelle insertion et quels (des)équilibres avec les autres filières (alimentation humaine et animale) ; moteurs de structuration des filières par l'offre ou la demande ; impact des décisions publiques

- Economie et compétitivité des filières : prix d'intérêt pour l'agriculteur / prix d'intérêt pour la filière par rapport aux sources concurrentes : énergies classiques / autres ressources renouvelables ; contractualisation entre producteurs et transformateurs ; impacts des politiques publiques et pérennité d'une filière dont le développement repose sur des subventions ? compétitivité par rapport à la biomasse importée ; création de valeur en fonction des débouchés et répartition de la valeur entre les acteurs.

### ***Assurer la durabilité des systèmes de production-transformation***

#### *Construire des indicateurs de durabilité pour les filières*

- Mettre au point des méthodes et référentiels consensuels et reproductibles pour l'ensemble de la chaîne de production et de transformation de la biomasse (GES, ACV).
- Introduire d'autres indicateurs (biodiversité) utilisables dans le temps et dans l'espace.
- Passer d'une analyse globale à une analyse locale (territoire) pour assurer une production respectueuse de l'environnement local.
- Mettre en place des essais de longue durée pour des études de durabilité pour différents systèmes de production et pour l'ensemble des filières.

#### *Systèmes de cultures et territoires*

- Identifier et quantifier les facteurs déterminants pour le maintien de la fertilité des sols (potentialités, aptitudes culturales, biodiversité tellurique), dans des systèmes dédiés partiellement ou totalement à alimenter les bioraffineries.
- Identifier les territoires pouvant être consacrés à ces productions (potentialités des terrains, caractéristiques d'accessibilité) et les types d'exploitations susceptibles de les accueillir. Compatibilité avec les contraintes logistiques (récolte et stockage).
- Concevoir et développer de nouveaux itinéraires culturaux économes en intrants pour les cultures de biomasse tout en maintenant la fonctionnalité des sols.
- Conception de systèmes de culture durables pour l'approvisionnement des bioraffineries : cultures associées (ex graminées + légumineuses) ; doubles cultures (ex. triticales immatures puis soja) ; possibilité d'augmenter le taux d'exportation des pailles par l'introduction de couverts végétaux, ....
- Faisabilité et conséquences de l'intégration de la production de biomasse dans les exploitations et dans les territoires

#### *Usages des terres et acceptabilité sociale*

- Evaluer les conséquences d'un changement de finalités des cultures, organisation spatiale des activités agricoles dans les territoires ; déplacement des zones de production à proximité de l'usine (pays du Sud) ? Les systèmes de cultures doivent-ils être dédiés ou polyvalents ? Quel équilibre entre cultures annuelles et pérennes ?
- Evaluer les conséquences des effets directs (ici et maintenant) et indirects (ailleurs et plus tard) de la réallocation des terres ; mettre au point des méthodes d'évaluation.
- Analyser la multifonctionnalité des productions de biomasse, leurs externalités et leurs

contributions au développement des territoires ruraux.

- Elaborer des modèles et des OAD pour comparer à différentes échelles (territoriale et nationale) les filières de production et de transformation de biomasse prenant en compte des différents besoins (alimentation humaine, animale, énergie, autres usages).
- Compatibilité entre les notions de développement durable, sécurité alimentaire et production de biomasse ; complémentarité et hiérarchisation entre les usages ; définition d'une taille critique de bioraffinerie.
- Possibilité d'utiliser la biomasse pour la remédiation de sols pollués.
- Identifier les éléments clefs d'acceptabilité sociale, de décision et de financement de ces filières .

#### 5.4.4. La gestion de la complexité

##### 5.4.4.1. Complexité de la conception

Dans les travaux de l'ARP VegA, les produits biosourcés sont des produits énergétiques et industriels issus du végétal dont les usages portent sur l'énergie, la chimie organique et les biomatériaux. La bioraffinerie a pour vocation de produire ces produits biosourcés pour répondre à une demande industrielle ou d'usage. Le champ des possibles est évidemment très vaste et une approche rationnelle de cette diversité est nécessaire, pour passer sans prendre trop de risques du traditionnel à l'innovant.

###### 5.4.4.1.1 Etat de l'art

Les schémas proposés (US.DOE) sont toujours complexes parce qu'ils prennent en compte toutes les possibilités offertes par les biotechnologies et la chimie pour valoriser un gisement de biomasse. Une simplification de ses schémas est possible selon deux scénarii :

- Le scénario « économique » : à partir d'une demande en produits (marché), identifier les filières les plus performantes (par exemple, faut-il mieux utiliser la betterave, le blé ou le maïs pour produire de l'éthanol ?).
- Le scénario « chimique » : à partir d'un gisement, identifier des meilleures valorisations possibles (par exemple, que doit-on produire à partir du maïs ?).
- 

Dans les deux cas, ce sont les évaluations technico-économiques qui permettent, *in fine*, d'obtenir les meilleurs choix, soit de la ressource et de son approvisionnement, soit des technologies à mettre en œuvre. Dans le futur, l'évaluation technico-économique sera accompagnée d'analyses de cycles de vie dans lesquelles sont prises en compte les exigences environnementales actuelles et futures, l'acceptabilité sociale et les risques industriels.

Les évaluations technico-économiques peuvent concerner des procédés totalement nouveaux ou de nouvelles configurations de procédés anciens, par exemple ceux de la raffinerie pétrolière. Ces études devraient permettre de conclure à la faisabilité technique, économique, environnementale et sociétale des procédés de la bioraffinerie, notamment avec l'aide de la programmation linéaire<sup>671</sup>, qui permet d'identifier les enchaînements de procédés pertinents et d'intégrer les technologies les plus récentes ou en développement.

---

<sup>671</sup> Favennec J-P., Le raffinage du pétrole, tome 5, exploitation et gestion de la raffinerie, Editions Technip, 1998 .

Les analyses de cycles de vie « biocarburants » ont fait, quant à elles, l'objet de nombreuses publications récentes (Renewable & Sustainable Reviews) et de normes (ISO, 2006).

Les études de bioraffineries pourraient s'inspirer des travaux réalisés dans le cadre de l'ANR pour les bioénergies. Le projet ANABIO (PNRB/ANR 2005) a permis de mettre en place une méthodologie qui est utilisée dans les études de cas du projet BIOMAP (Bioénergie/ANR 2008).

La figure 22 schématise la méthodologie d'élaboration d'une étude de cas. Le tableau 53 indique les paramètres à prendre en compte.

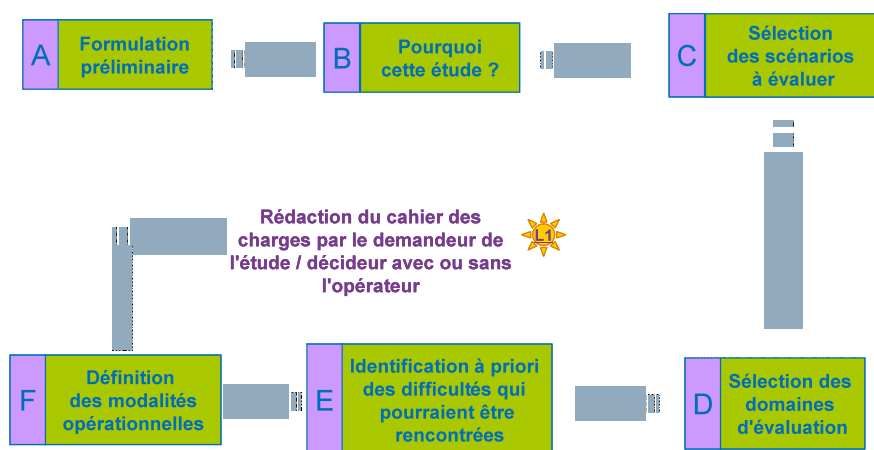


Figure 24: Formulation de la question et sélection des filières à évaluer

Tableau 53 : Domaines et critères d'évaluation

<b>Domaines et critères d'évaluation</b>					
	<b>Environnemental</b>	<b>Technique</b>	<b>Économique</b>	<b>Social</b>	<b>Risques</b>
	Epuisement des réserves naturelles	Développement de la technologie et structuration de la filière	Coût de possession	Effet emploi de la filière	Risques industriels
	Consommation d'eau		Externalités	Acceptabilité sociale	Risques liés au transport routier
	Contribution à l'effet de serre				
	Destruction de la couche d'ozone	Energie primaire totale consommée	Coûts / bénéfices pour le décideur		
	Formation d'oxydants photochimiques				
	Potentiel d'eutrophisation	Ressource biomasse consommée			
	Potentiel d'acidification				
	Toxicité humaine	Valorisation des déchets			
	Ecotoxicité				
	Déchets solides	Aménagement du territoire			
	Impacts sur la biodiversité				

La multiplicité des matières premières mobilisables, des procédés de conversion et produits en sortie est finalement assez comparable à celle d'une raffinerie de pétrole. La gestion de cette complexité passe par la transposition et l'adaptation des méthodologies développées pour les raffineries et plus récemment pour les biocarburants.



La spécificité de la biomasse réclame cependant une analyse à l'échelle locale, au cas par cas, en particulier en prenant en compte la disponibilité réelle d'une biomasse (nature, quantité et coût) à proximité de l'usine envisagée. Cette analyse permet d'évaluer les capacités de production et les coûts de revient des produits biosourcés et de les comparer aux demandes et aux prix du marché.

En pratique, le concept de bioraffinerie se développe principalement autour des unités de production de biocarburants ou d'intermédiaires de fort volume (sucre). Un bon exemple français est le complexe agro-industriel des Sohettes, à Pomacles.

Le projet BIOMAP (coordination A. Prieur, IFP) fournit un exemple d'approche globale. Ce projet vise à appliquer la méthodologie d'analyse environnementale et socio-technico-économique développée dans le projet ANABIO (PNRB 2005) sur des études de cas couvrant un large spectre des applications bioénergies possibles. Les problématiques suivantes sont ainsi étudiées :

- A l'échelle et du point de vue de la région Champagne Ardennes, quelle est la meilleure valorisation énergétique de la ressource en biomasse lignocellulosique ?
- Où en France sera implantée la première unité de production de BtL ?
- Au-delà des impacts environnementaux, quels sont les impacts sociétaux et les impacts sur la sécurité des filières biocarburants en développement actuellement ?
- A l'échelle d'une collectivité locale ou régionale, quelle est la meilleure valorisation possible des déchets urbains et industriels, en tenant compte des impacts en termes d'acceptabilité sociale et de risques associés à cette valorisation ?
- Quels sont les impacts d'un passage aux biocarburants dans une flotte captive ?
- Quelles sont les meilleures options en matière de cogénération (taille de l'unité, technologie – combustion ou gazéification –, types d'intrants, besoins en chaleur) ?
- Quels sont les impacts de l'importation de biomasse pour la production de bioénergie ?

#### **5.4.4.1.2 Principaux verrous identifiés**

##### ***Gérer la diversité des biomasses potentiellement disponibles et celle de la multitude des produits cibles potentiellement accessibles à partir d'une biomasse donnée***

La présence et la préservation de la fonctionnalité recherchée dans la matière première ou dans une fraction de cette dernière est évidemment l'un des déterminants du choix de l'ensemble biomasse-procédé-produit. A l'opposé, le choix du procédé permettant de conférer les propriétés requises à une fraction donnée fait aussi partie des déterminants pour ces choix stratégiques. Pour ne pas aboutir à un « faux optimum », l'adéquation biomasse-procédé-produit doit se raisonner dans un cadre global qui comporte un volet environnemental (par exemple, critérisation par des ACV) et territorial, ce qui nécessite l'apport de compétences socio-économiques.

##### ***Favoriser l'innovation dans les filières de transformation des agroressources***

Les activités, les réseaux professionnels et les connaissances concernées par la valorisation et la transformation des agro-ressources sont historiquement réglés au sein de 2 familles de filières non connectées entre elles : d'un côté les filières agro-industrielles classiquement dédiées aux produits alimentaires, d'un autre côté des filières pétrochimiques. Le développement des filières non alimentaires ne peut s'opérer sans une meilleure coordination portant sur les activités, les réseaux professionnels et les connaissances, entre d'une part les acteurs de la transformation industrielle et des marchés de produits transformés, et d'autre part les acteurs qui sont du côté de la matière première. Le développement de cette coordination, qui implique de mettre en relation des territoires agricoles, des techniques de transformations et des marchés constitue un défi majeur, qui concerne de nombreux

acteurs : comment, par exemple, les concepteurs de nouveaux produits ou procédés dans les industries des biomatériaux, de la pétrochimie, du textile constituent-ils des relations avec les acteurs qui conçoivent et développent de nouveaux systèmes de culture orientés vers une valorisation non alimentaire ? Quelles propriétés attendues en bout de chaîne pourraient être acquises dès le champ et comment ces propriétés conditionnent-elles le type de procédé de transformation et la recherche sur ces procédés ? Quels nouveaux marchés sont prospectés par les industriels et comment les acteurs de la production peuvent-ils orienter leurs pratiques selon ces marchés ? Comment, inversement, les acteurs de la production contribuent-ils à la spécification d'agroressources porteuses de potentiels de développement nouveaux ? Plus de 20 années de travaux en sciences sociales sur l'innovation et sa gestion démontrent que l'innovation n'est pas un phénomène linéaire et que les régimes de production de connaissances scientifiques et techniques qui transforment le monde sont ceux qui s'insèrent dans la rencontre de nouveaux usages et de nouvelles contraintes.

## Questions de recherche

### ***Adéquation biomasse-procédé-produit***

Trouver la bonne adéquation biomasse-procédé-produit est une véritable question de recherche dans le domaine méthodologique : il convient de mettre au point des méthodes permettant d'objectiver les choix, tenant compte de la complexité du problème, en s'inspirant de l'existant dans l'industrie chimique.

Mais il faut intégrer aux contraintes de production, les propriétés des composants et les demandes du marché pour des caractéristiques spécifiques de la bioraffinerie :

- disponibilité de la matière première (faisabilité agricole),
- propriétés de la matrice végétale (composition chimique, structure native à conserver ou non, fonctionnalités des polymères ...),
- préservation ou modification volontaire des caractéristiques de chaque fraction,
- performances environnementales.

Cette recherche peut se faire soit en partant de l'amont (une biomasse disponible dans une région donnée), soit de l'aval pour la satisfaction d'un besoin exprimé par le marché (produire un biocarburant), mais dans les deux cas il faudra rechercher des usages pour l'ensemble des produits de la biomasse-ressource et donc pas seulement pour un produit prépondérant.

Les recherches sur l'adéquation biomasse-procédé-produit doivent aussi comporter un volet environnemental global (par exemple, critérisation par des ACV) et doivent aussi adresser la question de l'impact du « grain » d'étude : usine et son bassin d'approvisionnement, région agricole pouvant comporter plusieurs bioraffineries différentes, procédé général et matières premières associées et conséquences au niveau national et international.

Les éléments suivants pourraient donner lieu à des programmes de recherches spécifiques:

- optimisation de l'approvisionnement : disponibilité, logistique et coût.
- optimisation du schéma de la bioraffinerie par programmation linéaire.
- calcul des coûts de production.
- affectation des coûts aux différents produits.
- affectation des émissions aux différents produits.
- impact du « grain » d'étude sur les conclusions.

### **Optimiser les aspects logistiques par des pré-fractionnements locaux**

La faible densité des matériaux qui constituent la biomasse ligno-cellulosique et leur répartition sur de vastes territoires sont des obstacles non négligeables pour la mise en place de grosses unités de transformation centralisées, notamment dans le cas des biocarburants. Plutôt que de transporter la matière première sous forme native ou grossièrement hachée, moyennant des coûts élevés, on voit tout l'intérêt qu'il y aurait à réaliser sur les lieux de récolte, ou à proximité, au minimum le broyage fin, voire le tri des particules, pour ne transporter que des matières condensées et classées, en utilisant les moyens logistiques de filières déjà largement implantées comme par exemple ceux de la filière « grains ».

Ceci nécessitera la rédaction d'un cahier des charges pertinent, la mise au point de technologies de fractionnement « de terrain » robustes, performantes et fiables, peu onéreuses et enfin le développement d'équipements légers de micronisation et de séparation, éventuellement mobiles, pour travailler au plus près de la source.

### **Gérer la « supply chain »**

Cette question est en interaction avec les précédentes puisqu'elle s'intéresse aux aspects logistique, taille des unités de production, performance environnementale globale, positionnement dans les territoires, etc... Elle remonte aussi en amont vers les questions posées par la production, la récolte, le transport et le stockage puisqu'elle peut intégrer très en amont le choix de la semence et gérer le semis pour viser un approvisionnement régulier durant la période de récolte, comme le fait aujourd'hui le secteur de la conserverie / congélation de légumes.

A court terme, il faut pouvoir utiliser les ressources végétales existantes, ce qui impose de développer des bioraffineries flexibles. C'est techniquement faisable mais le coût énergétique et environnemental que cela impose doit être pris en compte. On peut accepter une certaine variabilité de la biomasse si les quantités en jeu sont importantes (coût de la flexibilité trop important pour des petits volumes).

De façon plus générale, si l'amont simplifie le travail de l'aval, il est nécessaire de disposer de méthodes permettant une juste rétribution de la qualité de la biomasse (ou de critères pour pénaliser la moindre qualité), comme cela se pratique actuellement. Les questions de recherche qui en découlent sont de nature socio-économique : mesure de l'apport de valeur ajoutée de chaque étape, prise en compte des notions de gestion du territoire (dimensions sociologique, économique et agronomique), de rotations agricoles, mais aussi d'impact sur l'environnement et sur la biodiversité (lien avec la tâche 10). Ce type de question se décline aussi de façon majeure dans le cas des biomasses pérennes (*miscanthus*, TCR), pour lesquelles les choix réalisés ont des conséquences sur plusieurs années.

### **Management de l'innovation**

- Produire des connaissances scientifiques utiles pour l'action sur les dispositifs de gestion et sur les mises en réseaux nécessaires à l'innovation dans le domaine de la valorisation non alimentaire de la production agricole. Analyser les réseaux et dispositifs de gestion des processus d'innovation et le rôle que jouent, dans ces réseaux et dispositifs, les compétences et les savoirs d'organisation.
- Contribuer ainsi (i) à aider le monde agricole et le monde industriel à coupler leurs ambitions au sein de champs d'innovation en émergence, (ii) à éclairer le débat public et les controverses sur les enjeux territoriaux et agro-industriels du développement des bio-ressources, (iii) à aider les chercheurs biologistes, agronomes et technologues à mieux appréhender les modalités de valorisation de leurs avancées scientifiques et à définir les nouvelles questions scientifiques à explorer.

#### 5.4.4.2. Complexité du fonctionnement

Un deuxième type de complexité se situe dans le contexte du fonctionnement d'une bioraffinerie. Dans ce cas, la gestion de la complexité consiste à faire fonctionner l'ensemble de la bioraffinerie de façon efficace :

- maintien du niveau de production.
- maintien de la qualité.
- adaptation de la production à la demande.
- adaptation de la production à la matière première.
- 

Dans la réalité de la transformation d'une biomasse diversifiée, de caractéristiques variables, de production concentrée dans l'année, ces objectifs simples à énoncer cachent en fait une réelle complexité. De ces objectifs, on peut dégager quelques verrous et questions de science associées.

##### 5.4.4.2.1. Principaux verrous identifiés

###### *Variabilité en composition de la biomasse*

La variabilité de la biomasse est mesurée par des indicateurs définis selon les espèces et les applications, sur chaque livraison de matière première. Par exemple :

- dans le cas de la bioraffinerie de Bazancourt, le blé est contrôlé selon 3 critères : la MS, la teneur en protéines et en amidon.
- dans le cas d'amidonnerie, le contrôle porte sur le choix de la variété (certaines variétés répondent au cahier des charges et d'autres non) et sur des critères rhéologiques.
- 

L'acidité des huiles végétales, qui varie de 0,5 à 5 % et plus du fait de l'action de lipases lors du stockage des graines, est un critère qui permet d'évaluer le rendement de transformation en biocarburant pour les procédés les plus simples, mais la catalyse hétérogène permet de contourner cet écueil. Les méthodes d'analyse doivent être simples, fiables et rapides, et porter sur des critères corrélés avec la processabilité de la biomasse.

Comme déjà indiqué (cf paragraphe 3.3) l'hétérogénéité de la ressource végétale devrait diminuer avec sa déconstruction. En effet, la déconstruction gomme la variabilité en transformant une ressource en ses composants élémentaires (glucose, pentoses, protéines, cellulose, ...).

A défaut d'avoir envisagé une limitation en amont de la variabilité, par sélection génétique ou grâce à des itinéraires culturels adaptés, on peut chercher à limiter l'impact de la variabilité de la biomasse en associant des matières premières provenant de sources d'approvisionnement différentes (mélanges de biomasses aux caractéristiques différentes). Les procédés peuvent également lisser la variabilité de la biomasse, en particulier en tête de chaîne. A l'extrême, l'on pourrait concevoir en amont des filières, des petites unités de transformation de la biomasse jusqu'au stade d'intermédiaire de plus gros volume, stade où la variabilité de la matière première ne se fait plus sentir : exemple de la cellulose dans l'industrie papetière ou du glucose en amidonnerie. Les procédés en aval sont en revanche plus standardisés. Dans le cas des huiles végétales, on peut réduire la variabilité liée au stockage (acidification) en modifiant la ressource végétale de telle sorte qu'elle ne produise pas de lipase dans ses graines.

## ***Variabilité de la biomasse dans le temps***

Par rapport aux matières premières fossiles ou minérales, la saisonnalité de la matière première végétale induit des verrous particuliers :

- Comment passer des pics de production saisonnier (récolte) à un flux matière réparti sur l'année ?
- Comment évoluent les caractéristiques de la matière première et quel est l'impact des variabilités annuelles sur la qualité des produits et services obtenus ?
- Choix entre procédé optimisé et procédé flexible (adaptation de la production à la demande) ?
- Choix entre procédé optimisé et procédé robuste (production ininterrompue en dépit de la variabilité de la matière, en dehors de quelques semaines de maintenance par an) ?

## **Questions de recherche**

### ***Gérer la variabilité de composition d'un approvisionnement en biomasse***

La gestion de la variabilité passe par des méthodes de mesure rapides, et si possible en ligne, d'une ou plusieurs caractéristiques corrélées avec la processabilité de la biomasse et avec la valeur finale du produit obtenu (analogie avec la teneur en protéine et en matière grasse du lait). Ces méthodes d'analyse doivent faire l'objet de développement méthodologique car on ne connaît ni les grandeurs à mesurer, ni des méthodes rapides pour accéder à ces grandeurs. Par exemple dans le cas des ligno-celluloses : quel critère biochimique (ou autre) mesurer pour évaluer la processabilité d'une ressource ligno-cellulosique ?

Du point de vue du procédé, il est nécessaire de réaliser des recherches pour définir des seuils d'acceptabilité pour des caractéristiques critiques de la biomasse, selon les applications, ainsi que les réglages de procédé à adapter pour le rendre performant sur toute la plage acceptable. L'effet que la variabilité et les modifications de réglages de procédé induisent sur les co-produits est aussi à préciser dans ces recherches.

La variabilité peut aussi être limitée en amont, via la sélection génétique et les itinéraires culturaux. Ceci renvoie des questions de recherche vers les autres tâches de l'ARP, notamment les tâches 6 et 8. Elle peut aussi être limitée grâce aux phases de prétraitement, stockage, transport de la biomasse en vue d'obtenir un produit « standard » et pérenne, disponible toute l'année. Cela renvoie aux questions de recherche correspondantes, plus haut dans ce document.

### ***Contrôle-commande des procédés de bioraffinerie***

Le principe serait de mettre en place une stratégie d'anticipation dans le fonctionnement de l'ensemble des opérations, grâce à deux domaines complémentaires :

- contrôle non-destructif (ou au moins contrôle en ligne) appliqué de façon massive à toutes les étapes de la transformation, pour une vision claire de l'état et de l'évolution de l'ensemble du système de transformation
- modélisation douée de prédiction, donc capable d'anticiper, à intégrer dans le contrôle des opérations.
- 

Du point de vue méthodologique, ceci se rapproche de travaux similaires menés dans les industries agro-alimentaires.

### **Donner de la flexibilité aux procédés**

Par rapport à des conditions aux limites fixées, un système dont la configuration géométrique et temporelle est figée n'aura qu'un jeu de conditions opératoire optimale. On peut envisager de lui donner plus de flexibilité en le concevant de telle façon que sa zone de travail sub-optimale soit la plus plate possible. On peut aussi penser à introduire des degrés de liberté supplémentaires dans le système en jouant sur les flux matières, les temps de séjour, ou la géométrie du système pour assurer leur compatibilité en dépit de la variabilité de la biomasse ou pour ajuster les différentes sorties produits en fonction des besoins. Par exemple :

- jouer sur le niveau de fragmentation (granulométrie plus fine = plus de temps et d'énergie dans l'étape fragmentation et moins de temps et d'énergie dans les étapes réacteurs, qu'ils soient chimique, thermique ou enzymatique)
- jouer sur l'activation thermique des procédés physico-chimiques pour ajuster le temps et le coût de certaines opérations
- jouer sur les durées et/ou conditions opératoires pour ajuster les différents flux de produits (par exemple énergie/biomatériaux)
- jouer sur la géométrie ; sans aller forcément jusqu'à la microfluidique, une question de recherche serait : en faisant un recours massif au contrôle en ligne, pourrait-on imaginer des cheminements différents comme moyen de traiter la variabilité à production finale identique (via des réacteurs de petite taille en parallèle avec des conditions opératoires adaptées aux caractéristiques individuelles des différents flux).

### **5.4.5. Conclusions**

Les questions de recherche que soulèvent la transformation des matières premières d'origine végétale dans les bioraffineries ont été structurées selon trois catégories : (i) adaptation des différents végétaux aux procédés, (ii) opérations préliminaires de récolte / transport / stockage, et (iii) gestion de la complexité des combinaisons disponibles.

Ces questions ne peuvent pas être considérées indépendamment les unes des autres, sur la seule base d'opportunisme disciplinaire. Compte tenu des pas de temps respectifs (au moins une décennie pour les espèces pérennes, quelques années pour adapter un procédé), il convient de mener une double démarche de recherche : adaptation des végétaux aux procédés et, en parallèle, adaptation des procédés aux caractéristiques actuelles des espèces végétales.

Les étapes de production, récolte, transport et stockage, qui relèvent de la mobilisation de la ressource végétale, introduisent des contraintes spécifiques, mais sont aussi porteuses d'opportunités. L'enjeu est de les étudier de manière conjointe à l'adéquation biomasse/procédé, de façon à identifier les opportunités et à lever les contraintes par une approche intégrée d'analyse fonctionnelle.

Pour structurer et explorer le champ des possibles que recouvrent le concept de bioraffinerie et de transformation non alimentaire d'espèces végétales nouvelles ou à optimiser pour de nouveaux usages, il faut se donner comme objectif d'utiliser des outils modernes de gestion et de modélisation des connaissances, de façon à cibler les zones de progrès à court et moyen terme.

### **5.5. Analyses socio-économiques : des systèmes de production aux marchés internationaux**

Le champ de réflexion porte sur les produits biosourcés au sens large et pas exclusivement sur les

usages énergétiques de la biomasse. Les produits biosourcés sont définis ici comme les produits énergétiques et industriels issus du végétal hors des domaines de l'alimentaire et de la santé, dont les applications portent à la fois sur l'énergie (combustibles et carburants), la chimie organique et les biomatériaux, fabriqués directement ou indirectement à partir de biomasse. Il peut s'agir de produits nouveaux ou novateurs comme de produits conventionnels déjà existants.

Dans un contexte de diversification des ressources, la biomasse offre de larges perspectives d'applications de par sa diversité et son potentiel de disponibilité. La biomasse peut conduire à une valorisation énergétique ou à une valorisation chimique, soit en termes d'intermédiaires, soit en termes d'applications particulières telles que celles des biomatériaux. Dans la majorité des cas, le pilotage se fait par « l'offre » en biomasse. Cette approche est satisfaisante mais peut être une limite au potentiel de développement des produits ex-biomasse et n'engage pas à se pencher sur des ressources prospectives. Le travail ici proposé dans le cadre de l'ARP se fait *a contrario*, c'est à dire en pilotant par le besoin et les attentes, tant de l'industrie que de la société, en s'appuyant sur une approche prospective (mais néanmoins réaliste) et en étudiant les conséquences engendrées sur les besoins en biomasse.

La présente tâche est centrée sur les analyses socio-économiques liées au développement de nouvelles filières biomasse non alimentaires. L'objet est de cibler de nouveaux axes de recherches disciplinaires liés au développement de ces filières tout en restant cohérents avec les objectifs globaux de l'ARP visant à s'appuyer sur une approche prospective.

La notion de polyvalence a été choisie par les membres du groupe de travail pour structurer sa réflexion. La première section de ce document définit et développe cette notion et suggère des pistes de recherche qui sont développées dans les sections suivantes. Un premier champ de recherche, présenté dans la section deux est celui d'un approfondissement de la notion de polyvalence et de ses implications méthodologiques. Cette section est transversale à l'ensemble de ce document. Les pistes de recherche liées à la polyvalence des filières produits biosourcés sont ensuite traitées spécifiquement. Les sections trois et quatre offrent respectivement une discussion de la question de la polyvalence par une approche sur les effets structurants de la ressource (gestion et utilisation) et de la transformation (processus technologiques et organisation). Enfin, la section cinq développe une approche par les acteurs permettant de repositionner la question de la polyvalence dans des dimensions dynamiques et fonctionnelles, tant dans la relation entre acteur au sein des filières, qu'au sein des territoires. La conclusion offre un essai de synthèse des pistes de recherche, croisées avec le travail effectué parallèlement sur les scénarios.

### **5.5.1. La polyvalence économique des filières produits biosourcés : pistes de recherche**

Par cette réflexion sur la polyvalence économique nous nous proposons d'établir une base conceptuelle pour les analyses socio-économiques liées au développement de nouvelles filières produits biosourcés. L'objectif est de contribuer à clarifier dans quelle mesure ces filières présentent des spécificités qui les distinguent des filières agro-alimentaires et industrielles afin de cibler des questions de recherche pertinentes liées à leur développement. Nous posons dans un premier temps les éléments de la problématique de la polyvalence économique des filières produits biosourcés à partir d'un état de la littérature. Dans une deuxième partie, nous proposons des éléments de réflexion pour construire une approche de la polyvalence des filières produits biosourcés susceptibles de générer des pistes de recherche pertinentes. Ces pistes de recherche sont présentées en troisième partie et sont reprises et approfondies dans les sections suivantes de ce document.

### 5.5.1.1. Éléments de problématique

La mise en place de nouvelles filières utilisant la biomasse comme matière première pour produire une grande variété de produits, *via* une diversité de procédés de transformation, pose t'elle des questions nouvelles aux niveaux social, environnemental, économique et politique ? Si certaines sont propres au développement de toute nouvelle filière, d'autres sont plus spécifiques aux produits biosourcés. Quelles sont les nouvelles questions de recherche posées par l'émergence de ces nouvelles filières ? Quelles sont celles qui relèvent de champs d'intervention plus classiques, relatifs à toute filière ?

#### ***La notion de polyvalence***

La notion de « polyvalence » semble être une des spécificités des filières produits biosourcés. En effet, ces filières sont appelées à se développer dans un contexte de substitution et de compétition directe avec des filières existantes et déjà solidement établies (énergie fossile, biochimie de synthèse) ou en développement (solaire, hydraulique, éolien). Elles entrent également en compétition indirecte par les ressources nécessaires à leur développement avec d'autres filières, que ce soit pour la terre (compétition avec la production agroalimentaire) ou le capital (allocation des ressources, immobilisation d'actifs). Dans ce contexte, la viabilité des filières produits biosourcés est directement liée à leur adaptabilité, à leur flexibilité. L'idée de polyvalence, qui est discutée dans la partie suivante, est que des filières fonctionnant à partir de ressources et de processus de transformation flexibles présenteraient une résilience (au sens de capacité d'absorption des chocs externes) forte et donc des options préférentielles pour des investissements publics pour un développement durable.

#### ***« Etat de l'art » sur la polyvalence et les filières produits biosourcés***

Généralement la polyvalence est associée à l'emploi et au travail salarié, en référence à des compétences individuelles (notion de poly-compétence). La polyvalence des entreprises que l'on trouve également dans la littérature renvoie à l'idée d'une diversification ou d'une pluriactivité, soit par élargissement de la gamme des produits, soit par l'entrée dans d'autres secteurs en particulier l'entrée dans le tertiaire pour les entreprises productrices de bien ou les entreprises de transformation. La notion de polyvalence stratégique est, elle, présente dans un certain nombre d'écrits mais fait référence la plupart du temps à l'organisation du travail au sein de l'entreprise<sup>672</sup>.

Il existe de fait très peu de travaux sur la question de la polyvalence, des produits biosourcés et des filières<sup>673</sup>. On trouvera une rare référence à une polyvalence d'utilisation concernant le taillis à courte rotation fournissant à la fois des produits ligneux, de l'énergie et des services<sup>674</sup>. En soi, cette situation constitue un appel à approfondir un champ de recherche novateur.

La littérature ne permettant pas d'établir les bases de clarification du terme, nous partons des définitions

---

<sup>672</sup> Metais, E. Comment dépasser le débat entre approche par les ressources et approche par l'industrie : vers la notion de polyvalence stratégique. Retrieved mars 2010, from <http://www.strategie-aims.com/ecp99/AIMS/notices/papiers/metais.pdf>

<sup>673</sup> Lozier, F. and E. Sulzer (2006). Tension entre spécialisation des entreprises et polyvalence des opérateurs : le cas de la plasturgie. *Revue Internationale sur le Travail et la Société* 4(2): 58-74.  
Madureira, L., M. Rambonilaza, et al. (2007). Review of methods and evidence for economic valuation of agricultural non-commodity outputs and suggestions to facilitate its application to broader decisional contexts. *Agriculture Ecosystems & Environment* 120(1): 5-20.

<sup>674</sup> Brac de la Perriere, N. and M. Daniel (2008). Etude sur la pertinence de l'implantation d'une filière de taillis à courte rotation dans le Rhône. Villeurbanne (FRA), HESPUL - *Energies Renouvelables et Efficacité Energétique*: 109.



suivantes du terme polyvalent :

- a) Qui est efficace dans plusieurs cas différents.
- b) Qui offre plusieurs usages possibles.
- c) Qui possède des capacités variées.

### 5.5.1.2. Eléments de réflexion

La réflexion conduite par le groupe de travail sur la question de la polyvalence amène à considérer l'expression de cette dernière en termes de ressources, de transformation, d'utilisation et d'acteurs. A partir des définitions données précédemment, il est possible de faire émerger une problématique de la polyvalence des filières, problématique pouvant être à la fois source de pistes de recherche originales sur la spécificité des filières produits biosourcés et cadre pour positionner des thématiques de recherche pertinentes et spécifiques à la question de l'émergence de ces filières.

#### ***La polyvalence de la ressource***

Elle est liée à la possibilité de développer des filières énergétiques alimentaires, biochimiques à partir d'une même plante/espèce. Une ressource polyvalente pourra donc être « multi-usage » du fait de la diversité des produits fournis, « exploitable », au sens de l'efficacité de son utilisation et « adaptable » par sa capacité à produire dans des conditions de milieu variées.

Une notion d'échelle ou de degré de polyvalence doit être associée à ces dimensions, en particulier mais pas exclusivement, à la question de l'usage. Un premier niveau de polyvalence multi-usage peut être établi selon que la ressource pourra ou non être destinée à des usages alimentaires et non alimentaires. Un second niveau de polyvalence est à prendre en compte pour une même ressource offrant une molécule susceptible d'alimenter des filières différentes ou encore plusieurs molécules différentes.

Cette notion de degré doit être de plus associée à celle de compétition / substituabilité *versus* complémentarité. Au premier niveau de polyvalence, une compétition directe sur la ressource est possible entre transformation agro-alimentaire et bioraffinage. C'est le cas de la canne à sucre. Le sorgho sucrier illustre au contraire une complémentarité entre usages de la plante permettant le développement simultané de filières alimentaires et produits biosourcés. Au deuxième niveau de polyvalence (entre usages comme bioproduit) on trouve également la possibilité de complémentarités ou de compétition. Si une ressource produit une molécule pouvant donner des produits finaux différents selon les techniques de bioraffinage (exemple: les fibres de cellulose du bois pour la pâte à papier et la cellulose du bois pour l'éthanol), il y a compétition sur la ressource. Lorsque qu'une même ressource produit des molécules à usage différent (la valorisation de coproduits et quasi systématique pour la plupart des ressources) à partir desquelles peuvent se développer des procédés et produits finaux différents (huile végétale / tourteaux, bois d'œuvre / bois d'industrie ou énergie sur TCR etc.), il peut y avoir soit compétition soit complémentarité selon que les procédés de transformation sont ou non compatibles.

De fait, la polyvalence de la ressource peut entraîner un risque pour les différentes filières qui se construisent sur elle en raison par exemple de l'évolution des prix relatifs de la ressource sur les différents marchés si l'extraction d'une des molécules empêche l'extraction des autres. Cette question renvoie alors à la polyvalence du processus de bioraffinage.

Pour compléter cette analyse de la polyvalence multi-usage de la ressource, il est nécessaire de ne pas limiter la notion d'usage à celle de produit au sens physique et d'y intégrer les services. On peut notamment intégrer les services environnementaux des forêts et plus généralement ouvrir l'analyse à la

thématique de la multi-fonctionnalité des forêts.

La polyvalence de la ressource dans sa dimension « adaptabilité » recouvre notamment la sensibilité aux phénomènes extérieurs principalement climatiques et écologiques (plantes très sensibles à « résilientes », voire hors sol), le lien au sol / milieu: besoins en eau, en intrants qui renvoient à des niveaux de contrainte ou exigences, en matière de sol, eau et climat (ubiquiste *versus* spécialisées).

La polyvalence par l'efficacité est liée à une variabilité qualitative: régularité ou stabilité des caractéristiques physico-chimiques de la ressource, dégradabilité des produits recherchés dans la plante, au facteur de risque environnemental et/ou sanitaire intrinsèque au produit (allant de inoffensif à extrêmement dangereux).

Ce cadre induit une question de recherche novatrice quant à l'effet structurant des caractéristiques de la ressource et de ses modalités de gestion ou de production sur les choix techniques et organisationnels de la transformation (voir section 3).

### ***La polyvalence des processus de transformations***

C'est la possibilité d'opérer des processus de transformation dans des conditions d'offre et de demande variables ou incertaines. Là encore une réflexion sur la polyvalence à partir des définitions retenues (multi-usages, efficacité et adaptabilité) est pertinente.

Des capacités variées (adaptabilité) renvoient à des processus de transformation assurant ou non une continuité dans la fourniture de molécules en dépit de variations possibles dans l'origine de la ressource, dans sa saisonnalité ou sa qualité. Cela comprend la possibilité de combiner plusieurs voies de transformation simultanément ou dans le temps (exemple) mais aussi les contraintes d'implantation, accès au réseau de transport / distribution, sur mesure ou encore l'intensité capitalistique, par exemple la possibilité de reconversion d'équipements existants. Ces questions renvoient à la notion de spécificité des actifs qui est une piste de recherche potentielle dans le cadre d'une réflexion globale sur la polyvalence des filières produits biosourcés.

En terme d'efficacité, la polyvalence de la ressource fait écho aux exigences de la transformation (besoins en eau, énergie, ressource, seuils minimums de fonctionnement,...) mais aussi au degré de maîtrise: de non maîtrisé (pas d'échéance envisagée), non optimisé (opérationnel à 5 à 10 ans), à opérationnel.

La polyvalence multi-usage est liée non seulement à l'utilisation des molécules produites par la transformation (énergie « renouvelable », matériaux verts, chimie verte) où apparaît là encore la question de la complémentarité et de la compétition, mais aussi à la possibilité des procédés de proposer différents produits (ex: méthanisation produit 1 gaz, voie thermo-chimique peut produire 1 gaz ou 1 liquide). La polyvalence multi-usage de la transformation est aussi fortement liée à celle de la ressource. Une question de recherche directement liée à cette articulation est celle de l'effet structurant que peuvent avoir les options techniques et organisationnelles de la phase de transformation sur l'exploitation, la production de la ressource et les modalités d'approvisionnement (voir section 4).

### ***La polyvalence de l'utilisation***

Elle porte essentiellement sur la nature du marché de consommation des produits biosourcés. Une première distinction peut être opérée entre des marchés dits de « masse » par exemple le marché des produits à destination énergétique, type biocarburant et à l'autre extrême des marchés de niche très

spécialisés pour des molécules rares et très spécifiques (exemple : extraction d'acide iduronique de souches d'algues vertes pour application cosmétique). Cette distinction repose ici sur la nature du bioproduit et son usage, mais elle peut être liée à d'autres facteurs comme le degré de maturation du marché, la diversité des utilisateurs, les préférences des consommateurs ou encore l'imposition de normes réglementaires, la solvabilité de la demande pour des produits répondant à des objectifs de développement durable, l'existence de barrières à l'entrée sur le marché (investissements, groupes d'intérêt, politiques).

### ***La polyvalence des acteurs***

Elle est liée à la polyvalence des ressources, des processus de transformation et d'utilisation. Elle renvoie d'une part à la capacité des opérateurs à chaque échelon de mettre en œuvre simultanément ou épisodiquement des alternatives productives, industrielles ou de consommation en fonction de l'évolution du contexte dans lequel ils évoluent (intégration horizontale) et d'autre part à l'existence d'acteurs positionnés de façon plus ou moins spécialisée dans la filière (intégration verticale). La dimension décisionnelle sur l'évolution de la filière et son pilotage, le contrôle à l'entrée (pilotage imposé par un acteur, absence de pilotage, pilotage partagé consensuel, pilotage conflictuel) est à prendre en compte.

### **Questions de recherche**

Cette réflexion sur la polyvalence permet de faire ressortir la multi dimensionnalité de la question du développement des filières produits biosourcés et finalement de proposer une hypothèse constitutive des recherches en socio-économie. Dans un contexte où des filières concurrentes sont déjà bien établies, ou en émergence, la durabilité économique, sociale et environnementale des filières produits biosourcés dépend de leur degré de polyvalence.

A partir de cette hypothèse et du cadre de réflexion précédent, nous proposons de dégager plusieurs pistes de recherche.

En premier lieu, cette décomposition et structuration de la réflexion sur la polyvalence devrait donner lieu à un travail plus systématique permettant de caractériser, éventuellement sous forme d'idéal-type (voir ébauche en figure 23), des modalités contrastées d'organisation des filières produits biosourcés, de les mettre en regard avec des cas précis afin d'en discuter les implications non seulement au regard d'une faisabilité technico-économique mais aussi d'une durabilité non seulement écologique mais aussi économique et sociale. Ce travail pourrait être enrichi par des représentations sous formes de modèles. De façon plus générale, sur un plan méthodologique, il apparaît fondamental de pouvoir se doter d'outils et de mesures de la polyvalence, à partir de conventions à définir avec les acteurs des filières. Cette thématique est abordée dans la section 2.

Nous avons vu également que la question de la structuration de la transformation par la ressource et ses modalités de gestion est une question nouvelle. Elle est approfondie dans la section 3 (voir figure 24). En complément, un enjeu important est lié aux effets structurants des processus de bioraffinage sur l'amont et l'aval de la filière. Ce point est abordé en section 4 (voir figure 25).

Enfin, le rôle des acteurs dans l'émergence et la constitution de filières produits biosourcés durables est une question incontournable dont l'analyse peut se baser sur les acquis des travaux de recherche sur la constitution des filières agro-alimentaires et agro-industrielles par exemple. Ce sujet est développé en section 5.

Les résultats de ces travaux devraient permettre à terme d'alimenter des représentations de la

polyvalence des filières produits biosourcés et d'analyser leur durabilité.

Toutes ces pistes de recherche correspondent à des approches combinant plusieurs disciplines. Les enjeux ne sont pas spécifiques des pays du Nord. La situation énergétique et la biodiversité des pays du Sud demandent qu'un effort important soit réalisé en coopération avec les chercheurs de ces pays. En effet, la question de la bioénergie et des bioproduits en général devient de plus en plus une question mondiale dont le centre se déplace progressivement vers les pays émergents et les pays pauvres. Un effort de coopération est nécessaire pour réduire le différentiel des connaissances et des compétences et mettre en place des partenariats scientifiques. Il est suggéré d'inclure une telle ligne dans un appel d'offre pour des recherches en partenariat.

Ressource	Procédé	Usage	Acteurs
Unique et spécifique	Spécialisé et spécifique	Spécifique et réduit (niche)	Concentration horizontale
Variée et spécifique	Spécialisé et multiple	Spécifique de masse	
Unique et multiple	Diversifié et spécifique	Varié et réduit	
Varié et multiple	Diversifié et multiple	Varié et de masse	Concentration verticale

**Hyperspécialisation:** Un produit unique dont on extrait une seule molécule qui est transformée par un processus spécifique et unique pour une demande précise sur un marché limité, avec des acteurs extrêmement segmentés

**Hyperpolyvalence:** De nombreuses sources possibles permettant de produire différentes molécules par des procédés divers pour un marché de masse avec une intégration verticale importante par un petit nombre d'acteurs

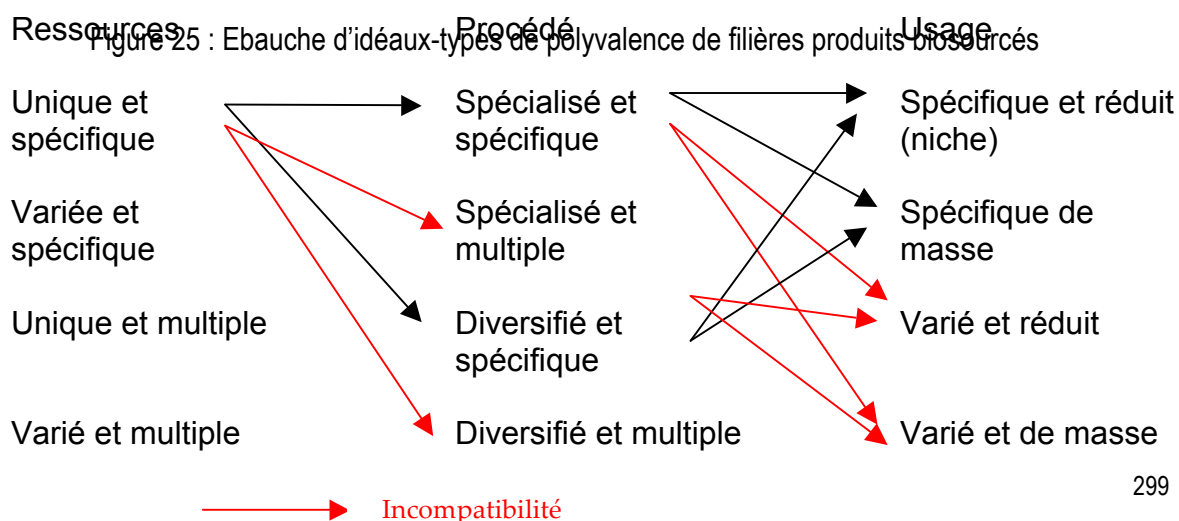


Figure 26 : Cadre préliminaire de réflexion sur les effets structurants

## 5.5.2. Outils et méthodes

### 5.5.2.1. Eléments de problématique

*Note : Les références proposées sont liées aux améliorations possibles identifiées lors de différents projets auxquels ont participé les experts, soit tirées d'une revue rapide de la littérature par rapport à quelques mots clefs identifiés lors des réunions du groupe de travail, à défaut d'une revue exhaustive de littérature.*

Dans le cadre du développement de l'utilisation des ressources renouvelables notamment pour les produits biosourcés, plusieurs questions se posent sur l'offre, la demande, l'adéquation offre/demande, en quantité et qualité à différentes échelles et divers horizons temporels. Les questions posées aux chercheurs sont multidimensionnelles et les méthodes doivent s'y adapter tout en étant partagées et reconnues. Certains thèmes de recherche ne sont pas spécifiques aux produits biosourcés, c'est plutôt l'intensité des interrelations et des interdépendances autour de la « polyvalence » qui caractérisent la recherche à mener.

Dans ce contexte, quel(le)s méthodes / outils permettraient d'approcher cette complexité pour effectuer des évaluations et *in fine* orienter les choix ?

Lors des discussions du groupe de travail, deux thématiques ont été dégagées comme demandant plus particulièrement un développement de méthodes :

- Les conventions sur les méthodes d'évaluation, critères économiques, sociaux et éthiques : faisabilité, durabilité.
- La quantification et caractérisation de la demande en produits biosourcés et l'évaluation des implications en termes de création et modification des filières (prospective / modèles) et de priorités de recherche.

### 5.5.2.2. Les conventions sur les méthodes d'évaluation, critères économiques, sociaux et éthiques : faisabilité, durabilité.

#### ***Eléments de réflexion***

L'évaluation du caractère durable des activités a conduit au développement de méthodes et d'outils visant à estimer les impacts environnementaux, économiques, sociaux et des risques. Par l'intermédiaire de critères et d'indicateurs, il est possible d'établir une évaluation autorisant la comparaison de différents scénarios. Le vocable « analyse multicritère » englobe ces approches qui se fondent plus ou moins explicitement sur l'approche ACV (Analyse de Cycle de Vie). L'intérêt de ces méthodes est de permettre à différents acteurs (pouvoirs publics, industriels, instituts de recherche et développement) de s'approprier la méthode pour répondre à leurs questionnements.

Les filières produits biosourcés peuvent s'appuyer sur des travaux déjà menés dont : méthodologie ANABIO (projet PNRB 2005) qui est une méthode multicritère de filières bioénergies, pour accompagner l'utilisateur dans la définition du cadre de l'étude, la sélection de critères d'évaluation appropriés, le choix de modes d'allocation adaptés ou encore la sélection d'outils de calcul adéquats ; projet européen EFORWOOD d'analyse et d'évaluation de la durabilité des systèmes de production forestière et de transformation du bois à différentes échelles ; travaux de normalisation AFNOR/CN Biomasse portant sur la durabilité de la biomasse produite de façon durable pour des utilisations énergétiques.

Les retours d'expérience de ces travaux permettent d'identifier les besoins en recherche d'évaluation de critères, de représentation des filières produits biosourcés (quels sont les possibles en termes de ressources, procédés, usages ?) pour une quantification pouvant notamment alimenter l'analyse multicritère.

### Questions de recherche

Autant les critères environnementaux sont relativement bien établis (ACV), autant les critères économiques sociaux et éthiques sont plus problématiques pour des raisons de disponibilités des données et de méthodes d'évaluation partagées et reconnues (PNUE 2009). On peut relever les critères suivants :

- emplois (dénombrement par process dont ceux qui se développeront ou non avec les filières produits biosourcés, rural vs non-rural, créé vs maintenu en lien avec le critère de substitution / concurrence des activités et dimension éthique, direct / indirect / induit) ;
- externalités (positives et négatives) ;
- choix d'implantation d'unité ;
- pérennité, notion intégrant différentes temporalités des acteurs et leurs irréversibilités / flexibilités / adaptabilités (cf. « polyvalence ») dont innovations / trajectoires ; maturité (des processus, des systèmes de production,...).

La notion de risque souvent abordée de façon essentiellement technique (c'est le cas d'ANABIO) peut être élargie aux risques de production (assurance par exemple), de marché (risque systémique),...

Plus généralement, le champ d'évaluation des impacts sociétaux est encore assez peu renseigné en indicateurs (concurrence potentielle avec l'alimentaire par exemple) : aspect développement, aménagement du territoire, certification, etc.

Il est ainsi important d'améliorer la méthodologie à chaque étape – critères-indicateurs / modalités d'évaluation / système de vérification (incertitudes et sensibilité) pour intégrer la dimension de polyvalence. Les processus d'amélioration de ces méthodes sont en lien fort avec la recherche qui pourra être menée par ailleurs (autres actions de la tâche 12, autres tâches de l'ARP VégA, ARP ADAGE sur le changement climatique, etc.). Il s'agit donc d'un processus continu.

Un travail spécifique pourrait également être engagé sur la partie pondération des critères (méthode et outil, de type PROMETHEE ou AHP) pour accompagner les décideurs, ce qui demande d'établir des fonctions de préférence.

### 5.5.2.3. Quantification et caractérisation de la demande en produits biosourcés et évaluation des implications

#### *Eléments de réflexion*

La quantification / caractérisation de la demande en produits biosourcés entre dans la logique de définition d'idéaux-types de polyvalence de filières produits biosourcés. Le groupe de travail voulait également mettre en évidence l'influence des process / transformateurs et des consommateurs finaux sur « l'amont » en faisant appel à différents outils (prospective et modèles). Le plus souvent, les travaux portent plutôt sur l'impact de nouvelles activités / technologies / innovations sur le consommateur (ses gains futurs espérés). Pour la partie process, ceci signifie que, pour les produits biosourcés, on considère que la logique doit être une logique « produit » et non une logique « processus »<sup>675</sup>.

De façon plus générale sur la tâche 12, il apparaît nécessaire de développer les analyses en termes de trajectoire, d'interrelations et d'interdépendances (le long de la filière comme succession de process ou au sein des territoires) pour identifier les enjeux (dont réversibilité / irréversibilité). Il ne s'agit donc pas de considérer que le pilotage se fait uniquement par la demande, mais de considérer que le développement des produits biosourcés le prendra en compte de façon plus marquée et/ou explicite.

Outre la dimension technique d'adéquation ressource / procédé, on peut également considérer que les produits biosourcés peuvent être spécifiques dans d'autres domaines : leur production peut demander des compétences particulières par exemple, ce qui peut impacter la structure des entreprises productrices et donc la filière. Ces questions d'économie industrielle (dont l'économie des organisations) complètent l'analyse de création / modification de filières.

#### **Questions de recherche**

La meilleure connaissance de la demande de produits biosourcés porte sur trois dimensions : ressource / procédé / usages. Pour cela, les besoins en recherche peuvent se décliner de la façon suivante :

- Procédés et acteurs : Etablir sur des critères techniques des correspondances entre besoins des process de produits biosourcés et offres en ressources, ce qui veut dire une connaissance du champ d'acceptabilité de la variabilité des ressources (offre et demande). Un travail spécifique d'identification de la variabilité / adaptabilité des caractéristiques (physico-chimiques) de l'offre (éléments sols, climats, etc.) serait également à réaliser. Plus généralement, cette action intègre les innovations techniques/technologiques dans l'analyse.
- Usages et acteurs : Elargir les correspondances établies ci-dessus avec la caractérisation de la demande du consommateur final sur les produits biosourcés (et produits comparables) et les besoins de recyclage, ce qui demande de qualifier les critères de choix du consommateur final (économie de la fonctionnalité par exemple) et de les relier, si possible, avec les critères techniques. On peut également intégrer dans l'analyse la dimension démographique, la dimension intergénérationnelle des choix, la santé / sécurité, et de façon générale l'analyse des motivations (au-delà des approches économiques évaluant les gains espérés de bien être du consommateur). Un travail spécifique devrait être mené pour intégrer la dimension éthique des choix du consommateur final (certification, label,...), dont l'acceptabilité des biotechnologies. (Celles-ci pourraient être nécessaires / évoquées pour une plus grande adéquation des ressources aux exigences techniques des procès.)

<sup>675</sup> Billaudot, B. (2004). Productivité, informations et connaissances : les implications du basculement d'une logique processus à une logique produit. Colloque IPI. Autrans.



La recherche à mener porte ainsi sur les acteurs des procédés (fonction de production, degré de substituabilité ou non de différents intrants / ressources, production jointe intégrant les coproduits) et sur le consommateur final. Pour ces derniers en particulier, il est nécessaire d'élargir à d'autres disciplines pour approcher leurs comportements et motivations. Les outils peuvent être la prospective ou le développement de modèles. Au niveau micro, en intégrant les interactions entre acteurs (chaque décision ou chaque changement intervenu au niveau d'un acteur de cette filière se répercute sur les autres acteurs de la filière, contribuant par-là à modifier leurs choix ; situation de concurrence imparfaite et de différenciation par la qualité des produits). Pour les modèles macro, on peut reprendre les pistes relevées dans une étude sur les modèles forestiers<sup>676</sup>, à savoir : amélioration des évaluations empiriques de l'offre et des paramètres clefs qui déterminent le développement des capacités, l'inertie des échanges et les changements techniques.

### **5.5.3. Dimension structurante de la ressource, de son mode de gestion et d'approvisionnement sur l'organisation de la filière**

Cette section plus orientée sur l'offre de la ressource est complémentaire de la section précédente. Le groupe de travail a en effet considéré que la seule dimension technique (modes de gestion, systèmes de production, adéquation *a priori* des ressources à des utilisations) ne pouvait expliquer les choix de réponse à une (des) demande(s) et plus généralement à l'organisation des approvisionnements (vus ici comme segment de la filière).

Quelle(s) est/sont les organisation(s) de filière(s) répondant aux différentes contraintes des acteurs ?

Les contraintes sont techniques, biologiques, environnementales, réglementaires, sociales, éthiques. La problématique a été déclinée par le groupe de travail en deux domaines :

- Quels sont les déterminants de l'adoption de nouvelles pratiques ?
- Comment s'articulent organisation de l'approvisionnement et temporalités ?

Il est à souligner que la temporalité et la notion de risque sont également des « déterminants des pratiques ». Nous traiterons donc d'abord les approches focalisées sur un acteur spécifique de l'approvisionnement, puis nous aborderons l'articulation entre temporalités et organisation de l'approvisionnement.

#### **5.5.3.1. Acteurs de l'approvisionnement : quels sont les déterminants de l'adoption de nouvelles pratiques ?**

##### ***Éléments de réflexion***

Le groupe de travail est parti du présupposé que les pratiques actuelles ne permettront pas de répondre au développement des produits biosourcés. Cette position repose sur un diagnostic des membres du groupe (connaissance terrain et divers travaux comme les études ECOBIOM, projet PNRB 2005, BIOMAP) qui montrent l'importance des comportements / motivations dans l'offre de ressource des agriculteurs et propriétaires forestiers. Elle est aussi justifiée par la question de l'adaptation à la polyvalence induite par les produits biosourcés, en rupture avec les comportements actuels.

La temporalité (saisonnalité, caractère pérenne ou annuel des productions) fait partie intégrante du choix

---

<sup>676</sup> Tromborg, E., J. Buongiorno, et al. (2000). The global timber market: implications of changes in economic growth, timber supply and technological trends. *Forest Policy and Economics* 1(1): 53-69.

des acteurs. Les modèles bioéconomiques permettent l'articulation des modèles écologiques (modèles de croissance des ressources naturelles et leurs caractéristiques) et économiques (coûts, prix, débouchés et leur structuration). Ils sont plus particulièrement développés pour les ressources agricoles<sup>677</sup> et halieutiques et, dans une moindre mesure, pour la forêt<sup>678</sup>.

On peut élargir le champ des acteurs concernés par rapport à de nouvelles pratiques : il peut s'agir des industriels produisant les produits biosourcés, mais aussi tous les acteurs de l'approvisionnement de la mobilisation (mobilisateurs, transporteurs, distributeurs, négociants, etc.). On peut distinguer les acteurs qui n'étaient pas liés à la ressource (exemple : les acteurs des ressources fossiles) et ceux des filières existantes (agro-alimentaire, bois matériau,...). Enfin, il ne faut pas oublier les autres fournisseurs potentiels de ressource pour alimenter la production des produits biosourcés et qui génèrent de la ressource à travers leurs process principaux (connexes de scieries par exemple). Les nouvelles pratiques peuvent conduire à considérer que ce qui était coproduit devient production à part entière (pas de hiérarchie des productions, voire même une inversion de l'ordre des productions), et donc à modifier les choix et la structure des flux d'approvisionnement.

### Questions de recherche

Les différentes sciences sociales peuvent permettre de mieux comprendre les pratiques, les inerties, les motivations (la dimension territoire que l'on retrouve dans 5.3.2 est importante) et identifier les leviers et conditions d'action. Des approches communes et/ou différenciées par catégorie d'acteur peuvent être menées.

Un travail spécifique serait à mener sur les « détenteurs / fournisseurs de ressources » de l'agriculture et de la forêt. Ceci est un préalable à toute identification des déterminants de l'adoption de nouvelles pratiques : consentement à offrir / planter pour un / des usages (polyvalence) car détenteur (ressource et/ou sol) ne signifie pas offreur ; élasticités ; droit de propriété (dont propriété intellectuelle du vivant) et contrats ; intégration des risques et incertitudes,...

On peut citer par exemple l'intérêt de développer une modélisation dynamique des exploitations en intégrant les incertitudes sur les rendements et les cultures effectivement mises en place ; dynamique d'usage des sols ; demande fixée ou variable ; prix endogène ou exogène ; conditions de viabilité. Les besoins de développement des modèles bioéconomiques permettraient de mieux prendre en compte les contraintes biotechniques (sols, climat, hydrologie,...) dans le choix des producteurs. Pour la partie forêt, des développements intéressants pourraient être menés sur les interactions entre offre publique et offre privée par des modèles de type leader-follower.

L'adoption de nouvelles pratiques demande aussi de pouvoir fournir aux acteurs des informations et des outils leur permettant de choisir. En lien avec la partie « outils et méthodes » (et des données nécessaires pour évaluer), cette recherche demande de mieux évaluer les coûts / aides / externalités et services et leur affectation aux cultures (dimensions spatiale et temporelle).

La dimension sociale est importante dans les pratiques (qui intègrent les savoir faire locaux). On peut appliquer cette question au facteur « travail » : face à la multifonctionnalité des territoires (des forêts) et à

<sup>677</sup> Flichman, G. and F. Jacquet (2003). Le couplage des modèles agronomiques et économiques : intérêt pour l'analyse des politiques. Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales 67.

<sup>678</sup> Haynes, R., D. Adams, et al. (2006). Bioeconomic and market models. Computer applications in sustainable forest management: including perspectives on collaboration and integration. G. Shao and K. Reynolds, Springer. 11.

la polyvalence des ressources, quelles qualifications ? Quelle transférabilité des savoirs et internalisation de nouveaux savoirs ? Quelles formations ? Quels métiers : spécialisation ou multi-activité ?

### 5.5.3.2. Organisation de l'approvisionnement et articulation des temporalités

#### *Éléments de réflexion*

Les horizons de temps diffèrent selon les acteurs. L'insertion des cultures dédiées pluriannuelles (plus de 30 ans pour des taillis à courte rotation d'eucalyptus avec trois rotations) dans les pratiques agricoles en sont un exemple : l'audit mené dans ECOBIOM indiquait que le taillis à courte était « un objet atypique, difficile à penser dans la culture du monde agricole », du fait notamment de son nécessaire engagement dans la durée. Les investisseurs d'unités de transformation utilisent des durées d'amortissement de l'ordre de 20 ans ; l'horizon des agriculteurs porte sur des rotations de 2-3 ans ; le temps des propriétaires forestiers peut s'exprimer en siècles.

En lien avec la temporalité et sa prise en compte (risque et saisonnalité), on retrouve des travaux intégrant dans les conditions d'offre du producteur différents arrangements contractuels<sup>679</sup> ou des travaux orientés sur l'optimisation d'un portefeuille de ressources (annuelles et pérennes) d'une unité utilisatrice<sup>680</sup>.

Il est difficile d'approcher l'organisation de l'approvisionnement sans prendre en compte la dimension territoriale<sup>681</sup> et plus globalement les jeux d'acteurs dont la coordination marchande est l'une des composantes (pour des travaux en termes de contrat et coûts de transaction sur l'organisation d'une filière fondée sur la biomasse pour l'énergie, cf. par exemple<sup>682</sup>).

Enfin, en terme d'organisation générale, l'OCDE (2006) décrit deux modèles économiques susceptibles d'émerger à l'avenir pour la bioéconomie (sachant que ce terme comprend « les sciences biologiques qui apportent une valeur ajoutée à de nombreux biens et services réunis ») : un modèle collaboratif consistant à partager les connaissances et réduire les coûts de la recherche, et un modèle intégrateur permettant de créer et pérenniser des marchés. Le modèle collaboratif peut concerner tous les domaines applicatifs. Son adoption, conjuguée aux nouveaux débouchés des cultures non alimentaires destinées à la production de biomasse, pourrait revitaliser l'action des entreprises spécialisées en biotechnologie dans la production primaire et l'industrie. Le modèle intégrateur, lui, pourrait se développer dans les biotechnologies de la santé. Ces conclusions qui sont de l'ordre de la structuration des entreprises développant les techniques et les débouchés ne permettent pas de faire des déductions sur l'organisation des filières d'approvisionnement (mobilisation, production, approvisionnement, pré-conditionnement), ces modèles n'étant en effet qu'un des éléments de structuration de filière.

Ainsi, plusieurs entrées sont possibles pour approcher l'organisation de l'approvisionnement : micro-

<sup>679</sup> Larson, J. A., C. E. Burton, et al. (2008). Risk and return for bioenergy crops under alternative contracting arrangements. Southern Agricultural Economics Association Annual Meetings. Dallas (USA).

<sup>680</sup> Kumarappan, S. and R. Ivanic (2009). Choice of optimum feedstock portfolio for a cellulosic ethanol plan – A dynamic linear programming solution. Agricultural and Applied Economics Association.

<sup>681</sup> Pecqueur, B. and J. B. Zimmermann (2004). Le développement d'une activité ne peut passer que par son inscription territoriale Paris, Lavoisier.

<sup>682</sup> Altman, I. and T. Johnson (2004). A transaction Cost Economics View of Agriculture Exchanges For Biopower: Theoretical And Methodological Concerns. Southern Agricultural Economics Association. Tulsa, Oklahoma.

économique (modèles sur agents représentatifs ou modèles d'entreprises) et jeux d'acteurs (filière).

### Questions de recherche

Il serait utile de poursuivre le développement de modèles intégrant dans les critères de choix différents types d'arrangements contractuels, pour différents types de ressources (modèles d'optimisation sous contraintes), pour les producteurs de ressources et pour les utilisateurs.

Ces modèles fondés sur des acteurs représentatifs pourraient être complétés par des analyses opérationnelles d'organisation de l'approvisionnement que l'on pourrait regrouper sous la terminologie de « business models ». L'objectif est d'établir la faisabilité du développement de filière sur différents schémas types et d'identifier les adaptations aux attentes / besoins des parties prenantes. Les modalités contractuelles intégrant la temporalité des engagements entrent dans cette réflexion, tout comme le besoin ou non d'un tiers, garant de la stabilité des relations d'acteurs (banques, fonds d'investissement, autorités). L'acceptabilité de tels schémas peut être analysée par des enquêtes de type DELPHI auprès d'acteurs-clefs.

Dans tous les cas, des travaux sur la gouvernance (pluri-échelles) sont nécessaires. Les outils de l'économie institutionnelle permettent de caractériser le système institutionnel formel (contrats et convention-cadre) et/ou non-formel (les conventions). L'analyse par les coûts de transaction paraît particulièrement pertinente pour une approche de la coordination de l'approvisionnement (dimension formelle des arrangements institutionnels), car elle intègre trois facteurs caractéristiques des produits biosourcés : la spécificité des actifs, l'incertitude et la fréquence.

Un travail spécifique est à développer sur le transport/logistique<sup>683</sup> en tant que processus élémentaire des chaînes de transformation. Une plus grande attention à cette dimension « transport » (autre que les approches *ad valorem*) dans les analyses du commerce international serait également souhaitable, notamment pour étayer les analyses de comparaisons de filières. Outre l'aspect « juste à temps » que peut intégrer le transport (et la logistique), ces développements seraient utiles pour les modèles d'optimisation sous contraintes.

Enfin, élaborer des scénarios établissant les futurs possibles et leur faisabilité demande d'identifier les temporalités des acteurs et leurs évolutions possibles (par exemple : modifications possibles des schémas sylvicoles pour internaliser temps et risques en lien notamment avec le changement climatique) ainsi que leurs possibles articulations. Ceci demande de prendre en compte les impacts des choix (dont les non-choix) et leur réversibilités/irréversibilités (*lock-in*).

#### 5.5.4. La dimension structurante des modalités du bioraffinage sur l'organisation de la filière (bassin d'approvisionnement et aménagement régional)

##### 5.5.4.1. Eléments de problématique

La problématique du bioraffinage réside principalement dans la complexité de la structure physico-chimique de la matière lignocellulosique. Les principaux composants cellulose et lignine constituent une matrice solide à l'intérieur de laquelle vont être physiquement et/ou chimiquement liés d'autres éléments en quantité résiduelle tels que composés minéraux et autres substances chimiques résultant des

<sup>683</sup> Hummels, D. (2001). Transportation Costs and International Trade Over Time, Purdue University.

réactions métaboliques secondaires liées le plus souvent à l'étape de lignification.

Il n'est pas aisé de séparer ces différents composants et à ce jour l'industrie a le plus souvent été dans l'obligation de développer des procédés destinés à extraire le produit principal avec comme conséquence la détérioration physique et chimique des autres substances. Le bioraffinage nécessite le développement de procédés de déstructuration conservant le plus possible à chacun des constituants ses propriétés d'origine. La mise au point de ces procédés passe nécessairement par une meilleure connaissance de la structure de la matière à l'échelle pariétale en fonction des différents types de biomasse.

#### **5.5.4.2. Reconversion d'unités industrielles existantes (comme la filière papetière) en bioraffineries**

Le papier est un enchevêtrement de fibres de cellulose adhérant les unes aux autres sans liant. Longtemps fabriqué à partir de textiles, il est essentiellement fabriqué depuis un siècle à partir de biomasse lignocellulosique, dans sa grande majorité, d'origine forestière. Le processus de fabrication de la pâte consiste, à l'exception des pâtes purement mécaniques, à dissocier la biomasse pour en extraire les fibres de cellulose.

Les pâtes mécaniques consistaient en un défibrage suivi d'une utilisation directe des fibres ainsi obtenues sans séparation des deux composants. Elles n'ont été utilisées que pour le traitement des résineux. Le procédé présentait l'avantage d'un rendement matière élevé puisqu'il y avait utilisation de la totalité de la biomasse mais conduisait à un papier peu stable dans le temps en raison de la présence de la lignine. Il a été souvent remplacé par les techniques dites chimico-thermomécaniques ou mécano-chimiques dans lesquelles un traitement chimique modéré précède le défibrage mécanique. Ces pâtes se rapprochent en qualité des pâtes chimiques sans toutefois en atteindre le niveau.

Les pâtes chimiques consistent en une dissolution à chaud et sous pression de la lignine. Le réactif chimique utilisé est soit la soude, soit un mélange soude-sulfure de sodium, soit du bisulfite de calcium, de magnésium ou de sodium. Globalement on regroupe ces techniques en procédés « kraft » ou « sulfite acide ». Le rendement des pâtes chimiques est plus faible (40 à 50 %) puisque l'objectif consiste à éliminer la lignine. Par contre, leur qualité et surtout la stabilité dans le temps du papier est bien meilleure. Les procédés chimiques à chaud sont consommateurs d'énergie et la consommation en eau des usines de pâte est importante.

La production française de pâtes mécaniques est de l'ordre de 600 000 tonnes et celle de pâtes chimiques d'environ 1 800 000 tonnes.

Les procédés mis en œuvre dans les usines de pâte sont-ils susceptibles de préfigurer le futur concept de bioraffinerie ? Les pâtes chimiques génèrent une quantité importante de sous-produits. Toutefois ils sont plus gérés comme des résidus posant problème que comme de réels coproduits valorisables. Le traitement chimique particulièrement agressif a pour but de détruire et de mettre en solution tous les composants chimiques, plus ou moins facile à éliminer, autres que la cellulose. De fait, les coproduits potentiellement valorisables se présentent sous forme de lessives ou liqueurs souvent éliminées par combustion avec récupération de chaleur sur le site industriel. La partie solide résiduelle de l'élimination par combustion peut être régénérée et recyclée dans le procédé mais cette solution ne s'applique pas à tous les types de pâte.

D'une manière générale, si une usine de pâte à papier peut préfigurer le concept de bioraffinerie elle en reste très éloignée car tout le procédé est axé sur la production d'un produit principal, la pâte, et sur une élimination la plus rationnelle possible des autres produits, effluents gazeux et liquides particulièrement

polluants.

Les procédés papetiers sont trop destructeurs de la matière lignocellulosique pour permettre une valorisation des composants chimiques et molécules d'intérêt. A ce jour, chaque procédé industriel à grande échelle destiné à extraire de la biomasse une substance d'intérêt a été ciblé et adapté à une substance recherchée constituant le produit principal: tannins, terpènes, cellulose,... Le plus souvent la seule autre valorisation des coproduits a été l'énergie.

L'axe principal de recherche pour permettre de déboucher sur un concept réel de bioraffinerie doit porter sur une meilleure compréhension de la structure cellulaire de la matière ligneuse et sur la mise au point de procédés biochimiques susceptibles de conduire à une séparation et dissociation des composés d'intérêt sans détérioration de ceux-ci par la mise en œuvre d'une technique trop sélective. Cette voie ouvre de nombreux axes de recherche et il n'est pas raisonnable d'attendre des solutions industrielles à court terme, qui auraient si elles existaient été mises au point et développées par les papetiers. Par ailleurs, les programmes de recherche sur la lignine sont anciens, nombreux et importants mais n'ont pas débouché à ce jour sur des procédés industriels de dissociation. Globalement, dans la biomasse forestière composée grossièrement pour moitié d'une part de cellulose et d'autre part de lignine, il n'existe pas à ce jour de solution industrielle permettant d'extraire l'une sans détériorer l'autre.

Par contre, au travers des usines de fabrication de pâte, les sites industriels existent. De nombreux équipements de base notamment ceux liés aux technologies de défibrage pourraient parfaitement être utilisés pour fournir la matière première à d'autres types de procédés. De même, les lessiveurs et raffineurs utilisés pour la pâte pourraient être adaptés à d'autres formes de traitement chimiques. Le niveau de compétence atteint par ces sites industriels dans le traitement des pollutions et le contrôle des impacts environnementaux devrait permettre des gains de temps appréciables dans la mise en œuvre des procédés futurs de bioraffinage. Le traitement des coproduits résultant de la fabrication de la pâte a permis à ces unités industrielles d'entrer dans une logique de concept de bioraffinerie qui ne peut qu'être amplifiée par les problématiques actuelles de valorisation du carbone renouvelable.

#### **5.5.4.3. Reconversion d'unités industrielles existantes (hors produits biosourcés) en bioraffineries**

Les unités industrielles existantes hors transformation de produits biosourcés susceptibles d'être converties en bioraffineries concernent essentiellement les raffineries de pétrole ou toute unité pétrochimique de transformation d'hydrocarbures. Il est peu probable que ces unités soient susceptibles d'être converties en bioraffineries si l'on entend qu'elles pourraient accepter comme matière première une biomasse brute, hétérogène, provenant des filières forestières ou agricoles. La chaîne de procédé BtL s'envisage néanmoins notamment en raffinerie de manière à : (i) bénéficier de synergies en terme de consommation / production d'énergie, (ii) bénéficier de synergies en terme d'opération / contrôle sur unités connues en raffinerie (craquage catalytique), (iii) envisager le co-processing biomasse / résidus de raffinerie, (iv) disposer de produits (Diesel-FT) et coproduits (naphta, kérosène) directement valorisables dans les chaînes classiques de valorisation en raffinage et pétrochimie.

Par ailleurs, il est parfaitement imaginable que ces unités pourraient être adaptées pour traiter une matière première de type hydrocarbure d'origine fossile dans laquelle entrerait dans des proportions à ce jour inconnues des substances liquides d'origine végétale, par exemple des huiles de pyrolyse. On peut alors imaginer des unités de production d'« huiles » végétales de type pyrolyse flash, de taille moyenne (quelques dizaines de milliers de tonnes par an), localisées à proximité des principaux bassins d'approvisionnement. Ces unités seraient dédiées en fonction de leur localisation à un type donné de biomasse. Les « huiles » ainsi produites de qualité régulière répondant à des standards physico-

chimiques élaborés avec l'industrie pétrolière seraient ensuite dirigées vers des raffineries existantes ayant adapté leurs procédés en fonction de cette nouvelle ressource. Elles pourraient être transportées sur de plus longue distance de la même manière que les hydrocarbures actuels et, comme cela est déjà le cas en fonction des différents types de bruts, les raffineries pourraient se spécialiser en fonction de la nature des huiles de pyrolyse.

#### 5.5.4.4. Création d'une bioraffinerie

Sauf à être localisées à proximité d'un très gros bassin d'approvisionnement offrant une ressource homogène et constante en qualité, il est peu probable que les bioraffineries du futur soient en mesure d'accepter une matière première brute. Sans atteindre le degré de transformation évoqué au paragraphe précédent, la biomasse destinée aux bioraffineries devra le plus souvent faire l'objet d'un pré-conditionnement. Il couvrira les étapes de fragmentation, séchage et éventuellement, dans le cas des voies thermochimiques, de torréfaction et broyage en vue d'atteindre une granulométrie compatible avec les procédés ultérieurs de bioraffinage. Cette étape de conditionnement pourra être assurée par des unités de taille moyenne, positionnées à proximité des bassins d'approvisionnement et technologiquement configurées en fonction du type de biomasse à traiter.

La matière première énergétique ainsi conditionnée (solide, liquide ou gazeuse) pourra être directement dirigée vers une unité de bioraffinage mais aussi, éventuellement, vers une unité intermédiaire de conditionnement regroupant différents sources de biomasse et produisant, par des technologies adaptées, une matière première (*a priori* solide) en mélange, homogène et de caractéristiques constantes. Les procédés mis en œuvre par les bioraffineries feront nécessairement appel à des techniques lourdes et complexes dont la rentabilité ne pourra être assurée que par des unités de grande capacité traitant plusieurs centaines de milliers de tonnes par an de matière première. Les recherches sur les technologies de conditionnement de la biomasse par les voies thermiques ou biochimiques constituent un axe de recherche indispensable et préalable au développement de filières industrielles de bioraffinage.

#### Questions de recherche.

La question fondamentale et récurrente concerne le niveau d'intégration des bassins d'approvisionnement dans les filières. Les recherches à engager devront permettre de se doter d'outils méthodologiques permettant d'analyser les impacts sociaux et économiques de ce niveau d'intégration et permettre une réflexion prospective sur l'intégration de ces nouvelles filières dans les politiques d'aménagement des territoires.

- Les coûts ou les bénéfices sociétaux en résultant sont-ils un facteur déterminant d'orientation des politiques ?
- Dans ce contexte, quels sont les critères et indicateurs à prendre en compte ? Sont-ils relativement génériques ou spécifiques à chaque territoire ?
- Quelle importance accorder aux bénéfices environnementaux en regard, pour la société, des conséquences sociales et économiques ?
- Les opérateurs intervenants sur les bassins d'approvisionnement doivent-ils se limiter à récolter et éventuellement à transformer de manière primaire (limitée à la fragmentation) la biomasse destinée à des unités industrielles de forte capacité pouvant être localisées à plusieurs centaines de kilomètres des sites de production, ou, au contraire, intégrer une transformation plus poussée destinée à produire une matière première énergétique répondant à des exigences techniques définies par les dits transformateurs ?

La première hypothèse est celle qui est actuellement retenue dans la plus part des situations : pour la pâte à papier les exploitants se contentent de livrer des rondins ou des pailles, les transformateurs

(scieries) livrent des plaquettes. Le développement des filières de transformation du carbone renouvelable va nécessiter l'émergence d'itinéraires innovants mettant en œuvre des évolutions technologiques de rupture qui sont traitées par ailleurs au sein de l'ARP. Par contre, les choix de filières résulteront des politiques publiques éclairées par les analyses d'impacts sociaux, économiques et environnementaux.

### **5.5.5. Quel est le rôle des acteurs dans l'émergence et le maintien des filières produits biosourcés durables et renouvelables ?**

#### **5.5.5.1. Eléments de problématique**

Les acteurs des filières produits biosourcés sont non seulement les acteurs économiques associés à la production des ressources, aux processus de transformation et à la consommation, mais aussi des structures d'appui aux filières, les pouvoirs publics et communautaires, les usagers de l'espace, qu'ils soient partie prenante aux activités de production ou bénéficient des aménités générées par les espaces agricoles et naturels. Ces acteurs se caractérisent par une grande diversité en termes de concentrations économique et spatiale, de formes organisationnelles, de mobilité des actifs, et d'objectifs. Pour en comprendre le rôle dans l'émergence et le maintien des filières produits biosourcés, il est indispensable de connaître leurs motivations et leurs interactions, aux échelles locales, nationales et internationales.

#### **5.5.5.2. Les « acteurs » et les interactions**

##### ***Eléments de réflexion***

L'émergence de nouveaux systèmes de production durables dans le domaine des produits biosourcés n'échappera pas aux contraintes inhérentes à la création de nouveaux marchés. Le végétal est sûrement un, voire l'unique substitut au carbone fossile, pour nombre de produits matériaux ou produits chimiques. Face à des marchés existants, la création de nouveaux marchés, échappant à l'effet de niche, ne peut se réaliser sans des politiques volontaristes des acteurs institutionnels. Les politiques incitatrices sont souvent un passage obligé, en particulier par la fixation de prix de marchés administrés permettant une rentabilité initiale des processus de production non concurrentiels. Les états sont donc souvent des acteurs incontournables dans cette phase initiale. D'autre part les états sont aussi garants de la protection de la santé humaine et de l'environnement. La mise en œuvre de nouvelles réglementations répondant à ces objectifs, comme la réglementation européenne REACH ne peut que conduire à une forte incitation à rechercher des substances moins problématiques pour le développement social, les produits issus de la biomasse rentrant bien dans ce cadre.

A la fois, par ses incitations économiques au travers de la régulation des marchés et par les contraintes réglementaires, la puissance publique est un acteur incontournable de la mise en œuvre de nouveaux systèmes de production de biomasse à destinations polyvalentes. La mise en œuvre de ces politiques n'est d'ailleurs pas sans poser des questions de protection des marchés nationaux au travers de droits limitant les échanges entre pays<sup>684</sup>.

Pour appréhender l'organisation des échanges aux différentes étapes de la transformation des produits le groupe de travail a choisi, dans le cadre de ce chapitre, de se référer au concept de filière. Il permet par l'analyse du cycle de transformation des produits de déterminer les acteurs du processus productif, de repérer les verrous de blocage et de rechercher les étapes clés permettant la meilleure efficacité des

---

<sup>684</sup> Gohin, A. (2008). La sélection des produits agricoles sensibles : le cas européen. *Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement* 87(2): 49-76.



politiques incitatrices.

Dans ce cadre, le circuit d'un produit sera étudié de l'amont à l'aval, c'est à dire de la conception, fabrication à la consommation. L'analyse puise principalement aux théories de l'organisation industrielle. Elle a initialement été développée dans le cadre du modèle SCP (Structures, Comportements, Performances)<sup>685</sup>. Ce modèle systémique postule que les structures de marché y sont conditionnées à la fois par les caractéristiques de la demande et celles de l'offre. Ces structures sont respectivement altérées par le comportement des entreprises, lui-même influencé à son tour par les performances du secteur d'activités. Des boucles de rétroaction connectent, enfin, les trois niveaux précédemment définis.

Ce modèle a été complété par l'approche dite de la « chaîne globale de valeur » (Global Value Chain). L'analyse identifie quatre instances du processus de création de valeur dont les interactions définissent la configuration spécifique d'une filière. Dans le contexte français, une étude<sup>686</sup> désigne la filière comme « une succession d'opérations de transformation dissociables entre elles, et liées par des enchaînements techniques. Ces opérations donnent lieu à un ensemble de relations économiques et commerciales, qui débouchent elles-mêmes sur des stratégies de la part des acteurs de la filière ». Ce qui illustre la synthèse que l'auteur fait des deux acceptions précédentes.

Une telle vision peut déboucher sur l'analyse de l'émergence de nouvelles filières et de leur structuration. Ainsi, est-elle particulièrement adéquate pour analyser le contexte d'émergence et de développement de filières de produits biosourcés. Cela suppose de :

- délimiter la filière : identification des acteurs et de leurs fonctions (flux, quantités, prix), construction d'une carte des flux.
- analyser les stratégies d'acteurs, les relations entre acteurs et les règles régissant ces relations.
- analyser les critères comptables : revenus, marges, répartition de la valeur ajoutée, formation de capital etc.

Les filières de produits biosourcés présentent la caractéristique d'une forte dépendance à la ressource (voir section 3). Cette dépendance leur donne une configuration spécifique, notamment parce qu'elle impacte l'ensemble des relations entre acteurs mobilisant cette ressource ou des ressources alternatives. L'émergence et le développement de telles filières sont justifiés par des arguments économiques et écologiques, qu'il convient de mettre en perspective et d'évaluer simultanément. Cette double détermination permet d'aboutir à l'idée que les filières de produits biosourcés sont passibles d'une analyse en termes d'innovations environnementales. Rennings<sup>687</sup> souligne la spécificité des innovations environnementales à travers le fait qu'elles produisent non seulement des externalités positives associées au processus d'innovation, mais aussi des externalités positives en améliorant la qualité environnementale.

## Questions de recherche

Dans les faits les acteurs des filières bioproduit vont présenter des formes organisationnelles très variées pour chaque étape de transformation :

- Production de la ressource : exploitant individuel, coopératives / groupement de producteurs, TPME ou PME, propriétaire « institutionnel », collectivités, Etat, groupes internationaux.

<sup>685</sup> Scherer, F. M. (1973). *Industrial Market Structure and Economic Performance*. Chicago (USA).

<sup>686</sup> Morvan, Y. (1999). *Filière de Production. Fondements d'Economie Industrielle*. Economica. Paris: 243-275.

<sup>687</sup> Rennings, K. (2000). Redefining innovation – eco-innovation research and the contribution from ecological economics. *Ecological Economics* **32**: 319-332.

- Transformation : PMI, groupes industriels, entreprises à l'interface Recherche – Technologie.
- Consommation : industries, ménages consommateurs directs, distributeurs, collectivités.
- Appui à la filière : organismes publics ou privés de R&D, organismes publics de support, structures professionnelles.
- Acteurs politiques : lobbies, ONG, association de consommateurs.

Comme l'ont souligné différents groupes de travail de l'ARP VegA, ces acteurs des filières produits biosourcés sont généralement mal caractérisés. Une cartographie de ces acteurs à l'échelle mondiale serait donc très utile, à la fois pour comprendre leur rôle dans le développement des filières produits biosourcés, mais aussi pour identifier les verrous / opportunités pour le développement de telles filières.

Le développement de filières concurrentielles passe aussi par l'émergence de grands groupes capables de créer de véritables marchés concurrentiels et pouvant s'abstraire à terme des politiques d'aides. Si on se place dans le cadre de la filière nationale, ces entités sont encore peu présentes sur le marché. Pour en favoriser l'émergence, il faudra identifier les points d'intérêt convergents entre les industriels de la filière et des agro-ressources (renvoi à la notion d'ambition et d'objectifs), déterminer comment peuvent être mis en œuvre des programmes communs de R&D sur les produits et les procédés, et plus généralement rechercher les synergies et complémentarités permettant de profiter de la polyvalence de la ressource. Plus généralement la notion de taille optimale des entreprises et des disparités d'implantation régionale devrait être approfondie<sup>688</sup>.

Le développement des produits biosourcés dépend principalement de critères de performance, de leur compétitivité, par exemple par rapport aux produits dérivés du pétrole, et de plus en plus du respect de critères de durabilité. S'ouvre ainsi un champ de recherche concernant l'innovation environnementale. Comment s'articule la diminution des impacts environnementaux en référence à des technologies alternatives ?

L'impact environnemental, qu'il soit intentionnel ou non, direct ou indirect, est très difficile à appréhender, tant du côté des producteurs que de celui des consommateurs. Une des difficultés à résoudre sera de déterminer les mécanismes qui permettent de trouver, parmi les innovations qui diminuent progressivement ou drastiquement l'impact environnemental négatif à travers de nouveaux produits, procédés, méthodes ou services, celles qui doivent faire l'objet de politiques d'aides conduisant à une additionnalité nette par rapport au processus normal d'innovation des firmes.

Les pouvoirs publics jouent un rôle clé à la fois pour soutenir l'innovation (quelles orientations stratégiques ?) et pour faire évoluer le cadre réglementaire et fiscal. L'approche réglementaire et fiscale est complémentaire de l'approche marché et peut jouer un rôle déterminant dans le développement d'une filière bioproduit, comme l'illustre l'exemple des biocarburants. Dès lors quelle place peuvent / doivent occuper ces politiques publiques dans le maintien d'une filière ?

Une des spécificités des filières produits biosourcés est la part importante des matières premières dans les coûts de production : 50 à 70 % pour l'industrie de la fermentation, 40 à 60 % pour l'amidonnerie, 30 à 50 % pour le papier (rapport du HCCA). La compétitivité des approvisionnements est donc cruciale. Plus généralement, la sécurisation des approvisionnements en biomasse en quantité et qualité suffisantes, à un prix compétitif et dans la durée, est indispensable à l'émergence des filières produits biosourcés. Cela soulève plusieurs questions relatives aux acteurs et à leurs interactions :

<sup>688</sup> Sparling, D., J. Crafiled, et al. (2006). The Canadian Bioproducts Industry Analysis of the Bioproduct Development Survey. Canadian Agricultural Economics Society. Montreal, Quebec.

- Quelle contractualisation entre producteurs de ressource et transformateurs ? Quels sont les déterminants du prix d'achat de la matière première ? Quels sont les impacts des politiques publiques sur ce prix ? Comment rétribuer la qualité de la biomasse ? Comment valoriser économiquement les externalités positives des nouvelles filières produits biosourcés ?
- Quel rôle peuvent jouer les coopératives agricoles et forestières et les Cuma dans l'optimisation de la collecte de la ressource et sa mise sur le marché ? Quelles interactions avec les transformateurs (répartition géographique) ?
- Comment les représentants de la société civile peuvent inciter les consommateurs à privilégier des choix de produits induisant un surcoût économique compensé par un bénéfice environnemental ?

### 5.5.5.3. Aménagement du territoire : dynamiques d'acceptabilité sociale et environnementale

#### *Éléments de réflexion*

Le concept de bioproduit conduit à poser la question de l'acceptabilité sociale et environnementale par rapport à deux dimensions d'acceptabilité : celle des produits finis, *via* les conséquences sociales et environnementales de leur utilisation, celle de la fourniture des intrants naturels nécessaires à leur élaboration. Les échanges du groupe de travail se sont centrés implicitement sur la deuxième dimension en liant cette acceptabilité au concept de territoire. Il est cependant évident, à l'instar du débat sur les nanotechnologies, que les produits résultants de l'ingénierie industrielle puissent poser des problèmes d'acceptabilité environnementale. Des travaux pourraient donc être également initiés sur cette thématique.

Il résulte des travaux de l'atelier que la question de l'importance des besoins en biomasse doit être appréhendée prioritairement par la demande en ressources. Dans ce cadre le concept de polyvalence défini dans cet atelier prend toute son importance. On l'abordera ici essentiellement du point de vue de la ressource :

- La polyvalence de la destination finale (alimentation, énergie, chimie,...) de la biomasse provenant des modes culturels agricoles ou sylvicoles actuels aura un effet éventuel indirect sur les modifications du paysage par l'implantation de nouvelles unités de première transformation de la ressource. Elle pourrait être surtout créatrice d'externalités négatives du fait des nuisances induites (transports, émissions,...).
- La polyvalence des espaces, selon le type de biomasse cultivée, va interférer par contre directement sur les territoires, en particulier sur les paysages. D'autre part, selon l'intensité des modes culturels, des rythmes de récolte et des circuits de mobilisation de la ressource, l'organisation spatiale des activités va impacter directement sur les modes de vie des populations.

L'acceptabilité environnementale et sociale va pouvoir être appréhendée en discriminant les types de populations concernées selon un zonage adapté des territoires. Selon qu'il s'agira d'usagers permanents (résidents,...), d'usagers réguliers (transit,...), ou occasionnels (tourisme,...) les perceptions seront différentes. De plus l'intégration professionnelle aux activités de production pourra modifier cette perception. On entre ainsi dans la problématique de conflits d'usages.

La revue *Géographie, Économie et Société* a consacré deux numéros sur le thème des conflits d'usage (2007/2, vol. 9 et 2006/3, vol. 8) dont on trouvera une synthèse dans l'ouvrage de Kirat et Torre<sup>689</sup>. L'analyse des conflits est appréhendée du point de vue « des conflits liés à l'espace en termes d'usage

<sup>689</sup> Kirat, T. and A. Torre (2008). Territoires de conflits, Analyse des mutations de l'occupation de l'espace.

et de voisinage ». La notion est très vaste puisqu'elle s'intéresse à tous types de conflits : du projet d'aménagement d'une infrastructure au changement d'affectation des terres, aux droits de propriété et à la prise de décision publique sur les usages du sol. Les auteurs posent la question des conflits d'usage à l'intersection de l'économie publique locale et de l'environnement. Ils contribuent, en ce sens, à l'analyse des formes et de l'intensité des conflits d'usage à la fois dans les espaces ruraux et périurbain.

Si le développement de ces recherches s'inscrit dans une perspective pluridisciplinaire, les auteurs soulignent la dynamique des recherches en géographie (*Land-Use Conflicts*) plutôt qu'en économie, sociologie ou en science politique pour lesquelles ce sont plutôt les problèmes posés par les conflits d'usage en tant que tels (externalités, choix publics, prix hédoniques) qui comptent, plus que le processus de révélation des conflits et de leur résolution ou de l'étude de l'usage du foncier et des questions d'externalités associées voire corrigées ou imposées par les pouvoirs publics.

Cette question des conflits d'usage est directement liée aux différentes fonctions que l'on associe aujourd'hui aux espaces ruraux et qui sont à l'origine de tels conflits<sup>690</sup>. En effet, les espaces ruraux, au-delà de la fonction agricole, peuvent aussi être dotés d'une fonction récréative ou touristique, résidentielle et environnementale. Ces différentes fonctions ne manquent pas de faire peser de nouveaux enjeux sur ces espaces. Ces enjeux peuvent être de nature politique, économique, voire stratégique... Ils soulignent la question des rationalités (et irrationalités) « aménageantes », celle des contradictions et dilemmes de l'aménagement du territoire. Ces contradictions se retrouvent dans de nombreux ouvrages d'aménagement du territoire qui soulèvent les problématiques de l'efficacité *versus* l'équité, de l'aménagement *versus* l'environnement (on parle de « ménagement » de la nature) ou plus traditionnellement de la planification *versus* le libéralisme (certains parlent de « déménagement »). La question du point de vue de l'économie publique est ici fondamentale : lorsqu'on met en place une politique sur un territoire, anticipe-t-on ses paradoxes, les conflits, les rationalités des agents et des acteurs en présence ?

Si la question du changement d'affectation des terres peut paraître secondaire dans le cadre des pays développés, en restant centré sur la polyvalence des terres agricoles, la question peut être considérée comme très pertinente pour les pays en voie de développement ou, par exemple, la déforestation continue à un rythme soutenu, *via* des reconversions d'espaces naturels vers de espaces d'élevage ou de cultures de biomasse à usage énergétique. Il semble cependant, à l'exemple des pays d'Amérique Latine, que l'introduction de nouvelles espèces végétales risque d'être fortement réglementée à l'avenir (Voir par exemple les communications du 13ème Congrès Forestier Mondial à Buenos Aires en Argentine, du 18 au 25 Octobre 2009).

Cette question fait l'objet de nombreuses réflexions économiques. Ces travaux mobilisent différentes méthodes telles que celle des prix hédoniques, les modèles de durée ou logit pour capter les principaux déterminants des transactions de parcelles<sup>691</sup>. L'ensemble de ces travaux présente un support théorique commun : la question de la conversion des parcelles est étudiée à partir du modèle traditionnel de la rente d'enchère. Plus généralement, les déterminants de la conversion foncière concernent, soit les qualités propres à chaque terrain<sup>692</sup>, soit le contexte spatial du terrain que nous pouvons définir par l'expression des externalités spatiales de voisinage.

---

<sup>690</sup> CIADT (2003). *Quelle France Rurale Pour 2020? Contribution À Une Nouvelle Politique De Développement Rural Durable.*

<sup>691</sup> Carrion-Flores, C. and E. G. Irwin (2004). Determinants of Residential Land Use Conversion and Sprawl at the Rural-Urban Fringe. *American Journal of Agriculture Economics* 86: 889-904.

<sup>692</sup> Claassen, R. and A. Tegene (1999). Agricultural Land Use Choice: a Discrete Choice Approach. *Agricultural and Resource Economics Review* 28(1): 26-36.

## Questions de recherche

Des travaux de recherche doivent permettre d'éclairer les conflits d'usages potentiels de l'espace, qu'il s'agisse de modifications réelles d'usage ou d'externalités. L'existence d'externalités positives n'est pas à exclure, mais d'une moindre éventualité dans le contexte retenu du développement de cultures à destination d'industries de transformation. Un premier axe de recherche concerne la détermination des bénéfices induits par une utilisation plus efficiente des espaces en termes de création de valeur ajoutée directe pour les productions primaires répondant à des objectifs de développement durable. Nous ne reviendrons pas ici sur le développement de modèles bioéconomiques déjà signalé par ailleurs. La question de la valorisation du foncier agricole et forestier face à une réduction des surfaces disponibles pour la culture alimentaire ou de biomasse est également un enjeu important.

Les changements induits par une nouvelle organisation de la production agricole vont jouer sur les modifications de valeurs des aménités associées à ces espaces. L'approche pourra être menée à partir des différentes méthodes d'évaluation directes. Nous n'insisterons pas sur ces méthodes maintenant bien connues<sup>693</sup>. Notons que des typologies de population devraient être établies, les pertes d'aménités pouvant toucher différemment les acteurs selon leur degré d'intégration dans la filière. De façon plus générale la place des études sociologiques sur les critères d'acceptabilité sociale devrait être importante.

Il serait bon également d'analyser au niveau du territoire les effets des transformations induites par l'implantation éventuelle de nouveaux réseaux de mobilisation de la ressource et par l'implantation d'unités de première transformation industrielle. Ce serait l'occasion, *via* les bilans carbone obtenus à partir d'ACV, d'intégrer dans les décisions économiques les contraintes induites par une optimisation du cycle du carbone (coûts des transport de la ressource, etc.). Il faudrait évaluer les effets de la polyvalence résultant de l'émergence des biocarburants de seconde génération (par rapport à la première génération) pouvant être produits à partir de nombreuses cultures adaptées à des contextes pédoclimatiques variés. La question de la localisation des productions (terres marginales / terres les plus productives) est une question cruciale du point de vue des impacts, à la fois par l'ampleur de la concurrence avec la production alimentaire et par les effets sur l'environnement (possibilités de constituer des trames vertes par exemple).

Une attention particulière devra être portée aux enjeux environnementaux posés par le maintien de la biodiversité et l'introduction à plus ou moins grande échelle de cultures nouvelles<sup>694</sup>. La question des mesures de compensation territoriale face à la disparition de modes culturels existants devra être posée (réduction des espaces forestiers, des surfaces à vocation alimentaire,...). En dehors de la substitution des types de culture, la modification des pratiques culturelles (émission du carbone séquestré dans les sols,...) est-elle préjudiciable à la séquestration du carbone ? Les principes de compensation volontaire peuvent-ils être appliqués aux émissions de carbone induites par les changements de mode culturels<sup>695</sup> ?

On pourrait également s'interroger sur le rôle des services écosystémiques dans la définition de la durabilité des systèmes de production agricoles<sup>696</sup>. Quel rôle joue la biodiversité dans la durabilité des

<sup>693</sup> Madureira, L., M. Rambonilaza, et al. (2007). Review of methods and evidence for economic valuation of agricultural non-commodity outputs and suggestions to facilitate its application to broader decisional contexts. *Agriculture Ecosystems & Environment* 120(1): 5-20.

<sup>694</sup> Paschou, M., G. Sakellaris, et al. (2007/04). Public attitudes towards the industrial uses of plants. The EPOBIO survey. Newbury (GBR), CPL Press.

<sup>695</sup> Caisse des Dépôts et Consignation (2009). *Carbon Markets : The Simple Facts*.

<sup>696</sup> Dalgaard, T., S. Ferrari, et al. (2006). Features of environmental sustainability in agriculture: some conceptual and operational issues. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and*

systèmes de production ? Quelle place doit prendre la production de services écosystémiques<sup>697</sup>, tels que les services d'approvisionnement (nourriture, eau douce, bois combustible,...) et les services de régulation (du climat, de l'eau, pollinisation,...) dans les pratiques agricoles et les choix cultureux. Il serait intéressant d'explorer cette question sous l'angle de la production de biomasse dans les agro-écosystèmes. Cette piste devrait permettre d'appréhender le caractère multifonctionnel<sup>698</sup> des systèmes en jeu, à la fois en considérant l'offre de ressources de biomasse et la demande de la société. Il serait alors possible de caractériser la transition vers des systèmes de production durable d'un point de vue environnemental en intégrant la dimension temporelle des agro-écosystèmes, et d'un point de vue socio-économique les préférences des agents économiques (expression du niveau d'acceptabilité). La nature des ressources utilisées (potentiel génétique, interaction inter espèces,...) pourrait également faire l'objet d'une réflexion pour orienter les choix économiques : peut-on en effet désigner les produits biosourcés selon une appellation « génétiquement modifiés » ? Quelles sont les implications d'un tel « label » ? De façon plus générale quelle est la place de l'innovation environnementale dans le processus productif de produits biosourcés ?

#### 5.5.5.4. Conditions d'acceptabilité des OGM pour les filières produits biosourcés

##### *Éléments de réflexion*

Si les biotechnologies sont l'un des moyens permettant de basculer vers une économie fondée sur le carbone renouvelable, l'une d'elles, le génie génétique, fait l'objet d'une très vive controverse et dans certains pays, notamment en Europe, une majorité de la population la rejette en raison des risques environnementaux, sanitaires, socio-économiques et éthiques craints. Cependant l'attitude envers les OGM dépend de nombreux facteurs et notamment du type d'OGM considéré qui influe sur le bilan bénéfiques / risques perçu. Ainsi par exemple l'usage du génie génétique pour la production de médicaments ou de vaccins est en général bien accepté par opposition à leur usage agricole et alimentaire. Autrement dit, deux questions se posent : (i) comment sont perçus les produits biosourcés, les biomatériaux, les biocarburants, etc. ? (ii) comment serait perçu l'emploi d'OGM pour les obtenir ?

Ces questions doivent être abordées de façon dynamique, c'est-à-dire en prenant en compte l'évolution au cours du temps qui peut être sensible. En effet sur ces sujets peu liés à sa connaissance directe, le public se forge une opinion notamment en fonction de ce qu'il peut lire ou voir dans les médias et des échanges en ce domaine avec son entourage. Ces thèmes étant fréquemment évoqués, les opinions peuvent évoluer. C'est notamment le cas pour les produits biosourcés où les avis sont sans doute moins figés que pour les OGM et où divers points de vue s'expriment, la controverse y étant plus ouverte que pour les OGM.

L'un des moyens les plus utilisés pour appréhender les points de vue du public est de faire des enquêtes d'opinion sur un échantillon représentatif. Cette méthode donne une information pour l'ensemble de la population (et non seulement pour ceux qui s'expriment le plus), mais comporte certaines limites. En effet il s'agit d'un recueil rapide, hors contexte, d'une opinion qui parfois n'est pas encore constituée, d'où un certain risque d'artefact. Par ailleurs l'avis exprimé peut être différent du comportement effectif, par exemple quand la personne sera en situation réelle d'achat. Enfin les choix proposés dans les questions

---

Ecology 5(2-3): 107-115.

<sup>697</sup> FAO Food and Agriculture Organization (2007). La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. Payer les agriculteurs pour les services environnementaux. Roma (ITA).

<sup>698</sup> Ferrari, S. and M. Rambonilaza (2009). Agricultural activities, rural areas and natural environment: drawing up the frontiers of the multifunctionality concept. Rural landscapes and agricultural policies in Europe. A. Priorr and K. Müller, Springer Verlag: 21-34.

et la formulation de ces dernières influencent les réponses. Aussi faut-il surtout observer les valeurs relatives (entre catégories) des résultats et est-il utile de compléter les enquêtes par d'autres approches plus qualitatives (entretiens, etc.).

La perception des produits biosourcés au sens large a fait l'objet de quelques enquêtes, mais les questions y étaient généralement très centrées sur les biocarburants sans faire référence à un mode de production par génie génétique. De leur côté les OGM ont fait l'objet de nombreuses investigations en matière de perception et d'acceptabilité, mais cela concerne généralement les OGM alimentaires et de façon très exceptionnelle les produits biosourcés. Ainsi seules quelques très rares enquêtes ont abordé explicitement la question de la perception des produits biosourcés GM. On dispose donc de très peu d'indications sur leur acceptabilité.

En matière de biocarburants ou d'OGM, comme pour divers autres sujets de société, les Eurobaromètres réalisés à la demande de la Commission Européenne sont l'une des sources les plus intéressantes. En effet ils portent sur un échantillon assez important et représentatif dans chaque pays de l'UE et ils permettent la comparaison entre pays et parfois un suivi dans le temps quand la même question a été posée à quelques années d'intervalle. Pour illustration les tableaux 52 et 53 présentent les réponses à certaines questions d'Eurobaromètres récents abordant le thème des biocarburants ou des OGM.

Tableau 54 : opinion sur les carburants alternatifs dans l'UE parmi diverses mesures de lutte proposées contre le changement climatique

« Pour l'affirmation suivante, veuillez indiquer si vous êtes tout à fait d'accord, plutôt d'accord, plutôt pas d'accord ou pas du tout d'accord » (en % des réponses)

Des carburants alternatifs tels que les biocarburants devraient être utilisés pour réduire les émissions de gaz à effet de serre	2008	2009	2008	2009	2008	2009
	D'accord	D'accord	Pas d'accord	Pas d'accord	NSP	NSP
- pourcentage des réponses dans l'ensemble UE-27	70	75	18	15	12	10
- pourcentage des réponses en France	72	72	20	19	8	9

(Source : Eurobaromètre 69.2 et 71.1 sur les attitudes envers le changement climatique, enquêtes réalisées en mars-mai 2008 et janvier-février 2009)

Il apparaît que, début 2009, les biocarburants étaient considérés favorablement par les trois quarts du public. Cependant 15 % de la population dans l'UE-27 et 19 % en France y étaient opposés en raison des risques de concurrence pour l'usage des terres, de pollutions, de faible rentabilité ou de rendement énergétique insuffisant. Mais si cette option était perçue comme un moyen de lutte contre le changement climatique, peu d'Européens la classaient parmi les deux principales responsabilités des agriculteurs dans la société comme le montrent les Eurobaromètres portant sur « les Européens, l'agriculture et la politique agricole commune ». Quant à l'emploi des OGM en général, il fait l'objet d'une majorité d'avis négatifs, mais avec des variations selon les pays, l'âge, etc. En France, l'opposition apparaît plus forte que dans la moyenne de l'UE (tableau 53).

Tableau 55 : opinion sur les OGM dans l'UE

*L'utilisation des OGM fait actuellement l'objet d'un débat. Personnellement, êtes-vous en faveur ou opposé(e) à l'utilisation des OGM (% des réponses)*

	<b>Opposé</b>	<b>En faveur</b>	<b>N'en a jamais entendu parler(*)</b>	<b>Non réponse</b>
Ensemble UE-27	58	21	9	12
France	70	15	2	13

(\*) Réponse spontanée (ce choix n'était pas initialement proposé).

(source : Eurobaromètre 68.2 sur les attitudes des citoyens européens envers l'environnement, enquête réalisée en novembre-décembre 2007)

Si certains Eurobaromètres ont interrogé sur l'opinion envers les biocarburants, aucun n'a évoqué les produits biosourcés GM. Cependant certains travaux de recherche parmi ceux financés par les Programmes Cadres de R&D de l'UE, ont abordé ce thème. Citons en particulier le projet EPOBIO (Realising the Economic Potential of Sustainable Resources - Bioproducts from Non-food Crops) qui comportait un volet sur les attitudes du public envers l'utilisation industrielle des plantes<sup>699</sup>. Une enquête y a été réalisée en octobre-novembre 2006 sur un échantillon représentatif dans 7 pays de l'UE (France, Allemagne, Grèce, Italie, Espagne, Suède, Royaume-Uni). Entre autres le questionnaire interrogeait sur l'opinion en matière d'utilité et de risque pour la société ainsi que d'acceptabilité morale de trois usages industriels des plantes. Ces derniers concernaient (i) le développement de cultures GM ayant une composition enrichie en composés intéressants pour un usage industriel, (ii) la combustion à la fin de leur vie utile de produits issus des plantes pour produire de l'énergie, (iii) l'usage de cultures alimentaires pour des buts non alimentaires.

Il est intéressant de comparer les résultats de cette enquête à ceux de l'Eurobaromètre 64.3 de nov.-déc. 2005 qui comportait un important volet sur les opinions envers les biotechnologies et les OGM et où l'une des questions avait la même formulation. Les résultats montrent que les cultures génétiquement modifiées à usage industriel sont un peu mieux acceptées que ne le sont les aliments GM. En effet, le pourcentage de la population qui les approuve est plus élevé et elles sont considérées moins fréquemment risquées. Par ailleurs elles paraissaient être jugées utiles et moralement acceptables par une proportion du public un peu plus forte, du moins en France (tableau 54, figure 27).

L'enquête EPOBIO montre également que l'emploi de cultures alimentaires pour des usages non alimentaires est assez bien accepté : près de 80 % des Européens des sept pays interrogés le jugent utile. Mais, si en dehors du projet EPOBIO, la question de l'acceptabilité des OGM pour l'obtention de produits biosourcés est parfois évoquée, les enquêtes en la matière sont rarissimes comme le signale Verbeke<sup>700</sup>.

<sup>699</sup> Paschou, M., G. Sakellaris, et al. (2007/04). Public attitudes towards the industrial uses of plants. The EPOBIO survey. Newbury (GBR), CPL Press.

<sup>700</sup> Verbeke, W. (2007). Consumer attitudes toward genetic modification and sustainability: implications for the future of biorenewables. *Biofuels Bioproducts & Biorefining* 1(3): 215-225.



Tableau 56 : perception de l'utilité, du risque et de l'acceptabilité morale de divers types et usages des plantes

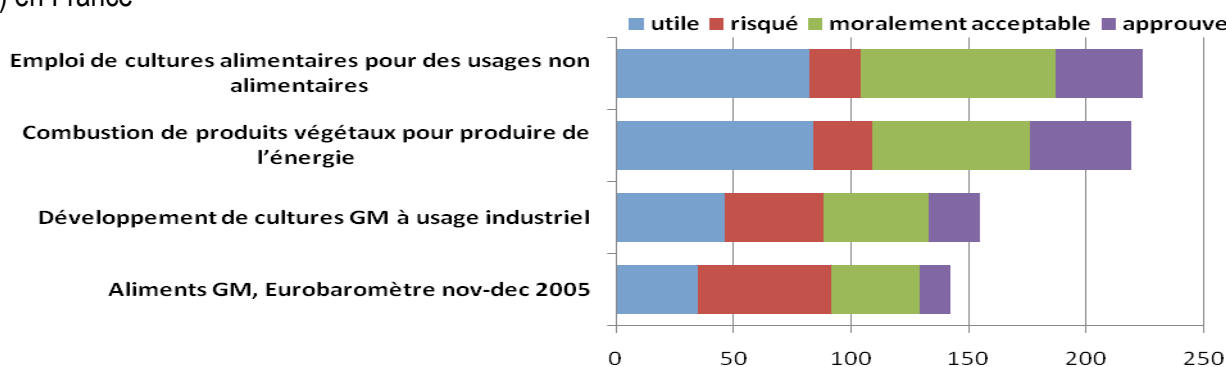
Perception (% des réponses)	Utile		Risqué		Moral. acceptable		Approuve	
	7 pays (*)	France	7 pays (*)	France	7 pays (*)	France	7 pays (*)	France
Type de plantes et usages :								
- Emploi de cultures alimentaires pour des usages non alimentaires	80	82	24	22	78	83	39	37
- Combustion de produits végétaux pour produire de l'énergie	79	84	26	25	68	67	37	43
- Développement de cultures GM à usage industriel	41	46	43	42	41	45	21	22
- Aliments GM (Eurobaromètre 2005, UE-25)	40,4	34,7	55,1	56,6	41,4	37,8	13,8*	13**

\* France, Allemagne, Grèce, Italie, Espagne, Suède, Royaume-Uni, sauf pour la dernière ligne UE-25.

\*\* % d'approbation « avec la réglementation en cours »

(source : pour les 3 premiers choix, enquête EPOBIO en octobre-novembre 2006 dans 7 pays ; pour les aliments GM, Eurobaromètre de novembre-décembre 2005 dans l'UE-25)

a) en France



b) dans sept pays de l'UE pour les 3 premiers choix ; pour le dernier, UE-25.

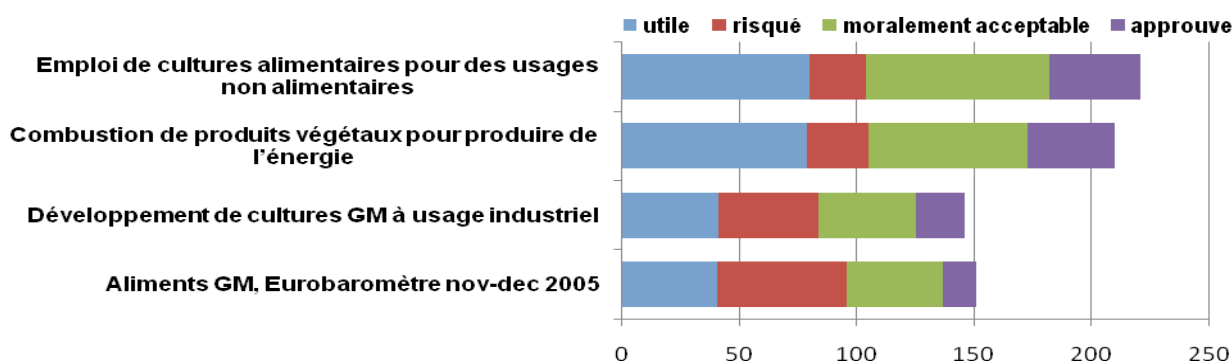


Figure 27 : perception de l'utilité, du risque et de l'acceptabilité morale de divers types et usages des plantes (source : pour les 3 premiers choix, enquête EPOBIO en octobre-novembre 2006 ; pour les aliments GM, Eurobaromètre de novembre-décembre 2005) (en % des réponses)

Quelles seraient les conditions d'acceptabilité des OGM dans les filières produits biosourcés ? Quelques investigations ont déjà été effectuées à ce sujet, outre l'enquête EPOBIO, mais elles ont porté surtout sur les points de vue d'acteurs impliqués, non du grand public. Ainsi des travaux ont examiné les facteurs susceptibles d'influencer les opinions en matière d'emploi des biotechnologies pour l'obtention de produits biosourcés. C'est le cas par exemple du projet BREW (*Medium and long-term opportunities and risks of the biotechnological production of bulk chemicals from renewable resources*) coordonné par M. Patel de l'Université d'Utrecht<sup>701</sup>. Une partie du projet a examiné les aspects qui agissent sur la perception du public d'une part à partir d'une revue de la littérature, d'autre part à l'aide d'une enquête auprès d'acteurs impliqués ou informés en la matière (acteurs des secteurs industriel, gouvernemental, académique ou d'ONG). La revue de la littérature les a conduits à élaborer une liste des aspects qui influent sur la perception du public, regroupés en trois domaines (tableau 57). Cette liste pourrait sans doute être enrichie et affinée en fonction des thèmes abordés dans la controverse actuelle sur l'utilisation non alimentaire des produits agricoles. Et elle devrait surtout être complétée pour ce qui concerne les OGM.

Tableau 57 : aspects influençant la perception du public dans l'application des biotechnologies pour produire des produits biosourcés

Aspects environnementaux et considérations éthiques	Aspects socio-économiques et macroéconomiques	Incidents de fonctionnement
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Durabilité des pratiques agricoles employées</li> <li>- Evolution de l'utilisation du sol et des terres, y. c. de la forêt</li> <li>- Evolution des paysages</li> <li>- Impacts sur l'effet de serre et la consommation d'énergie fossile</li> <li>- Consommation d'eau</li> <li>- Impacts sur la biodiversité</li> <li>- Autres usages possibles de la biomasse</li> <li>- Elimination de déchets</li> <li>- Fonctions de l'agriculture autres que la production</li> <li>- Emploi d'OGM</li> <li>- Niveau de compréhension des impacts des OGM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sécurité des approvisionnements et indépendance vis-à-vis des importations de pétrole</li> <li>- Effets sur les pays en développement, notamment sur les prix et les disponibilités alimentaires</li> <li>- Prix des produits finaux obtenus</li> <li>- Rôle des médias, des associations environnementalistes et consommateurs</li> <li>- Redistribution de pouvoir entre certains acteurs de la société</li> <li>- Influence de la confiance envers l'industrie et les autres acteurs</li> <li>- Confiance dans le développement des unités de transformation de la biomasse à l'échelle locale.</li> <li>- Importance d'une localisation appropriée des unités de transformation à l'échelle locale.</li> <li>- Création d'emploi et compétitivité</li> <li>- Taille des unités de transformation</li> <li>- Perception de l'utilité et des risques des produits finaux</li> <li>- Evaluation éthique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La confiance est une condition indispensable</li> <li>- Niveau de compréhension scientifique</li> <li>- Existence de mesures de prévention et de sécurité</li> <li>- Sécurité du travail</li> <li>- Peur d'attaques terroristes</li> </ul>

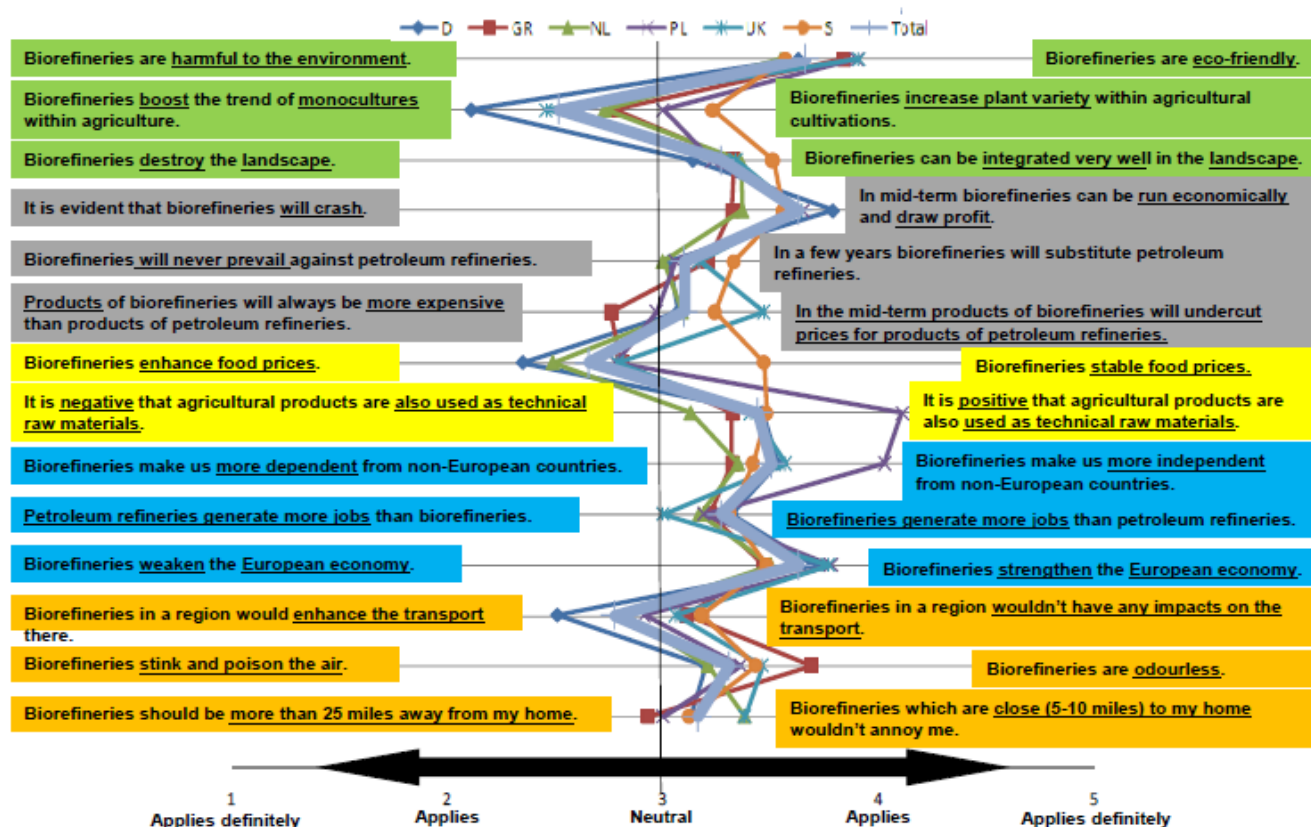
(source : Patel *et al.* 2006, op. cit., p. 245, modifié)

Deux autres projets européens plus récents ont également abordé certains aspects socio-économiques des bioraffineries : les projets « Biorefinery Euroview » et « Biopol ». Ce dernier visait à évaluer les aspects techniques, sociaux, environnementaux, politiques et d'implémentation de bioraffineries et leurs implications pour la politique agricole. Il comportait un volet sur l'acceptabilité de ce type d'établissement parmi des acteurs clés<sup>702</sup>. Une enquête a été menée dans six pays européens (Allemagne, Grèce,

<sup>701</sup> Patel, M., M. Crank, et al. (2006). *Medium and Long-term Opportunities and Risks of the Biotechnological Production of Bulk Chemicals from renewable Resources. The Potential of White Biotechnology. The BREW Project. Final report.* Utrecht (NLD), Utrecht University: 474.

<sup>702</sup> Kurka, S. and K. Menrad (2009). *Report of market acceptance of biorefinery concepts amongst consumers*, University of Applied Sciences Weihenstephan: 52.

Royaume-Uni, Pays-Bas, Suède et Pologne) auprès d'un échantillon non représentatif de la population de chacun. Entre autres les répondants devaient donner leurs avis sur certains aspects des bioraffineries. Pour cela le questionnaire présentait des attributs opposés (e.g. « les bioraffineries sont dommageables pour l'environnement » et « les bioraffineries sont favorables à l'environnement »), et les enquêtés devaient positionner leur attitude sur une échelle de 1 à 5 selon leur niveau d'accord avec les attributs. Les divers thèmes abordés portaient sur les aspects environnementaux, économiques, la concurrence entre usages alimentaires et énergétiques, les aspects politico-économiques et enfin les aspects régionaux et locaux (figure 28). Les résultats font apparaître comment les interviewés perçoivent les bioraffineries et le bioraffinage de façon globale et selon les pays.



L'enquête Biopol a aussi interrogé sur les qualités nécessaires à un bioproduit pour être acheté (figure 27) : cela fait apparaître l'importance des critères environnementaux. Mais il n'y avait pas ici de questions sur l'usage de biotechnologies ou de génie génétique. L'enquête EPOBIO de 2006 déjà mentionnée apporte un complément en la matière. Elle a interrogé en effet un échantillon représentatif sur les deux raisons majeures de soutien à l'introduction de nouvelles technologies d'utilisation de végétaux pour la production énergétique et de produits biosourcés. Le classement fait apparaître que les deux principales motivations sont les bénéfices environnementaux et la réduction de la dépendance en pétrole. Viennent ensuite à un moindre degré la création de nouveaux emplois, puis les bénéfices pour les consommateurs ; enfin, en dernier lieu parmi les cinq choix proposés, l'intérêt économique (figure 30). La hiérarchisation faite suggère que les aspects environnementaux, d'indépendance énergétique et de création d'emploi seraient des critères importants de soutien.

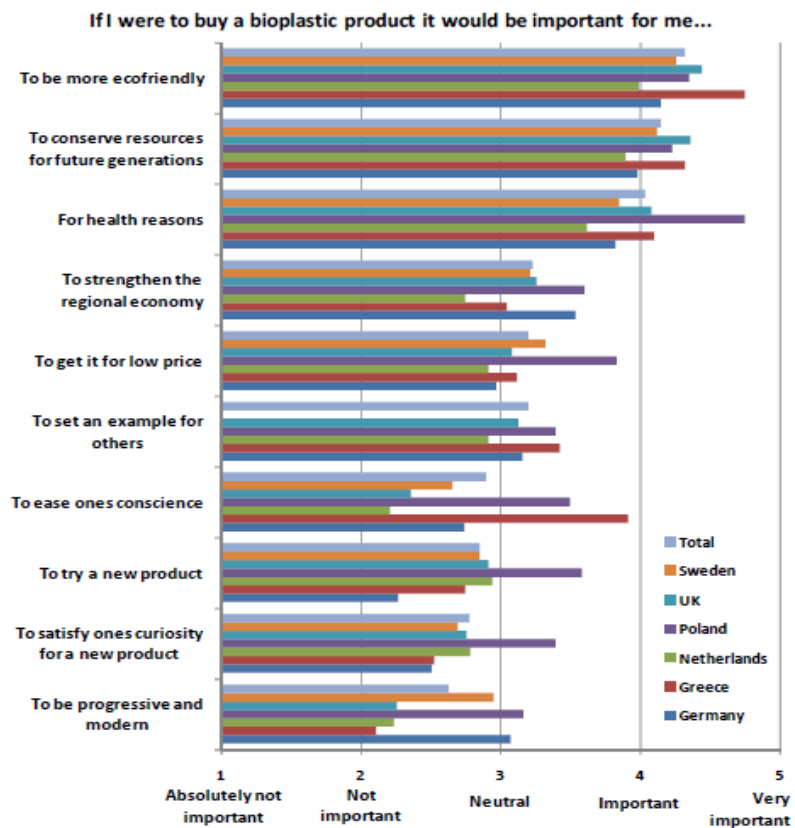


Figure 29 : Aspects importants considérés lors de l'achat d'un bioproduit selon l'enquête du projet BIOPOL (source : Kurka, Menrad, op. cit., p. 23)

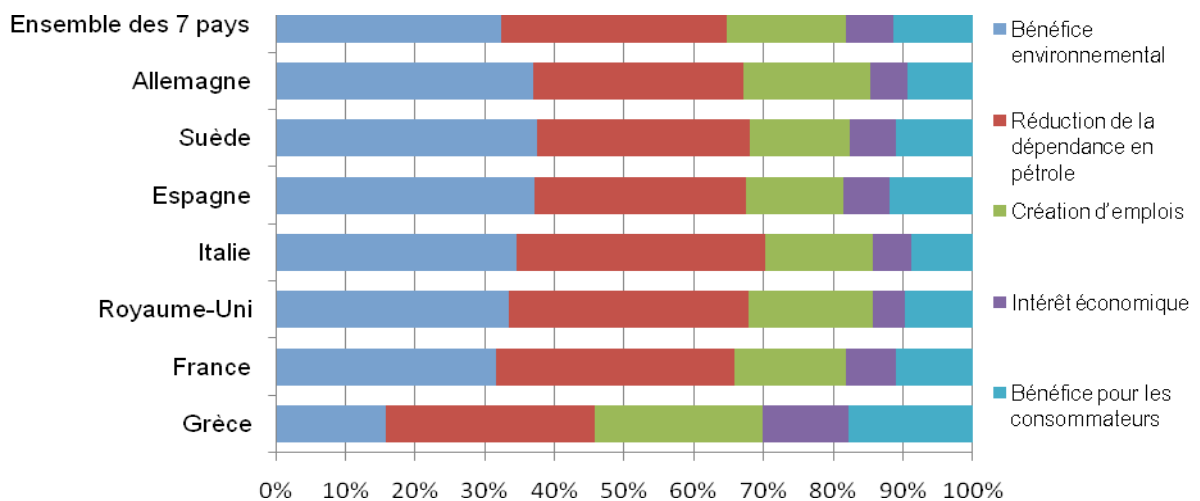


Figure 30 : Principales raisons du soutien aux produits biosourcés et aux usages énergétiques de la biomasse dans divers pays (source: enquête EPOBIO, oct.-nov. 2006, Paschou, Sakellaris, op. cit.)

## Questions de recherche

Compte tenu du très faible nombre d'enquêtes d'opinion réalisées sur l'acceptabilité de produits biosourcés GM, il semblerait utile d'en effectuer d'autres en la matière. Mais la réalisation de telles investigations est délicate, ne serait-ce qu'en termes d'obtention d'un échantillon représentatif, de formulation des questions, de moyens requis et de difficulté de traitements des non-réponses. D'autres méthodes plus qualitatives d'appréhension des opinions pourraient aussi être mobilisées. Par ailleurs il s'avèrerait utile de poursuivre les investigations sur l'identification des critères influant l'acceptabilité. Les quelques enquêtes déjà effectuées en la matière donnent de premières pistes dont il serait utile de continuer l'étude. En outre le positionnement et la communication des différents acteurs en la matière doivent être pris en compte car ils joueront sans doute un rôle important dans l'évolution des points de vue.

Ainsi des enquêtes d'opinion quantitatives et qualitatives pourraient aborder la perception de l'utilité, du risque, de l'acceptabilité morale et le degré d'approbation de divers usages des plantes. Parmi ces derniers, on peut mentionner l'emploi de végétaux comme matières premières à la place du pétrole pour faire (i) des carburants, (ii) des objets et produits (sacs d'emballage, etc.), (iii) des lubrifiants, (iv) des combustibles, etc. Puis le même type de question pourrait être posé à nouveau en proposant ces produits, mais avec emploi de plantes GM afin que leur composition soit adaptée à l'objectif envisagé et qu'elles captent mieux l'énergie solaire (par exemple). L'objectif serait alors de comparer la perception des divers produits biosourcés selon le type de plantes utilisées, conventionnel ou GM. Par ailleurs des questions pourraient porter sur les conditions d'acceptabilité des plantes GM en proposant diverses hypothèses pour limiter les divers types de risques craints aux niveaux environnemental, économique, social et de concurrence dans l'usage des terres. On peut ainsi envisager diverses possibilités de réduction des risques ou d'accroissement des bénéfices pour analyser comment des OGM pour faire des produits biosourcés seraient perçus dans chaque hypothèse. Par exemple, les hypothèses pourraient concerner : (i) des plantes sans usage alimentaire, donc sans risque de flux de gènes vers des plantes alimentaires, (ii) des produits biosourcés moins chers que les pétroproduits qu'ils remplacent, (iii) des cultures sans pesticide, (iv) des limitations en matière de surfaces occupées par les plantes à l'origine des produits biosourcés (e.g. ne pas dépasser un certain pourcentage de la surface totale des cultures, pourcentage révisé chaque année selon le niveau des récoltes et l'état des stocks), etc.

A ces conditions devrait s'ajouter dans les enquêtes la prise en compte de la question du partage bénéfices / risque. En effet l'opposition aux OGM alimentaires n'est pas due seulement à la crainte de risques sanitaires ou environnementaux. Elle est liée aussi au fait que leur bilan bénéfices / risques est souvent perçu comme déséquilibré : les avantages sont jugés inexistantes – sauf pour les multinationales qui les commercialisent –, les risques élevés – mais ils ne seront pas supportés par les firmes les ayant engendrés. De ce fait, des investigations sur la perception d'OGM destinés à faire des produits biosourcés devraient aussi aborder ces aspects : quels types d'entreprises et d'acteurs seront à l'origine des bioraffineries ? Y aura-t-il des bioraffineries réparties sur tout le territoire, ou seront-elles concentrées en un ou deux pôles ? Seront-elles créatrices d'emplois ? Quelle confiance sera placée dans les acteurs qui sont à leur origine ? Et à quelles conditions cette confiance pourrait-elle s'établir (faudra-t-il des certifications environnementales et sociales, la caution d'associations ?).

Ces investigations sur la perception de produits biosourcés issus d'OGM et de bioraffineries ne doivent pas concerner seulement le grand public, mais aussi les divers types d'acteurs impliqués. Par ailleurs une dimension prospective gagnerait aussi à être introduite : si l'usage du génie génétique paraît aujourd'hui utile pour conférer certaines qualités ou propriétés aux plantes, peut-on envisager que demain les avancées en matière de génomique et leurs retombées puissent permettre d'obtenir ces

résultats sans recours à la transgénèse ?

En conclusion, malgré la vive controverse qui s'est développée ces dernières années sur l'emploi de végétaux pour des usages non alimentaires (surtout sur les biocarburants), celui-ci semble perçu de façon relativement favorable par une assez grande partie de la population. Mais pour que cette perception perdure, de nombreuses conditions paraissent nécessaires, notamment aux niveaux environnemental et socio-économique et en matière de retombées pour les pays en développement. Par contre l'emploi d'OGM dans les filières produits biosourcés susciterait probablement un fort rejet, même s'il serait sans doute un peu moindre que leur emploi pour des produits alimentaires. Pour examiner à quelles conditions ce rejet pourrait diminuer, il paraîtrait nécessaire d'une part d'analyser les perspectives générales du génie génétique en agriculture par rapport à d'autres méthodes d'amélioration des plantes, d'autre part d'explorer les perspectives des produits biosourcés. Leur production et leur transformation pourront-elles être perçues comme durables et comme une voie vers un développement durable ?

### 5.5.6. Conclusions : synthèse des pistes de recherche

La posture du groupe de travail a été de développer une réflexion sur les filières produits biosourcés à partir de la notion de polyvalence afin d'intégrer les questions de faisabilité technico-économique, de durabilité écologique et d'acceptabilité sociale de façon dynamique dans un appel à recherches. La figure 31 montre les relations entre les différents champs de recherche identifiés. Le champ de recherche « Outils et Méthodes » devrait permettre d'approfondir le concept et alimenter la réflexion sur les effets structurants de la ressource et des processus de transformation d'une part, et sur le rôle des acteurs et leurs interactions d'autre part.

Insérer nouvelle version ppt

Figure 31 : Relations entre champs de recherche

Le produit de la réflexion du groupe a été croisé avec le travail réalisé en parallèle sur des scénarios lors d'une réunion finale. Les scénarios 2 et 4 correspondent à des situations où la notion de polyvalence peut s'exprimer de façon complète et dans l'ensemble de ses dimensions (polyvalence de la ressource et de la transformation). Les pistes de recherche indiquées sont totalement compatibles avec ces scénarios. A l'opposé, le scénario 1 correspond à une polyvalence « nulle » alors que le scénario 3 présente une situation intermédiaire.

Les scénarios présentés reposent sur des états de variables essentiellement économiques et politiques et leur présentation a suscité des interrogations pour les représentants du groupe de travail sur les aspects socio-économiques présents lors de cette réunion. En partant de l'hypothèse que le scénario décrit une situation assez proche de la situation qui prévaut aujourd'hui, il est possible de représenter de façon dynamique comment ces scénarios peuvent se développer dans le temps comme l'indique le schéma ci-dessous (Figure 32). Les champs de recherche sur les outils et méthodes (section 2) en particulier devrait permettre par la modélisation notamment d'apporter des éléments pour approfondir cette question.

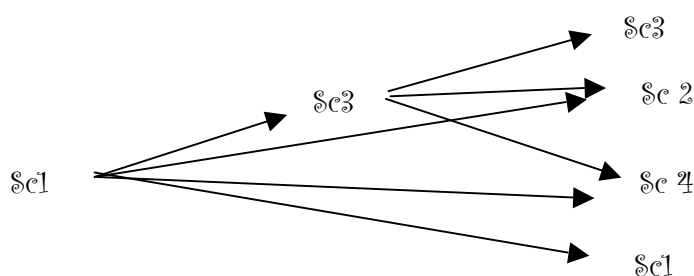


Figure 32 : Liens entre scénarios

La question qui se pose également est celle du statut de ces scénarios dans la réflexion de l'ARP VegA. Si l'on émet l'hypothèse que ce travail de prospective a pour but aussi de préparer l'avenir, quels sont les scénarios souhaitables et ceux qui le sont moins ? Cette question renvoie non seulement à des choix de nature politique impliquant les pouvoirs publics et les acteurs de la société civile, mais également à une nouvelle question de recherche sur la nature de ces choix pour passer d'une recherche orientée par des objectifs (réponse à une demande énergétique: voir les scénarios) ou par la logique des processus (technologiques, économiques) vers une recherche holistique, interdisciplinaire, sur les finalités de ces objectifs et de ces processus ? Quelle est la portée et la faisabilité de la gouvernance internationale dans une telle transformation ontologique ? C'est en approfondissant également ces questions qu'il sera possible de promouvoir des filières produits biosourcés conciliant faisabilité technico-économique, durabilité écologique et acceptabilité sociale.

## **5.6. Analyses de cycle de vie et bilans environnementaux**

La mise en place de nouvelles filières utilisant la biomasse comme matière première pour produire, *via* un grand nombre de procédés de transformation différents, une grande variabilité de produits, pose la question nouvelle des impacts environnementaux associés. Le contexte actuel, notamment du fait du développement important des filières biocarburants, est marqué par une demande forte de critères de durabilité associés à ces nouvelles filières, en particulier du point de vue environnemental.

Il existe différentes méthodes permettant d'évaluer le bilan environnemental de systèmes de production ou du cycle de vie de produits ou services, selon la définition du système étudié (ses composantes et son environnement, ses bornes et son horizon temporel, les fonctions prises en compte) et selon les critères et indicateurs utilisés (efficacité énergétique, bilan des émissions de gaz à effet de serre, biodiversité, consommation d'intrants et impacts associés aux échelles locale et globale, valeur paysagère, etc.).

La présente tâche est centrée sur les Analyses du Cycle de vie (ACV), qui proposent une méthodologie d'évaluation des impacts sur des filières complètes (par comparaison à des approches « site ») qui évaluent les impacts aux bornes d'une installation).

Le principal objectif de ce chapitre est d'identifier les lacunes des ACV existantes aujourd'hui dans leurs applications aux usages de la biomasse pour la production de biocarburants et la chimie du végétal, du point de vue des méthodologies d'évaluation et du point de vue des données et résultats disponibles.

Le champ de réflexion porte ici sur les produits bio-sourcés (bio-based products) au sens large et pas exclusivement sur les usages énergétiques de la biomasse. Les produits bio-sourcés sont définis ici comme les produits énergétiques et industriels issus du végétal hors des domaines de l'alimentaire et de la santé, dont les applications portent à la fois sur l'énergie (combustibles et carburants), la chimie organique et les biomatériaux, fabriqués directement ou indirectement à partir de biomasse. Il peut s'agir de produits nouveaux ou novateurs comme de produits conventionnels déjà existants.

L'ACV, au sens des normes ISO 14040 et 14044, est une méthodologie d'évaluation des performances environnementales d'un produit (par exemple carburant, biocomposite, intermédiaire chimique, etc.) ou d'un service (énergie mécanique fournie pour parcourir une certaine distance, énergie électrique, etc.). Le principe de l'ACV est d'évaluer ces performances sur l'ensemble des étapes constituant le cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières dans la nature jusqu'à la fin de vie ou le recyclage du produit. Dans la pratique, une ACV consiste alors à établir le bilan des flux entrant et sortant à chaque étape du cycle de vie, et à traduire ces flux en impacts sur l'environnement.

La norme définit 4 étapes principales dans une ACV (Figure 33).

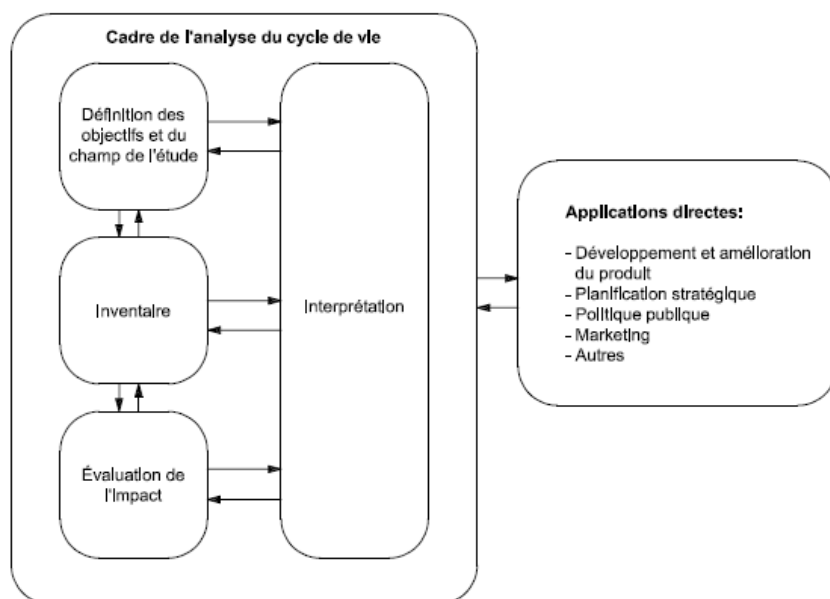


Figure 33 : schématisation des étapes d'une ACV

La première étape, visant à définir les objectifs et le champ de l'étude, est tout particulièrement importante, dans la mesure où les principales hypothèses structurant la suite de l'évaluation et l'interprétation qui peut en être faite sont définies à ce stade :

- La finalité de l'étude c'est-à-dire à quoi elle va servir et pour qui (commanditaires).
- Le type d'étude (évaluation d'un scénario ou d'une filière, évaluation d'une filière seule – en vue de l'identification des paramètres sensibles et des pistes d'amélioration – ou comparaison avec une filière de référence, et laquelle, etc.) : cette étude consiste dans tous les cas à faire une comparaison à savoir comparer d'un point de vue environnemental :
  - des systèmes concurrents rendant un même service
  - les étapes du cycle de vie d'un système

Les systèmes concurrents doivent être comparables c'est-à-dire que la comparaison porte sur une même fonction remplie par ces systèmes. Cette fonction doit être clairement explicitée par l'unité fonctionnelle. Il est à noter qu'il faut une adéquation entre la finalité, le type d'étude (appelé aussi objectif méthodologique) et l'unité fonctionnelle :

- étapes prises en compte ou négligées (typiquement les infrastructures) ;
- impacts évalués, théoriquement, l'ACV se veut exhaustive ;
- type et qualité des données nécessaires : cet aspect est généralement considéré dans la phase d'inventaire ;
- hypothèses de calcul, et notamment mode de prise en compte des coproduits et mode d'allocation des impacts entre produits et coproduits : cet aspect est généralement considéré dans la phase d'inventaire.

Les études de type ACV existant à ce jour sur les filières mobilisant la biomasse, quels que soient les usages finaux considérés, mettent en évidence l'influence de cette étape et des choix méthodologiques faits à ce stade sur les résultats finaux et l'interprétation qui peut en être faite.

L'application de l'ACV à ces filières, notamment en comparaison avec les systèmes de référence fossiles, fait apparaître des problématiques spécifiques. L'évaluation des impacts environnementaux des



filiales de référence porte sur des systèmes continus dans le temps, utilisant des technologies standardisées, alors que dans le cas des filiales biomasse, les systèmes sont par nature variables et discontinus, à la fois dans le temps (saisonnalité) et dans l'espace (conditions pédoclimatiques). La ressource est également très hétérogène et une problématique spécifique s'ajoute pour l'évaluation, celle de l'usage et des changements d'usages des sols. Enfin le niveau de description de chaque système peut également être hétérogène.

Il y a donc lieu d'adapter les méthodes d'évaluation de type ACV aux systèmes mobilisant la biomasse, en particulier pour tenir compte de leurs spécificités intrinsèques.

L'état des lieux des applications des ACV aux filiales bio-sourcées, utilisant la biomasse pour les usages énergétiques, la production de matériaux ou la chimie verte met en évidence une grande hétérogénéité des études, selon :

- le type de produit étudié : beaucoup d'études existent sur les biocarburants et la production d'énergie, sur les matériaux bois, mais encore peu sur la chimie verte ;
- le type d'impact étudié : beaucoup d'évaluation portent sur les émissions de GES et les consommations d'énergie (en général plutôt énergie non renouvelable), peu sur les autres impacts, locaux en particulier.

### **5.6.1. Définition des approches possibles pour l'évaluation environnementale**

Parmi les différentes études ACV existantes, il y a lieu d'en distinguer au moins deux grands types :

- les ACV rétrospectives, dont l'objet porte sur des produits ou filiales déjà mis en place,
- les ACV prospectives, dont l'objet porte sur l'évaluation des impacts ou des variations d'impacts associés à l'introduction de nouvelles filiales ou à des changements dans les filiales ou mix de produits existants.

Cette distinction permet de mettre en avant des différences possibles dans les choix méthodologiques associés :

- pour le mode d'allocation des impacts en cas de coproduction,
- pour le choix de filiales de référence, tant pour les coproduits que pour les produits principaux,
- pour la qualité des données et les calculs de sensibilité ou d'incertitudes.

Pour le choix d'un mode d'allocation, alors qu'une étude prospective, dont l'objectif serait par exemple une aide à la décision pour le choix du développement d'un produit nouveau ou d'une filiale nouvelle, appliquera plutôt la méthode de substitution des impacts évités, une étude rétrospective pourra utiliser plutôt une méthode d'allocation basée sur des paramètres physiques ou économiques, représentatifs de la situation décrite (marchés, contraintes techniques et économiques) et des liens de causalité entre les activités et les impacts environnementaux associés. Selon la norme, ces deux modes (voire les autres) doivent être appliqués pour vérifier qu'elles n'engendrent pas de différence sur le résultat final.

La nécessité de disposer de bilans environnementaux relatifs à des filiales de référence n'apparaît que dans certains types d'études. Tout d'abord, une référence fossile n'est utile que si l'objectif est de comparer les impacts potentiels d'un produit bio-sourcé par rapport à un équivalent fossile : il n'y a donc pas lieu d'en définir si l'objectif de l'étude est une évaluation stricte d'une filiale produit bio-sourcée. Ensuite, il est également nécessaire de définir des références pour les coproduits, dans le cas où c'est la méthode de substitution des impacts évités qui est choisie : il convient alors d'identifier les filiales auxquelles les coproduits vont se substituer.

Enfin, des questions se posent sur la représentativité ou la validité d'une ACV aux différentes échelles :

- géographiques : quelle représentativité d'une ACV par exemple à l'échelle nationale en fonction des données d'évaluation disponibles aux échelles locales ? Il ne faut pas confondre étude d'impact et ACV : la première est une évaluation environnementale fine d'un système dans un contexte environnemental réel et précis et la deuxième est une évaluation environnementale plus ou moins grossière des impacts potentiels d'un système quel que soit son contexte ;
- temporelles : dans le cas des filières en développement pour lesquelles il n'existe pas ou peu de données, quelle validité d'une ACV basée sur des données partielles ou non vérifiées ? Quel que soit le modèle scientifique, sa validité repose sur ses hypothèses.

### 5.6.2. Disponibilité et qualité des données

Selon l'échelle géographique considérée pour l'étude, la qualité des données et leur représentativité peuvent être variables : ainsi, des données spécifiques peuvent être utilisées pour des études de cas à une échelle locale, tandis que des valeurs moyennes seront préférées pour une étude théorique à une échelle nationale.

On doit distinguer 3 niveaux de représentativité :

- Représentativité technique ; niveau technologique
- Représentativité géographique (un site, une moyenne régionale, nationale, ...)
- Représentativité temporelle : données sur le fonctionnement moyen du système sur 1 an, 5 ans, ...

La question du changement d'échelle géographique dans les ACV reste assez peu traitée, bien qu'importante lorsqu'il s'agit de passer de paramètres régionaux ou locaux à des valeurs représentatives d'un pays, par exemple dans un contexte de certification.

#### 5.6.2.1. Typologie des données disponibles

##### *État de l'art, bases de données existantes*

###### *Connaissances actuelles*

Les données d'inventaire peuvent être classées en deux groupes :

- les données d'inventaire de production : les intrants associés à chaque processus unitaire (matières premières et agents énergétiques nécessaires)
- les données d'émissions et d'extraction liées à ces intrants : ces données sont recherchées soit par contact direct avec les entreprises de la branche concernée, soit dans des bases de données.

Les différentes bases de données existantes à travers le monde et accessibles au public sont répertoriées par Norris et Notten<sup>703</sup>, un travail anciennement assuré par SPOLD. Ce répertoire est mis à jour dans le cadre de l'initiative pour le cycle de vie du programme des Nations Unis pour l'environnement (PNUE) et disponible sur Internet.

<sup>703</sup> Norris et Notten 2002 *B P Weidema (2000) · SPOLD Data Exchange Software*. A software to create, edit, view, import and export data sets for environmental life cycle inventories using the SPOLD data format. Brussels: SPOLD. *G A Norris, J Segal (2002) · Life cycle sustainable development: an extension of the product life cycle assessment framework to address questions of sustainable consumption and development*. Pp. 193-205 in Hertwich E. (ed.): "[Life-cycle approaches to sustainable consumption](#)". Workshop proceedings." International Institute of Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 2002-11-22.

Au niveau Européen, les différents instituts des Ecoles polytechniques suisses ont travaillé à la réalisation de la base de données ECOINVENT valable pour la Suisse et les pays d'Europe Occidentale.

Des données d'inventaires sont compilées pour un grand nombre de produits et services. Les thèmes répertoriés dans la base sont :

- l'approvisionnement en énergie
- les matériaux et processus de construction
- les produits chimiques
- les détergents
- les papiers graphiques
- les services de traitement des déchets
- les produits et processus agricoles
- les transports

#### *Identification des vides de connaissances*

L'obtention de données d'inventaires fiables, clairement décrites et régulièrement mises à jour n'est pas aisée et peut rendre délicate l'application de l'analyse du cycle de vie.

Des études scientifiques font apparaître des données qu'il faudrait intégrer dans une base générale contrôlée et mise à jour. Des industriels ont également en leur possession des données qui pourraient être, après validation, intégrées à cette base. C'est donc un travail de bibliographie active qui serait à réaliser.

#### **Questions de recherche, en lien avec les vides de connaissances identifiés**

La mise en place d'un projet de référentiel de données française serait une piste à poursuivre.

#### ***Particularités des productions agricoles et forestières***

Les données d'inventaire liées aux productions agricoles et forestières sont plus nombreuses, plus diverses, plus variables, et plus difficiles à mesurer que celles liées à l'extraction de matières premières d'origine non renouvelable et donc cela nécessiterait de réfléchir sur la façon d'acquérir ces données à moindre coût et sur leur représentativité ?

Comparativement aux ressources d'origine non renouvelable exploitées actuellement dans le monde, les bioressources représenteraient en nombre une grande richesse. Cette grande diversité pourrait engendrer en ACV un travail important de collecte de données sur la mise à disposition de ces bioressources. Par ailleurs le nombre de données à collecter par bioressource et les difficultés à les acquérir pourraient rendre encore plus lourd ce travail. Le poids que représenterait la collecte des données amont (mise à disposition des ressources), pourrait donc être plus important pour les produits biosourcés que pour les produits d'origine non renouvelable dans les évaluations ACV. Une réflexion sur l'organisation et l'optimisation de l'acquisition de ces données pourrait donc être intéressante.

#### **5.6.2.2. Calculs d'incertitudes**

Malgré un consensus sur l'importance de traiter les incertitudes en ACV, celles-ci sont la plupart du temps ignorées. Leur prise en compte permettrait pourtant d'identifier les étapes nécessitant des travaux supplémentaires pour les réduire, mais aussi leur analyse devrait faire partie intégrante de l'analyse de résultats d'ACV. Comment en effet comparer des scénarios sans évaluer la significativité des différences mesurées ?

Avant de décrire les pratiques actuelles et les questions scientifiques liées aux calculs d'incertitudes en ACV, il est important de définir ce qu'on appelle incertitude. Les méthodes mathématiques de traitement de l'incertitude décrivent généralement quatre types d'incertitude, illustrées ici par la description du tir d'un dé à 6 faces :

- L'incomplétude (*incompleteness*) d'une information correspond à l'affirmation qu'une union de propositions est vraie sans préciser lesquelles sont réellement vérifiées ; par exemple « la face du dé est un nombre pair ».
- Son caractère approximatif (*vagueness*) est lié à une définition approximative d'un terme du langage (grand pour une taille), il revient à une imprécision entre plusieurs sous-propositions ; par exemple « la face tirée est grande ».
- La validité (*validity*) d'une information mesure la fiabilité de la source d'information. Ainsi l'information « la face est 6 » est peu pertinente si elle est fournie par un observateur particulièrement myope.
- Son inconsistance (*inconsistency*) exprime le fait qu'une même base de connaissances permette d'inférer une proposition et son contraire, un observateur affirme en même temps que la face est 6 et que la face est impaire.

Deux grandes catégories d'incertitudes sont ici définies : l'imprécision et la pertinence. Ces deux notions sont relativement indépendantes puisqu'elles se réfèrent à des niveaux différents de l'information. En revanche, elles sont duales dans la pratique puisque plus une information est imprécise, plus elle a de chances d'être pertinente (l'information la face tirée est un nombre entre 1 et 6 est peu précise mais très pertinente).

Plusieurs formalismes sont utilisables pour représenter l'incertitude d'une source d'information : théorie des probabilités, théorie des possibilités et des sous-ensembles flous, théorie des croyances. Il est généralement possible de traiter des problèmes complexes avec chacun des formalismes. Cependant selon le formalisme choisi, la représentation de l'incertitude est plus ou moins explicite. Le choix du formalisme tient donc autant des capacités théoriques de ce formalisme à représenter les sources d'incertitude d'un problème donné que de la facilité à les utiliser dans le contexte.

Les incertitudes en ACV ont plusieurs origines, recensées par la méthode du pedigree proposée par Weidema et utilisée de manière systématique dans la base Eco-Invent :

- Complétude de la donnée : les données collectées forment-elles un échantillon statistiquement représentatif ?
- Corrélations géographique, temporelle ou technologique : le manque d'inventaire pousse les praticiens à utiliser des valeurs de systèmes considérés comme proches mais différant soit par leur localisation, leur période de validité ou le type de technologie considéré.
- Fiabilité de l'information.

La méthode du pedigree agrège les scores de ces 5 origines pour décrire un taux de variation, lequel est utilisé pour paramétrer une loi de distribution, généralement normale ou log-normale. Implicitement cette méthode fait le choix d'une description probabiliste de l'incertitude et agrège en un indicateur unique les notions d'imprécision et de pertinence. La théorie des possibilités a été citée plusieurs fois dans la littérature ACV mais sans que les différences d'interprétation entre ces deux formalismes ne soient réellement explicitées.

Vient ensuite la question du calcul d'incertitude en lui-même. Suite à l'inclusion de méthodes de Monte-Carlo dans les logiciels phares du marché, cette méthode est actuellement la plus utilisée : elle consiste à générer un grand nombre de scénarios différents par tirage au sort de différents jeux de paramètres, en

accord avec leur distribution de probabilité. Cette méthode permet de simuler la distribution de chaque émission et donc des impacts associés. Le principal avantage de cette méthode est la facilité de sa mise en œuvre. Cependant le grand nombre d'étapes unitaires dans une ACV nécessite un grand nombre de tirages pour estimer au mieux les distributions des émissions. Le temps de calcul associé sans être rédhibitoire peut décourager certains praticiens.

D'autres méthodes ont été proposées, reposant sur des approximations. La formule de Gauss (de 1er ou de 2nd ordre) permet d'estimer la variance d'une variable issue de la combinaison de différentes variables aléatoires. Plus récemment, les développements par série de Taylor ont été utilisés pour prédire les paramètres d'une distribution log-normale résultant de la combinaison de plusieurs log-normales. Ces méthodes offrent l'avantage de calculer rapidement et de manière analytique les paramètres finaux ; en revanche elles nécessitent le traitement préliminaire des boucles qui apparaissent dans l'arbre de production lorsqu'un processus fait appel à un flux économique produit par un processus situé en aval. Plusieurs articles illustrent l'utilisation de nombres flous triangulaires à la place de distributions de probabilités soit pour la propagation d'incertitude soit pour l'optimisation de processus.

Les différentes méthodes utilisées en ACV pour décrire et propager l'incertitude n'ont pour le moment jamais cherché à différencier les différentes catégories d'incertitude mais au contraire à les agréger. Ceci a une conséquence directe sur la prise de décision puisqu'il n'est pas possible de différencier pour un impact une valeur vague mais certaine d'une valeur précise mais peu fiable. Il est à noter que l'incertitude est intrinsèque à la modélisation que représente une ACV. Chaque processus unitaire utilisé en ACV représente un archétype agrégeant plusieurs modalités individuelles. Plus le périmètre géographique ou technologique d'un processus unitaire est grand, plus sa variabilité interne sera grande, indépendamment de la qualité de l'estimation de ses productions, consommations et émissions. Ceci signifie donc qu'une bonne modélisation d'un processus unitaire utilisé en ACV se doit de décrire au mieux les différentes sources d'incertitude, et qu'un calcul d'ACV à même de propager proprement ces différentes sources d'incertitude saura différencier par le niveau des différents types d'incertitude un scénario basé sur des processus unitaires aux périmètres larges d'un scénario basé sur des processus au périmètre plus étroit.

En conclusion, la représentation des incertitudes en ACV relève de plusieurs problèmes :

- Un premier problème méthodologique, qui consiste à revisiter et développer les outils des sciences statistiques et du raisonnement approximatif afin de proposer des méthodes *ad hoc* de propagation d'incertitudes et de décision dans l'incertitude.
- Un problème d'ordre pédagogique de formation aux notions d'incertitudes et aux interprétations et hypothèses associées aux différents formalismes. La théorie des possibilités et des ensembles flous par exemple attire beaucoup d'attention mais est souvent mal appréhendée. A ce problème pédagogique, il convient de greffer celui de la difficulté de représenter des données incertaines. Une ACV est déjà une analyse pluridimensionnelle, l'ajout des incertitudes peut rendre le résultat final illisible sans le recours à un formalisme adapté.
- Un problème de disponibilité des données d'incertitude. S'il est d'usage en ACV de manquer de données brutes, la description fine de leur incertitude est encore plus rare et difficile à trouver (et souvent à calculer).

### 5.6.3. Amélioration des méthodes d'évaluation des impacts locaux en relation avec le milieu

Les évaluations environnementales disponibles sur les produits bio-sourcés se concentrent sur quelques impacts en priorité : il s'agit principalement d'impacts à l'échelle globale, tels que l'intensification de l'effet

de serre ou la déplétion des ressources énergétiques non renouvelables. Les impacts locaux sont beaucoup moins évalués aujourd'hui, du fait principalement de la difficulté de caractérisation associée à ce type d'impact :

- dépendance forte au contexte local, ce qui implique de disposer de données représentatives à une échelle très fine,
- mauvaise représentativité des relations linéaires utilisées dans les ACV pour traduire la relation entre une pression (prélèvement, émission) et l'impact réel sur le milieu naturel.

Le développement des méthodes de type ACV pour l'évaluation des impacts potentiels environnementaux des produits bio-sourcés nécessite donc des travaux complémentaires sur les impacts locaux, en particulier sur les ressources en eau (quantité, qualité), les sols et les ressources biologiques. Leur traduction nécessite de relier les pressions anthropiques avec la sensibilité des milieux naturels.

Intégrer la production et le prélèvement de la biomasse dans l'ACV des bioénergies nécessite pour tous les indicateurs liés à l'utilisation du sol de définir des référentiels, ce qui est vrai pour tout indicateur. En effet, dans la plupart des cas, l'utilisation entraîne une modification de l'environnement. Cette modification peut être temporaire (le temps de l'utilisation du territoire pour la production). Elle est parfois réversible (capacité de retourner à l'état initial lorsque le terrain est rétabli dans son usage précédent) ou irréversible. Suivant les cas, le référentiel peut être établi de deux façons<sup>704,705</sup> : (i) on estime que la référence est l'état de la parcelle avant production de bioénergie, ce qui est envisageable dans le cas d'espaces naturels, ou encore lorsque la bioénergie est un coproduit qui n'était pas exploité auparavant (exemple de l'utilisation des rémanents forestiers) ; (ii) on évalue l'état et les fonctions de la parcelle si elle n'avait pas été utilisée pour l'activité de production (exemple de l'utilisation de terres agricoles délaissées), en analysant le devenir de parcelles similaires.

Notons que pour certains indicateurs dont la valeur est stabilisée en raison d'une pratique régulière sur une période suffisamment longue pour parvenir à un état stationnaire, la prolongation de la pratique peut être comptabilisée comme le fait de différer le retour à la valeur de référence, ce qui atténue l'effet d'une pratique sur le long terme.

### 5.6.3.1. Biodiversité

Le terme de biodiversité est utilisé pour évoquer la multiplicité des formes de vie. Elle désigne la diversité des espèces et leur abondance ainsi que la diversité génétique des individus. Intégrer la notion de biodiversité dans les ACV nécessite de définir des façons de la caractériser et de la quantifier.

Par ailleurs, la biodiversité peut être observée à différentes échelles : de la parcelle au territoire et une grande diversité à une échelle donnée n'est pas nécessairement synonyme de diversité à une autre échelle. Par exemple, si chaque parcelle d'un territoire renferme une vingtaine d'espèces, mais que ces espèces sont les mêmes d'une parcelle à l'autre, le nombre total d'espèces sur ce territoire peut être inférieur à celui sur un territoire semblable au sein duquel les parcelles ne renferment qu'une dizaine d'espèces chacune, mais que ces espèces sont différentes d'une parcelle à l'autre.

Enfin, deux types de biodiversité sont généralement différenciés : la biodiversité ordinaire et la

<sup>704</sup> Koellner, T. and R. W. Scholz (2007). Assessment of land use impacts on the natural environment - Part 1: An analytical framework for pure land occupation and land use change. *International Journal of Life Cycle Assessment* 12(1): 16-23.

<sup>705</sup> Mila I Canals, L., C. Bauer, et al. (2007). Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment* 12(1): 5-15.

biodiversité exceptionnelle. La première vise à caractériser, généralement de façon statistique, la présence et l'abondance des espèces vivantes sur le territoire. La seconde a pour objectif de mettre en évidence des organismes ou des écosystèmes rares, à les dénombrer, à les délimiter et souvent à les protéger.

L'activité humaine sur la biodiversité peut avoir deux effets antagonistes : détruire la biodiversité existante par un bouleversement d'un écosystème sensible ; favoriser le développement de la biodiversité par la création d'espaces différents et de zones d'interface. Par conséquent, lors de l'analyse de l'impact du prélèvement de biomasse pour de l'énergie (qu'il s'agisse d'un prélèvement additionnel à partir d'une ressource en biomasse existante ou de récolte de cultures dédiées), il est nécessaire de tenir compte de l'état préalable de la parcelle et de sa fonction dans le maintien de la biodiversité au niveau du territoire. Ainsi, le défrichement d'une parcelle forestière pour la production de biomasse énergie peut suivant les cas entraîner une perte de biodiversité (par exemple si la forêt concernée refermais une espèce unique dans le massif) ou un accroissement de biodiversité (une forêt est coupée au sein d'un massif de forêt homogène, créant une lisière permettant le développement de nombreuses espèces). Les méthodes de production jouent également un rôle dans la variation de biodiversité. D'une exploitation intensive résulte généralement une perte de biodiversité.

L'intégration d'un indicateur de biodiversité dans les ACV des bioénergies est incontournable, mais il nécessite une définition de la biodiversité en des termes adaptés aux enjeux identifiés par la société, une adaptation au contexte écologique dépendant du lieu et des conditions de production de la biomasse. L'indicateur ainsi constitué devra être utilisé pour la comparaison de projets. Il n'aura en revanche que peu de signification dans l'absolu, étant dépendant de la capacité du site utilisé en terme de biodiversité, ce qui peut poser un problème vis à vis des attentes du consommateur, du citoyen ou des pouvoirs publics. Notons que la biodiversité évolue avec la croissance de la formation végétale, qui est différente d'une espèce à l'autre. Dans le cas de végétaux pluriannuels, l'indicateur doit refléter un niveau moyen de biodiversité sur un cycle complet (défini par exemple d'un prélèvement à l'autre, ou une révolution); toutefois, la recherche d'un indicateur utilisable dans une ACV risque de se transformer en « une quête du Graal »! Pour cet « impact », l'ACV doit être probablement relayée par une étude locale d'impacts ou se limiter à une évaluation du risque de « modification » de la biodiversité : fort, moyen, faible, inconnu..., décliné à différentes échelles territoriales.

L'impact sur la biodiversité n'est généralement pas lié à une seule activité humaine mais à plusieurs. La contribution de chaque système n'est pas scientifiquement établie. Tant que cette contribution ne sera pas évaluée, l'ACV ne pourra pas considérer la biodiversité.

### **5.6.3.2. Acidification**

L'acidification est souvent abordée sous l'angle des émissions d'acidifiants dans l'air puis de leur re-déposition. C'est une approche très « industrie ». L'acidification des sols agricole n'est pas abordée sous l'angle des bilans ioniques. La principale cause d'acidification sous nos latitudes est la perte d'anions et notamment la perte de nitrate par lessivage.

### **5.6.3.3. Toxicité humaine / Écotoxicité**

#### ***L'état actuel de la problématique***

Actuellement, les modèles multimilieux de devenir et d'exposition sont communément utilisés dans les ACV pour les estimations des facteurs de caractérisation toxicologiques. Leurs principes fondamentaux sont bien établis, bien que les modèles puissent différer par leur domaine d'application et leur

exhaustivité. Par ailleurs, certains praticiens préfèrent des modèles monomilieu (modèles qui ne prennent pas en compte les transferts intermilieux mais se concentrent sur le devenir d'une substance dans un seul milieu).

### Identification des vides de connaissances

Jusqu'à présent, l'adoption des modèles multimilieux a été freinée par le manque de données disponibles concernant le temps de séjour dans les différents milieux. Des recherches seront nécessaires pour déterminer la meilleure pratique disponible, et jusqu'à quel point la prochaine génération de modèles fournira une information supplémentaire, et donc une distinction entre les facteurs de caractérisation dans les LCIA.

### Questions de recherche, en lien avec les vides de connaissances identifiés

Les questions liées à l'évaluation des impacts sur la santé humaine et sur la santé des écosystèmes reposent sur les problèmes suivants :

- le besoin d'utiliser des modèles multimilieux avec une résolution spatiale ; en effet selon le système, les effets toxiques peuvent être très concentrés ou largement diffusés - cas d'une production d'un intrant à un endroit, transporté loin pour être mis en œuvre ailleurs, avec d'autres effets toxiques : tout cela est agrégé, mais globalement très dilué,
- le besoin de valider les estimations de facteurs de caractérisation avec les données terrains,
- les incertitudes des mesures toxicologiques disponibles, et la prise en compte des effets de synergie et/ou d'antagonisme,
- la difficulté de choisir un indicateur toxicologique final (*endpoint*) si toutefois une telle mesure est souhaitable.

Enfin ne sont souvent prises en compte que les toxicités « xénobiotiques ». De ce fait les toxicités d'origine biotique sont ignorées (ex : les mycotoxines, les proliférations bactériennes,...). Mais les risques sanitaires que présentent ces dernières sont avérés et souvent très supérieurs à bien des substances xénobiotiques identifiées dans les bases de données.

#### 5.6.3.4. Mobilisation et altération des ressources naturelles

Tout organisme vivant utilise pour sa croissance le milieu dans lequel il vit. Dans le cas de végétaux, il s'agit essentiellement d'eau, de CO<sub>2</sub>, d'éléments minéraux et d'énergie lumineuse. Si la disponibilité en CO<sub>2</sub> et en lumière dépendent essentiellement du lieu, la disponibilité en eau et en éléments minéraux varient en fonction des pratiques agricoles ou sylvicoles.

Les plantes à croissance rapide ont souvent de très grands besoins en eau. La culture intensive de tels végétaux peut conduire à une baisse de la quantité d'eau disponible des sols, à l'abaissement des débits d'étiage de cours d'eau,... Si l'eau vient à manquer, l'irrigation peut être envisagée, mais c'est au détriment des cultures vivrières ou de la faune et de la flore des cours d'eau ou des lacs. La quantification des besoins en eau pour produire de la biomasse permet d'analyser l'efficacité de chaque procédé de culture. Dans certaines zones, la plantation peut permettre de réguler les débits d'eau et de prévenir contre les inondations ou l'érosion. L'impact de la production de biomasse sur l'eau est variable en fonction de la situation. Il faut donc bien définir le référentiel d'analyse en fonction des risques à la fois au niveau de la parcelle (maque ou surplus d'eau), mais également à l'échelle du bassin versant.

Les enjeux autour de l'eau concernent non seulement la quantité, mais également la qualité. Ainsi, si pour une production de bioénergie il faut recourir à des fertilisants ou des engrais, ou si la culture doit



être traitée, la qualité de l'eau peut être dégradée. L'impact de différentes pratiques sur la qualité de l'eau doit être identifié.

De nombreuses propositions de systèmes de production de biomasse sont très intensives, nécessitant de nombreuses opérations mécaniques (labour, récolte à la machine) qui peuvent dégrader les sols. De plus, l'intensité et la régularité des prélèvements entraînent une diminution des apports en matière organique et peuvent conduire à une diminution de la qualité des sols (effets à long terme) et de leur fertilité. Pour tenir compte de ces impacts, Canals et al.<sup>706</sup> proposent de comptabiliser sur l'ensemble de la période d'impact (donc au-delà de la période d'usage) le différentiel de matière organique.

En conclusion, l'ACV doit être sensible tant au système de production qu'au milieu de production (parcelle, bassin versant, territoire). Par définition, l'ACV ne considère pas les contextes environnementaux réels pour les impacts locaux. Il doit tenir compte de l'impact immédiat et futur de la pratique par rapport à un état de référence. Par définition, l'ACV ne considère que les impacts potentiels. Il faut veiller à ne pas confondre étude d'impact et ACV.

#### 5.6.3.5. Usage des sols

Dans le cas des filières bio-sourcées, il y a lieu de prendre en compte explicitement dans les évaluations la problématique de changements d'usage des sols, dans la mesure où ceux-ci sont susceptibles d'être à l'origine d'impacts environnementaux importants (déstockage important de carbone, modification de la qualité du sol, etc.). Les changements directs d'usage des sols sont en général distingués des changements indirects :

- les premiers correspondent à une conversion directe d'une surface vers une culture destinée à la fabrication de produits bio-sourcés,
- dans le second cas, la surface utilisée pour la fabrication de produits bio-sourcés ne subit pas de changement, mais cette mobilisation pour un nouvel usage induit ailleurs d'autres changements d'usage (d'où le terme « indirect »).

Certaines ACV prennent en compte les changements directs d'usage des sols au travers de l'étude comparative de scénarii, incluant à la fois une filière de référence pour le produit final et un usage de référence pour le sol.

Toutefois, ces modalités de calculs ne reflètent pas d'éventuels changements successifs (rotations dans les cultures) et ne permettent pas non plus d'évaluer les changements indirects d'usages des sols. Cette question constitue donc en elle-même un champ d'investigation pour l'adaptation et l'amélioration des ACV appliquées aux produits bio-sourcés.

Les principaux changements dans l'affectation des sols (CAS) et de leurs méthodes de gestion, qui se traduisent par l'émission et la séquestration de CO<sub>2</sub> sont (source GIEC) :

- l'évolution du patrimoine forestier et des autres stocks de biomasse ligneuse ;
- la conversion des forêts et prairies ;
- la combustion sur site des forêts : émissions de gaz traces autres que le CO<sub>2</sub> ;
- l'abandon de terres exploitées ;

---

<sup>706</sup> Mila I Canals, L., J. Romanya, et al. (2007). Method for assessing impacts on life support functions (LSF) related to the use of 'fertile land' in Life Cycle Assessment (LCA). *Journal of Cleaner Production* 15(15): 1426-1440.

- les émissions ou séquestration de CO<sub>2</sub> par le sol, dues au changement d'affectation des terres et à leur gestion.

Il convient de partir de la méthode proposée par le GIEC (Lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre – Manuel simplifié) qui indique des valeurs guides encadrées, des teneurs approximatives en carbone et des procédures de calcul par défaut. Une série de feuilles de calcul existe (5-1 à 5-5), permettant de traiter de façon harmonisée le changement d'affectation des sols et de la foresterie (Module 5 du GIEC), et conduisant à chiffrer les pertes ou émissions (-) ou les absorptions (+) annuelles ou totales de carbone et de CO<sub>2</sub>.

Ceci revient à prendre en compte l'évolution positive ou négative des sols, avec ou sans réaccumulation de carbone, avec ou sans repousse de la végétation (cas des sols dégradés).

Avec la méthode actuelle du GIEC, on constate que :

- Il est fait mention de calculs présentant beaucoup d'incertitudes ou d'erreurs ;
- Les valeurs sont souvent très globales et sont des valeurs guides par défaut ;
- Les analyses doivent être plus fines et plus adaptées aux cas de figures concrets, les changements indirects des sols impliquent des modifications d'usage agronomique et la prise en compte d'une pluralité de cas de figures des espaces naturels modifiés ou supprimés ;
- D'autre part, la méthode du GIEC ne prend pas en compte les émissions de CH<sub>4</sub>, CO, N<sub>2</sub>O et NO<sub>x</sub> autres que celles provenant de la combustion de combustibles issus de la biomasse, comme par exemple celles de l'activité microbienne du sol.

Les études françaises récentes coordonnées par l'ADEME, sur la méthodologie des ACV (2008) et l'ACV des biocarburants de 1ère génération (2009) montrent par des tests de sensibilité que l'impact du CAS peut être très variable selon la quantité de carbone déplacée avec des scénarios envisagés qui peuvent être très différents. Elles concluent qu'un développement plus précis des mécanismes à analyser est nécessaire, à l'aide de modèles et de données économiques plus poussées, afin de comprendre les transmissions entre les marchés.

La première phase consisterait à décrire de véritables scénarios typiques des changements d'affectation des sols avec :

- des changements directs (à 2 niveaux : on remplace un usage du sol existant par un autre sur la même aire géographique, l'usage existant est alors supprimé),
- des changements indirects (à plusieurs niveaux successifs : identique au premier cas, mais l'usage du sol primaire remplacé est transféré ailleurs sur une autre aire géographique, remplaçant ainsi un autre usage du sol existant à ce deuxième endroit, lequel usage est purement supprimé ou à son tour transféré ailleurs).

Par exemple, si l'on prend le cas du soja, il conviendrait de considérer les cas brésilien, américain et argentin, avec pour chaque pays des cas de figures déclinés correspondant à des situations réelles, intégrant éventuellement d'autres cultures, mais aussi des milieux naturels différents qui seraient impliqués : savanes herbacées, arbustives, arborées, forêt dégradée, forêt non dégradée, forêt primaire, etc.

La rotation agronomique équilibrée incluant le soja, n'introduit pas par définition de changement d'affectation des sols, mais au contraire contribue à une succession optimisée des cultures et à une bonne gestion du carbone et de l'azote.

La deuxième phase est de quantifier la production et de l'affecter aux différents usages, par exemple

l'alimentation humaine et animale, l'énergie dont les biocarburants, la chaleur et l'électricité, la chimie, etc... On aboutit à la définition d'un facteur de conversion par zone géographique et par type d'usage, par exemple x ha de forêt tropicale/tonne d'huile de palme ou de soja en tenant compte des coproduits.

La prise en compte de l'état du sol est importante, avec leurs caractéristiques : matière organique, teneurs et natures du C et de N, émissions naturelles et celles liées à une fertilisation, acidité,... Ceci nécessite un inventaire de ces caractéristiques des sols pour chaque cas de figure étudié. Les risques physiques comme l'érosion sont également pris en compte ainsi que les changements de l'évapotranspiration de la biomasse et l'incidence sur le cycle de l'eau. La caractérisation des écosystèmes d'origine et celles des milieux modifiés est analysée et les écarts sont mis en évidence, la biodiversité est intégrée sous ce thème et est traitée par ailleurs au § 4.1 « Biodiversité ».

Cette recherche est basée sur l'existence et la collecte de données fiables, cet aspect étant souvent difficile à traiter, ce qui nécessite une collaboration étroite avec des organismes et des équipes de chercheurs des pays concernés.

Il est donc nécessaire d'approfondir le phénomène de déforestation ou de conversion de prairies, de clarifier le rôle de substitutions des coproduits obtenus pour l'alimentation animale dans ces impacts et d'allouer aux biocarburants consommés en France, - soit ceux qui sont produits à partir de matières premières produites ou importées en France et ceux qui sont directement importés, - leur part de responsabilité dans ces phénomènes mondiaux.

Cette part peut être nulle si l'on considère qu'un produit bio-sourcé (par exemple l'huile de palme transestérifiée) n'a pas les caractéristiques physico-chimiques adaptées suffisantes à notre climat pour son usage dans les moteurs, mais non nulle si l'on effectue une hydrogénation des acides gras aboutissant *in fine* à des hydrocarbures.

Les impacts sur les milieux sont à prendre en compte selon les méthodes reconnues au niveau mondial, de façon à rendre possible les comparaisons avec les résultats d'autres études existantes, notamment certaines études américaines ou allemandes. Si les méthodes sont imparfaites ou peu développées, il conviendrait de les étudier particulièrement et de faire des propositions au sein de commissions ou de groupes de réflexion européens ou internationaux existants.

Une méthode bien définie doit être proposée et mise au point, utilisant des scénarios réels et des données disponibles et précises afin de prendre en compte les changements d'usage des sols, aboutissant ainsi à une évaluation exhaustive des impacts de chaque usage, dont les usages énergétiques.

Certains impacts qui ne seraient plus exprimés sous forme de potentiel, pourront alors être pris en compte dans les ACV et serviront également à établir les certificats de durabilité et l'acquisition des labels. Sans la prise en compte de ces changements d'usage des sols, les systèmes de certification actuels ou futurs qui sont en réflexion, n'ont pas de pertinence.

La caractérisation des écosystèmes dont les sols, la biodiversité de la faune et de la flore sera traitée pour évaluer et quantifier les changements d'usage.

Les méthodes de caractérisation des impacts potentiels sur les milieux (sols, air, eau) seront appliquées et améliorées si nécessaire au sein de structures de réflexion européennes ou internationales.

#### 5.6.4. Amélioration de l'évaluation de l'impact des produits d'origine végétale sur le changement climatique

Le caractère photo-autotrophe des végétaux (capacité à synthétiser leur matière organique à partir de substances minérales qui puissent dans le sol et l'air, en particulier le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère) confère aux ressources végétales la possibilité d'être classées renouvelables lorsque leur stock peut être reconstitué sur une période courte à l'échelle humaine. C'est ainsi qu'également les végétaux jouent un rôle important dans le cycle du carbone, influencent le niveau de GES de l'atmosphère et peuvent contribuer à atténuer le changement climatique.

Cette propriété pose un problème spécifique aux produits d'origine végétale dans l'évaluation de leur impact sur le changement climatique :

- Comment doit se faire cette évaluation à l'échelle d'un produit ? Doit-elle s'établir à partir du bilan des flux de GES liés au carbone biomasse et/ou à partir des quantités de carbone stocké dans la biomasse en tenant compte des durées de stockage ?
- Comment calculer le prélèvement de CO<sub>2</sub> de la photosynthèse allouable à la bioressource ? Doit-on se limiter au carbone exporté par le produit ou peut-on allouer également une part du stock de carbone contenu dans les autres compartiments (plante et sol) ?
- Comment estimer le bénéfice du stockage temporaire du carbone biomasse et l'intégrer dans le calcul de l'indicateur effet de serre ?

L'ACV permet pour l'instant de n'avoir qu'une approche bilan des flux. Bien que l'hypothèse de la neutralité soit retenue régulièrement, dans certains cas ce bilan peut s'avérer non nul, en particulier pour les biomatériaux lorsqu'ils sont en fin de vie mis en décharge.

Par ailleurs les experts s'accordent à dire que le stockage bien que temporaire dans les produits d'origine végétale peut contribuer également à l'atténuation du changement climatique, si le carbone biomasse provient d'une ressource gérée durablement (prélèvement de carbone provenant d'un accroissement de stock au niveau de la ressource). Les lignes directrices actuelles du GIEC consacrées à la comptabilisation des émissions/captations du secteur AFOLU (agriculture, forêt et autres utilisations des terres) permet d'ailleurs d'intégrer de façon volontaire aux inventaires nationaux remis au secrétariat de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques les variations de stock de carbone dans les produits bois et en décharge. Des discussions sont en cours pour qu'il soit intégré dans le régime post 2012.

La méthodologie d'ACV n'intègre pas pour l'instant dans les inventaires la comptabilisation des quantités de carbone biomasse stocké aussi bien dans les végétaux que dans les produits bio-sourcés, leur variation dans le temps et ne permet pas dans l'évaluation de l'impact sur le changement climatique de prendre en compte ces stockages en fonction du temps. Ils existent quelques publications sur le lien entre un stockage temporaire et une réduction définitive<sup>707</sup> et certains référentiels relatifs à la réalisation d'empreinte carbone commencent à intégrer cette notion de bénéfice du stockage temporaire du carbone biomasse comme le PAS 2050 et la NF BPX 30-323.

En ce qui concerne l'intégration de l'étape agricole dans l'évaluation des produits d'origine végétale en terme de changement climatique, de nombreux travaux scientifiques sur le bilan carbone biomasse des

---

<sup>707</sup> Brandão, M. and Levasseur, A. 2011. Assessing temporary carbon storage in life cycle assessment and carbon footprinting – Outcomes of an expert workshop. EUR – Scientific and Technical Research series – ISSN 1831-9424

productions agricoles ou forestières existent, permettant de modéliser les relations entre les différents compartiments en fonction de paramètres milieu et culture. Des liens entre ceux-ci et l'évaluation ACV seraient à établir afin d'avoir la capacité d'allouer à l'utilisation d'une ressource d'origine végétale un prélèvement de CO<sub>2</sub> fonction de ces paramètres.

La question de l'allocation de ce prélèvement se pose également entre première et deuxième utilisation de la ressource végétale quelle soit énergétique ou matière.

Afin de mesurer dans les évaluations ACV des produits d'origine végétale le bénéfice de la photosynthèse par rapport au changement climatique, il serait intéressant de développer une méthodologie reconnue permettant d'intégrer cette spécificité suivant les différentes utilisations de la ressource (matière, énergie), prenant en compte l'étape amont de production de la ressource ainsi que le stockage temporaire de carbone, et proposant des règles d'allocation entre les différents systèmes.

### **5.6.5. Prise en compte des effets dynamiques**

Dans les approches ACV actuelles, le temps n'est pas toujours directement pris en compte, sauf dans certains cas, dans l'unité fonctionnelle. Pour chaque substance, l'ensemble des émissions (ou consommations) réalisées lors du cycle de vie est agrégé en une valeur unique. Ainsi les dates d'émissions ne sont pas prises en compte. Réalisée à partir de ces valeurs globales obtenues lors de l'inventaire, l'analyse d'impact ne peut donc elle non plus intégrer un facteur temporel. Cette lacune des approches ACV, soulignée par certains auteurs<sup>708, 709, 710</sup> peut s'avérer problématique dans plusieurs cas. Certains de ces cas concernent l'ensemble des ACV, d'autres sont liés plus spécifiquement aux produits bio-sourcés.

#### **5.6.5.1. Prise en compte du carbone contenu dans la biomasse / Stockage et déstockage du carbone (sols, peuplements, produits du bois et leur fin de vie, recyclages)**

Les ACV utilisent par construction une description statique des systèmes et ne prennent donc pas en compte leurs dynamiques. Ainsi, dans le cas particulier des cultures pluriannuelles ou de la biomasse forestière, les flux de l'inventaire sont ramenés à des flux annuels de manière linéaire.

Un développement potentiel intéressant des ACV consiste donc à inclure ces aspects dynamiques, notamment pour l'intensification de l'effet de serre. La description du stockage du carbone dans la biomasse pourrait notamment permettre de détailler les flux de carbone dans la biomasse sur tout le cycle de vie, de manière plus précise que ne le permet l'hypothèse de neutralité carbone.

#### **5.6.5.2 Effets dynamiques dans les inventaires**

##### **Les infrastructures**

Une part plus ou moins significative d'un cycle de vie est composée de la réalisation et du

<sup>708</sup> Björklund, A. (2002) Survey of Approaches to Improve Reliability in LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 7 (2) p. 64-72

<sup>709</sup> Field, F., Kirchain, R. et Clark, J. (2000) Life-Cycle Assessment and Temporal Distributions of Emissions: Developing a Fleet-Based Analysis. *Journal of Industrial Ecology*. 4(2): p. 71-91

<sup>710</sup> Levasseur, A., Bage, G., Deschênes, L. et Samson, R. (2008) The basics of dynamic LCA development. The 8th International Conference on Ecobalance, Tokyo, Japon, 10-12 décembre 2008, 4 p.

démantèlement des infrastructures utilisées. Ces étapes peuvent induire de fortes émissions en amont et en aval de la phase de production. Se pose alors le problème de la relation entre des émissions importantes localisées sur une brève période (construction et/ou démantèlement) et des émissions en moindre quantités, réparties sur la période d'utilisation. La dimension temporelle devient prépondérante et permet par exemple de calculer des durées d'amortissement environnementales au même titre que les amortissements économiques.

Règles simplificatrices (source : Rousseaux et Apostol, T. Valeur environnementale de l'énergie. *Presses polytechniques et universitaires romandes* (Suisse), Collection des sciences appliquées de l'INSA de Lyon, ISBN 2-88074-437-7, 2000, 186 p.) :

Soit un système énergétique pour le quel on a investit une énergie  $le$  pour le construire  $er$  qui a une durée de vie  $N$ . Ce système consomme annuellement une énergie  $Ea$  (énergie apportée), produit une énergie  $Eu$  (énergie utile) et rejette dans l'environnement une énergie  $Er$ .

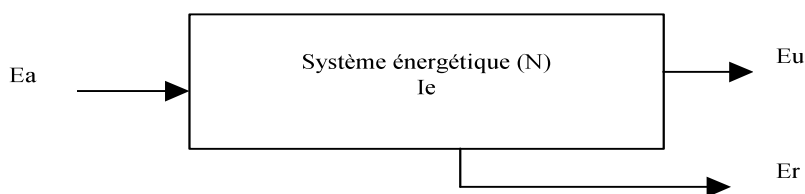


Figure 34 : Schématisation du système énergétique

Posons :

- la consommation spécifique d'énergie ( $r$ ) :  $r = Er / Eu$  ;  $r$  représente le nombre de joules qu'il faut accepter de perdre, par joule utile ;
- le taux d'énergie dans l'investissement ( $i$ ) :  $i = le / N Eu$  ;  $i$  représente la part d'énergie investie par rapport à l'énergie produite pendant la durée de vie du système.

A partir de ces 2 paramètres, on propose les 3 types de systèmes énergétiques suivants :

- pour les « systèmes thermiques classiques » (incinérateurs, moteurs, ...) :  $r \gg i$  ; Par exemple pour une centrale thermique classique qui convertit de l'énergie chimique en énergie électrique,  $r$  est égal à 2 : autrement dit l'opération « coûte » 2 joules de chaleur (rejetée dans l'environnement) pour chaque joule d'électricité produit, et le terme d'investissement  $i$  est nettement inférieur à 0,1. Dans le cas d'une centrale nucléaire  $i$  atteint environ 0,1 à 0,15 et il est encore négligeable par rapport à  $r$ .
- pour les « systèmes électroniques complexes » (un récepteur de télévision, une calculette de poche...) :  $r \ll i$  ;
- pour les « systèmes particuliers » comme l'automobile :  $r \approx i$ .

On a démontré qu'on pouvait négliger, pour les « systèmes thermiques classiques » fonctionnant aux énergies fossiles, les rejets atmosphériques relatifs à la construction des équipements et ceux du démantèlement par rapport à ceux du fonctionnement.

En revanche, pour les « systèmes électroniques complexes », en supposant que l'impact environnemental est proportionnel à l'énergie investie ou produite, on pourrait dans certains cas qui restent à définir, négliger les impacts relatifs à leur fonctionnement.

Par contre, pour les « systèmes particuliers », aucune simplification ne sera possible et l'ensemble du cycle de vie devra alors être étudié.

### **Technologies émergentes**

Pour tout secteur d'innovation, et donc pour la chimie verte, la maturité des technologies conditionne les performances des procédés et donc leurs impacts sur l'environnement. Les ACV comparatives entre technologies émergentes et pratiques actuelles ne peuvent donc pas s'effectuer sans prendre en compte les évolutions attendues<sup>711,712,713</sup>. Les améliorations d'efficacité énergétique, environnementale et économique d'un procédé correspondent à deux grands types de gains : (1) les gains théoriques liés aux principes physico-chimiques mis en œuvre dans la technologie en question et (2) les gains obtenus par l'optimisation de la dite technologie et la massification de sa mise en œuvre. Or, l'histoire des technologies a souvent mis en évidence que les gains de type (2) pouvaient en pratique être largement supérieurs à ceux de type (1). Ainsi, par exemple le rendement d'un moteur à pistons rotatifs est sur le plan théorique supérieur au rendement d'un moteur à pistons alternatifs..., mais ces derniers ont une telle longueur d'avance en terme de mise au point technologique que les premiers n'ont jamais réussi à les supplanter.

Ceci est encore accentué dans le cadre d'une approche ACV puisque dans le cas d'une technologie émergente, c'est souvent plusieurs phases du cycle de vie qui sont immatures. Ces questions d'évaluation de technologies émergentes posent des questions de recherche méthodologiques particulièrement intéressantes pour les questions de bioénergies.

### **Cinétique des émissions**

Dans de nombreux cas (et plus particulièrement lorsqu'une étape agricole est prise en compte), les émissions de substances évoluent dans le temps, d'un point de vue quantitatif et qualitatif. Ceci peut par exemple s'illustrer par les conséquences d'un épandage d'engrais dont les pollutions induites dépendent du climat et du stade de développement des cultures. Ces différents points soulignent l'importance d'une prise en compte explicite du temps afin de considérer l'ensemble de la filière d'un produit comme un système dynamique.

Des modèles dynamiques peuvent être utilisés pour produire les données nécessaires à l'inventaire. A titre d'exemple, dans un contexte de production agricole, nous pouvons citer SALSA (Systems Analysis for Sustainable Agriculture<sup>714,715</sup>). Cependant, dans ces approches, si la prise en compte des aspects dynamiques permet de mieux déterminer les émissions, les quantités émises sont ensuite agrégées afin de permettre la réalisation de l'inventaire. La représentation mathématique de l'inventaire est en effet un modèle linéaire, statique. Afin d'aller plus loin il est donc nécessaire d'étendre le formalisme de l'ACV en

---

<sup>711</sup> Caduff-Kinkel, M., Althaus, H.-J., Hellweg, S. et Koehler, A. (2007) Scale Up Effects within Prospective Life Cycle Assessment. LCM2007, 3rd International Conference on Life Cycle Management, Zurich, 27-29 Aout.

<sup>712</sup> Allenby, B. et Rejeski, D. (2008) The Industrial Ecology of Emerging Technologies. *Journal of Industrial Ecology*, 12(3) :267-269.

<sup>713</sup> Frankl, P. (2006) The role of Life Cycle approaches for long-term technology Assessment. PEER Environmental Technology Seminar, Montpellier, 10-11 Octobre, <http://peer2006.teledetection.fr/>.

<sup>714</sup> Eriksson, I.-S., Elmquist, H., et Nybrant, T. (2005) SALSA: a simulation tool to assess ecological sustainability of agricultural production. *Ambio* 34(4-5) :388-392.

<sup>715</sup> Lopez-Ridaura S., Van Der Werf H.M.G., Paillat J.M. Et Guerrin F. (2008) Environmental systems analysis of agricultural systems: Coupling dynamic simulation models with life cycle assessment. In Eight International Conference on EcoBalance, 10 – 12 décembre, Tokyo, 4 p.

faisant évoluer ce modèle statique vers un modèle dynamique. Cette approche, à l'exception de quelques travaux<sup>716</sup> n'est à l'heure actuelle pas abordée. Il serait pertinent d'utiliser les approches de modélisation des systèmes dynamiques développées en automatique depuis plusieurs décennies. Ceci permettrait d'obtenir un inventaire dynamique qui pourrait donc être utilisé pour réaliser une analyse d'impact, elle aussi dynamique.

### **Stockage temporaire du carbone biomasse des produits bio-sourcés**

La méthodologie ACV n'intègre pas jusqu'à présent dans les inventaires la comptabilisation des quantités de carbone biomasse stocké dans les produits bio-sourcés, la durée de ces stocks et leur évolution au cours du cycle de vie des produits bio-sourcés. Elle autorise seulement de faire un bilan des flux liés au carbone biomasse : prélèvements de CO<sub>2</sub> lors de la photosynthèse, émissions sous forme de CO<sub>2</sub>, de CH<sub>4</sub>, de CO lors de la destruction de la biomasse (combustion, décomposition aérobie ou anaérobie, ...). Ce bilan n'est d'ailleurs pas systématiquement fait (hypothèse de neutralité carbone). Il permet néanmoins de prendre en compte le stockage considéré comme définitif dans le cadre de la mise en décharge peut être.

Les experts s'accordent cependant à dire que ce stockage bien que temporaire contribue à l'atténuation du changement climatique et qu'il représente un potentiel important. Il serait donc intéressant que la méthodologie ACV puissent intégrer cette notion dans les évaluations d'impact et donc qu'elle intègre un système de suivi temporel au niveau des inventaires.

#### **5.6.5.3. Effets dynamiques dans les impacts**

Lors de la réalisation d'une ACV, l'objectif de l'analyse d'impact est de représenter les relations de causes – conséquences entre les émissions (ou consommations) de substances vers l'environnement et les effets induits. Si la réalisation de l'inventaire revient à modéliser les systèmes techniques, l'analyse d'impact nécessite une modélisation des phénomènes environnementaux. Ces phénomènes sont forcément complexes, non linéaires (oui pour les impacts locaux, non pour les impacts globaux) et partiellement décrits. Afin de rendre cette tâche réalisable, les différentes méthodes ACV utilisent des facteurs de caractérisation. Ceux-ci permettent de décrire l'importance d'une substance pour un impact donné. Cette approche linéaire et statique présente plusieurs limites.

L'agrégation des émissions implique qu'une pollution diffuse, répartie sur une plage de temps a les mêmes effets qu'une pollution ponctuelle tant que les quantités sont identiques. Dans de nombreuses circonstances, ceci ne correspond pas à la réalité. Par exemple, les problèmes de toxicité dépendent des concentrations en contaminants et des durées d'exposition. L'introduction des aspects temporels dans l'analyse des impacts permettrait de mieux prendre en compte les phénomènes non linéaires comme les effets de seuil, la résilience des milieux récepteurs à des impacts combinés où encore le devenir des substances dans la chaîne de causalité entre les émissions et les pollutions.

Comme toute molécule a une durée de vie, les conséquences d'un polluant décroissent donc au cours du temps ; pas toujours, une molécule peut être transformée dans l'environnement en un dérivé plus toxique que la molécule d'origine. Par exemple pour le réchauffement climatique, les facteurs de

---

<sup>719</sup> Levasseur, A., Bage, G., Deschênes, L. et Samson, R. (2008) The basics of dynamic LCA development. The 8th International Conference on Ecobalance, Tokyo, Japon, 10-12 décembre 2008, 4 p.



caractérisation sont généralement exprimés pour trois périodes, 20, 100 et 500 ans, afin de tenir compte de l'efficacité radiative des molécules et de leur durée de vie dans l'atmosphère. Si les facteurs de caractérisation sont déterminés sur un horizon temporel, celui-ci est découplé de l'horizon temporel de l'inventaire. Par exemple, lorsqu'une ACV met en jeu des procédés sur une longue période (comme la construction et le démantèlement d'une usine qui se déroulent à plusieurs décennies d'intervalle) un indicateur comme le réchauffement climatique à 20 ans ne représente pas l'effet sur le climat sur les deux décennies à venir mais les conséquences des émissions 20 ans après leurs réalisations. A partir d'émissions datées, il serait intéressant de calculer un impact sur le même horizon temporel que celui du système étudié. Comme l'ACV évalue les impacts environnementaux d'une fonction donnée et pas forcément d'un système donné, l'horizon temporel à considérer est celui de la fonction (ou la durée du service rendu). Les facteurs de caractérisation seraient donc déterminés en fonction des dates d'émissions (comme utiliser un facteur de caractérisation sur une période de 2 ans pour une émissions survenant lors du démantèlement dans 18 ans,...)

D'une manière générale, la prise en compte des aspects temporels permettrait une plus grande justesse des impacts calculés en tenant compte de l'état des milieux récepteurs

#### *Stockage temporaire du carbone biomasse des produits bio-sourcés*

Comme elle n'intègre pas dans les inventaires la comptabilisation des quantités de carbone biomasse stocké dans les produits bio-sourcés, la méthodologie ACV ne permet pas jusqu'à présent de prendre en compte le bénéfice du stockage temporaire dans l'évaluation de la contribution au changement climatique des produits bio-sourcés.

Or les experts s'accordent cependant à dire que ce stockage bien que temporaire contribue à l'atténuation du changement climatique, si le carbone biomasse provient d'une ressource gérée durablement, et que ce stockage temporaire représente un potentiel important d'atténuation. Cela dépend de l'échelle de temps considérée. Les lignes directrices actuelles du GIEC consacrées à la comptabilisation des émissions/captations du secteur AFOLU (agriculture, forêt et autres utilisations des terres) permet d'intégrer aux inventaires nationaux remis au secrétariat de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques les variations de stock de carbone dans les produits bois et en décharge. Ce rapportage est pour le moment volontaire mais des discussions sont en cours pour qu'il soit intégré dans le régime post 2012.

Quelques publications existent sur le lien entre un stockage temporaire et une réduction définitive<sup>717</sup>. Certains référentiels relatifs à la réalisation d'empreinte carbone commencent à intégrer cette notion de bénéfice du stockage temporaire du carbone biomasse comme le PAS 2050. Il serait donc intéressant que la méthodologie ACV puisse intégrer cette notion dans les évaluations d'impact sur le changement climatique.

### **5.6.6. Aspects méthodologiques transverses**

#### **5.6.6.1. Allocation des impacts entre coproduits**

La problématique de l'allocation des impacts en cas de coproduction est clairement identifiée en général dans les ACV et en particulier dans le cas des filières biocarburants. Deux grands types d'allocation

---

<sup>717</sup> Brandão, M. and Levasseur, A. 2011. Assessing temporary carbon storage in life cycle assessment and carbon footprinting – Outcomes of an expert workshop. EUR – Scientific and Technical Research series – ISSN 1831-9424

existent :

- l'allocation sur la base d'un prorata (massique, énergétique, économique, exergétique, etc.)
- l'évaluation des impacts évités par les coproduits, qui se substituent à d'autres filières de production.

Le choix d'un mode d'allocation dépend fortement du type d'étude et de son contexte. Il n'est pas pertinent de recommander un choix d'affectation applicable quels que soient les objectifs d'une ACV : ce choix doit être adapté à l'étude et surtout permettre une description des impacts qui soit la plus proche possible de la réalité physique du système. Théoriquement, les 2 modes doivent être appliqués pour vérifier si on obtient des différences sur le résultat final.

Dans le cas des biocarburants, des solutions différentes ont par exemple été proposées selon que l'étude a un objectif de certification (prorata énergétique proposé par la Commission Européenne) ou un objectif d'aide à la décision publique (impacts évités).

Tableau 58 : Caractéristiques comparées des différents modes d'allocation des impacts environnementaux en cas de coproduction

Critères	Allocation par prorata	Impacts évités
Applicabilité	Mise en œuvre simple (sous réserve de disposer des données pour calculs des prorata) Quasiment toujours applicable directement (sauf cas particuliers : e.g. coproduction d'électricité et prorata massique)	Mise en œuvre plus compliquée (identification nécessaire de la / des filières de substitution) Non applicabilité si : Pas ou trop de filières de substitution possibles et pas de critère permettant d'opérer un choix
Données nécessaires	Caractéristiques des produits et coproduits pour le calcul des prorata Données très différentes en fonction du prorata choisi : bilans massiques, PCI, prix etc.	Connaissance détaillée du système (identification des filières de substitution) Données supplémentaires : Bilan environnemental de la filière de substitution
Interprétation et limites de la méthode	Méthode arbitraire <i>a priori</i> Pertinence pas systématique : pas toujours de lien entre l'affectation et les impacts respectifs réels des produits et coproduits sur les émissions Certains prorata sont variables dans le temps (e.g. prorata économique)	Extension des frontières de l'analyse intégrant la valorisation du coproduit Meilleure description, notamment aux échelles locales, plus proche de la réalité des systèmes Interprétation difficile si plusieurs filières de substitution identifiées et variation importante du bilan final... Difficulté d'interprétation et de calcul s'il existe des boucles*

C'est le cas par exemple dans les filières EMHV : la trituration des graines oléagineuses (colza ou tournesol par exemple) produit de l'huile et un tourteau ; ce dernier peut se substituer à un tourteau de soja, qui a été produit en même temps que de l'huile, elle-même pouvant aussi être un substitut de l'huile de colza. Cette boucle peut être résolue par le calcul, soit par convergence, soit via des coefficients d'équivalence basés sur les contenus en protéines. Toutefois, cette dernière solution n'est pas forcément entièrement satisfaisante, puisque le contenu en protéines n'est pas la seule caractéristique intervenant dans la formulation de l'alimentation du bétail.

Plusieurs solutions ont donc déjà été proposées pour le cas particulier des biocarburants en fonction du contexte des études, mais la question de l'allocation n'est pas complètement traitée pour les produits bio-

sourcés en général : dans le cas précis des bioraffineries, ou encore dans le cas des filières forestières, puisqu'il n'existe à ce jour pas de consensus sur l'allocation des impacts aux différents produits et coproduits du bois, tant à l'étape de récolte qu'aux étapes de transformations successives. Le consensus (cf. norme) est d'appliquer les différents modes d'allocation.

### **5.6.6.2. Impacts positifs**

#### ***L'état actuel de la problématique***

Au niveau de l'ACV au champ, la méthode utilisée pour évaluer l'apport d'un amendement organique au sol est la méthode des « impacts évités »: on retranche du bilan de la gestion biologique avec épandage les impacts d'une fertilisation minérale équivalente. Or, le fait de prendre pour référence une fertilisation minérale pose une question méthodologique. Les nutriments contenus dans les déchets ont, en effet, une durée de vie bien supérieure à ceux épandus sous forme minérale.

#### **Identification des vides de connaissances**

Les bénéfices environnementaux constitués par l'apport de matière organique au sol sont rarement pris en compte, même d'une manière approchée, que ce soit dans les phases d'inventaire ou d'évaluation d'impact (RDC Environment, 2004). Ainsi, ce manque d'indicateurs et de moyen de quantification approprié empêche une comparaison équitable entre des filières biologiques de traitement des déchets et des filières telles que la valorisation énergétique ou le stockage.

#### **Questions de recherche, en lien avec les vides de connaissances identifiés**

Une réflexion méthodologique est donc à mener pour prendre en compte les impacts positifs dans l'ACV. Le développement d'un modèle permettrait de prendre en compte toutes les interactions entre apports de matières organiques, fonctions du sol, et impacts environnementaux, et pourrait donc fournir des données directement utilisables en ACV.

### **5.6.6.3. Frontières des systèmes**

La définition des frontières d'un système ou d'une filière consiste principalement à préciser quelles étapes du cycle de vie du produit final (dans le cas présent une énergie issue de la biomasse) seront incluses dans l'inventaire et à déterminer le caractère négligeable ou non des impacts liés à ces différentes étapes. Dans la mesure où, pour tout bilan, une grande part de l'étude consiste à collecter les données nécessaires, il est important de trouver un compromis entre la précision apportée au résultat du bilan et la quantité de données considérées, liée aux frontières retenues pour la collecte d'informations.

Le cycle de vie du produit final d'une filière de valorisation de la biomasse peut être schématisé de manière simplifiée, comme le représente la figure ci-dessous. Il est composé de plusieurs étapes, depuis la production de la biomasse jusqu'à l'utilisation finale du produit énergétique de la filière étudiée.

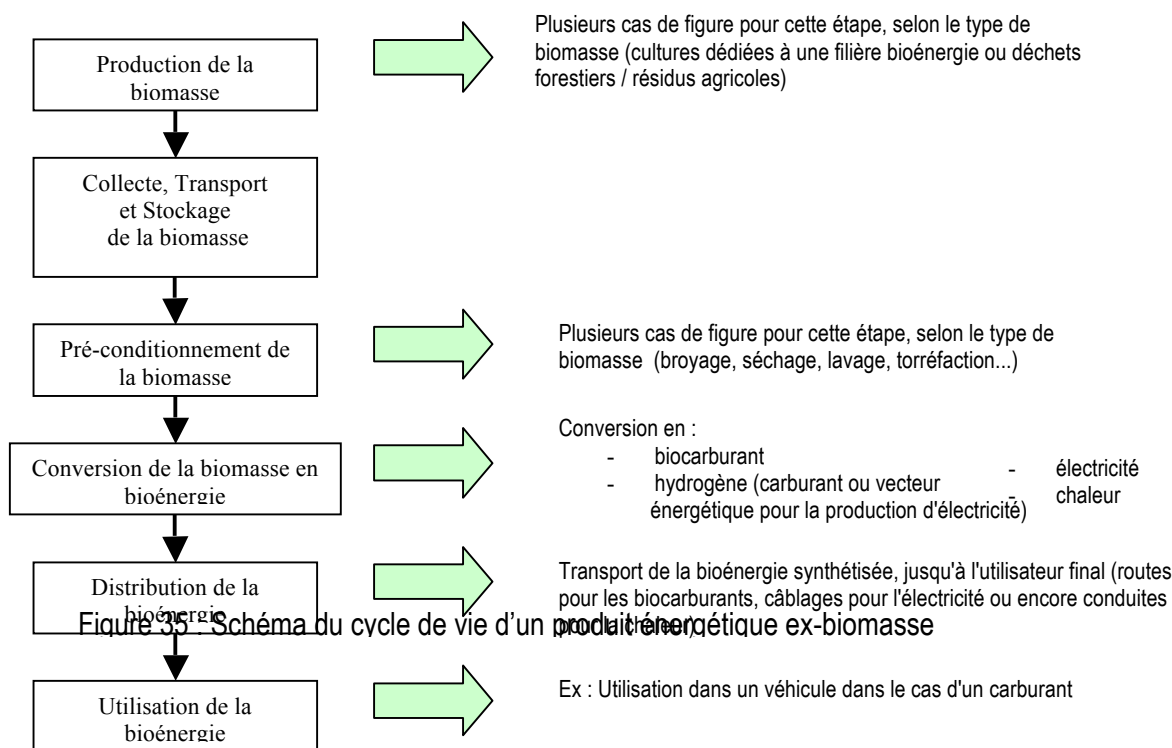


Figure 35 - Schéma du cycle de vie d'un produit énergétique ex-biomasse

Les flux et étapes pouvant être pris en compte dans le cadre de l'analyse d'une telle filière sont les suivants :

- flux de matière et d'énergie dans les principales étapes de la filière
- transport (de matières premières et produits) et distribution
- production et utilisation de carburants, d'électricité ou de chaleur
- filières d'approvisionnement des utilities
- fabrication des matériaux utilisés
- utilisation sur site des différents produits
- récupération de produits utilisés
- mise en décharge des déchets ou produits
- fabrication et maintenance des équipements et infrastructures
- opérations de maintenance tels que chauffage et éclairage
- autres services (banques et assurances par exemple)
- transports du personnel affecté aux installations étudiées (domicile-travail et missions/déplacements)

Les impacts associés aux activités listées ci-dessus peuvent être classés en deux catégories :

- les impacts directs qui ont lieu sur le site considéré (entre autres exemples : champ pour l'étape de production de la biomasse ou site industriel pour la production d'énergie),
- les impacts indirects qui ont lieu physiquement en dehors de ce site mais qui sont directement liés à des activités nécessaires à cette production. Ces impacts indirects correspondent aux impacts générés par les étapes d'approvisionnement (production et transport) en matières, énergie, produits chimiques etc ou par les étapes de traitement et fin de vie des déchets. Pour ce qui est de l'étape de culture de la biomasse, les impacts indirects sont, entre autres exemples, les impacts associés à la production et au transport des engrais ou encore au raffinage du gazole moteur consommé par les tracteurs et autres équipements utilisés.

Dans le cadre de l'étude d'une filière de production d'énergie, sont à la fois prises en compte les activités ayant un impact direct et celles ayant un impact indirect. En effet, dans cette approche « analyse de cycle de vie », il convient de ne pas considérer seulement les impacts liés aux flux émis ou consommés sur le lieu de conversion de la biomasse et de production de l'énergie mais bien au niveau de toutes les étapes listées dans la figure 33 ainsi qu'au niveau des étapes amont d'approvisionnement en énergie, matières et autres intrants de chacune de ces étapes (flux émis et consommés chez les producteurs/fournisseurs et pour le transport).

La plupart des méthodologies existantes excluent de l'étude une partie plus ou moins importante des activités listées ci-dessus et, par conséquent, des impacts associés. On ne comptabilise donc généralement pas ces activités de façon exhaustive et l'on définit un périmètre permettant de limiter la quantité de données à considérer.

D'une manière générale, il convient d'inclure l'ensemble des impacts directs et indirects associés aux étapes du cycle de vie de la filière énergétique considérée soit :

- production de la ressource (biomasse ou ressource fossile telle que pétrole brut si l'on étudie par exemple les filières carburants conventionnelles),
- transport de la ressource (biomasse ou ressource fossile) depuis le site de production jusqu'au site de conversion en énergie,
- conversion de la ressource en énergie,
- transport / distribution de l'énergie produite, jusqu'à l'utilisateur final,
- utilisation de l'énergie.

Au-delà la prise en compte des impacts liés à l'approvisionnement en énergie et matière des étapes listées ci-dessus ; la question de la prise en compte ou non des impacts liés à la construction des bâtiments, infrastructures, machines et équipements a été soulevée (impacts amortis sur leur durée de vie respective). Une réflexion a été menée sur ce point dans ce chapitre, basée tout d'abord sur une analyse restreinte au seul bilan des gaz à effet de serre (GES), ensuite élargie aux bilans environnementaux plus globaux puis aux autres critères d'ordre économiques et sociaux.

Pour ce qui est de l'évaluation des impacts environnementaux, il est généralement considéré que, sur le cycle de vie complet du flux ou produit étudié, la précision amenée par la prise en compte des impacts liés à ces étapes de construction des infrastructures et équipements (dites étapes du périmètre étendu) est faible, négligeable et peut être inférieure à l'incertitude sur le résultat final, liée aux incertitudes sur les données collectées. En première approche, il paraît clair que l'on peut s'affranchir de ce problème et négliger ces impacts dans le cadre d'une étude comparative de deux systèmes équivalents, à la condition d'adopter la même hypothèse dans les deux cas. Cependant, si le but est d'effectuer l'évaluation approfondie d'une filière, la réponse n'est plus si évidente.

Il est important de préciser que lorsqu'un doute subsiste sur le caractère négligeable ou non d'une étape ou source d'impacts environnementaux, il est impératif de la comptabiliser. En effet, conformément à la série de normes ISO 14040, il est impossible d'exclure arbitrairement de l'ACV une partie des impacts, sans qu'il n'existe une quantification préalable pour le type d'installation étudié, un ordre de grandeur étant suffisant. Si de telles données sont disponibles, la règle de coupure doit être appliquée i.e. la somme des éléments écartés de l'analyse ne doit pas représenter plus de 5 % de chacun des impacts environnementaux du cycle de vie.

Pour ce qui est des filières biocarburants, une étude récente conduite à l'échelle française et visant à élaborer un référentiel méthodologique pour l'établissement de bilans environnementaux de ces filières conclut :

- que la contribution des amortissements des installations industrielles de production de biocarburant se situe en deçà de la règle de coupure (contribution de l'ordre de 1% au bilan des impacts des seules étapes industrielles),
- que la contribution de l'amortissement des matériels et infrastructures mobilisés pour les étapes agricoles pourrait parfois dépasser le seuil de coupure des ACV (selon les sources de données utilisées, cette contribution est de l'ordre de 9 % au bilan des impacts de la seule étape agricole),
- que la contribution globale des amortissements (étapes agricole et industrielle) dans le bilan environnemental de la filière complète est bien inférieure à 5 % pour les filières éthanol (de blé et maïs) et EMHV (de colza, tournesol et soja). En revanche, cette contribution est supérieure à 5 % dans le cas de la filière courte Huile Végétale Brute de colza.
- qu'aucune donnée n'est disponible pour estimer la contribution des infrastructures au bilan des filières pétrolières de référence (essence et gazole).

La méthode suivante est proposée pour la définition des frontières dans le cas des impacts environnementaux (processus itératif).

- Prise en compte en fonction des données disponibles,
- Définition de seuils d'inclusion des flux,
- Critère de masse : inclusion de tous les intrants dont le cumul contribue à un pourcentage fixé du total des intrants (e.g. 95 %),
- Critère d'énergie : inclusion de toutes les consommations d'énergie dont le cumul contribue à un pourcentage fixé du total (e.g. 95 %),
- Critère d'impact environnemental (règle de coupure ACV) : inclusion des flux dont la contribution additionnelle à chaque impact est supérieure à un pourcentage fixé (seuil  $\leq 5$  %, des éléments chiffrés doivent justifier que la contribution cumulée des éléments négligés est bien inférieure à ce seuil, un ordre de grandeur étant suffisant),
- Réalisation d'études de sensibilité,
- Collecte de données additionnelles le cas échéant.

Le raisonnement proposé pour l'inclusion ou l'exclusion de certaines étapes dans l'évaluation environnementale des différentes filières bioénergies n'est bien sûr pas directement applicable aux critères économiques. Le calcul des critères économiques devra donc prendre en compte, pour les différentes étapes des filières étudiées :

- les investissements,
- les charges fixes (maintenance, taxes...),
- les charges variables (produits utilisés, consommations d'énergie, consommations d'eau...),
- la main d'œuvre, parfois intégrée aux charges variables, bien qu'il soit préférable de les en dissocier, dans la mesure où les dépenses de main d'œuvre ne sont pas proportionnelles à la production des installations.

De la même façon que pour les critères économiques, l'évaluation des critères sociétaux doit prendre en compte *a priori* les infrastructures (création d'emploi(s) pour leur construction et leur maintenance, acceptabilité sociale).

Enfin, l'évaluation des critères de risque doit se faire sur la phase utilisation des installations, mais également sur les étapes de transport. Les risques liés à la construction des infrastructures peuvent être négligeables dans certains cas, mais il conviendra de vérifier ce caractère négligeable au cas par cas.

Pour les études réalisées à l'échelle d'un territoire donné (commune, département, région, pays etc.), il est nécessaire de définir clairement les impacts exclus du fait de ce cadre géographique. En effet, l'ensemble des activités des filières énergétiques considérées ne prennent pas toujours place sur le

territoire considéré (exemple des carburants conventionnels consommés et importés dans une région où il n'y a pas de raffinerie). Il y a donc lieu de préciser dans la définition détaillée des scénarios (étape 2) les modes de prise en compte des impacts liés aux imports et exports hors du territoire étudié (ce qui justifie la boucle entre cette étape et l'étape 2 du logigramme).

Cette question s'est posée dans le cadre des 2 études de cas réalisées dans le cadre du projet ANABIO, respectivement à l'échelle de la France et de la région Champagne Ardenne. Il ressort que, tout comme d'autres aspects méthodologiques, le choix du mode de prise en compte des imports/exports est fortement lié aux objectifs de l'étude et notamment aux critères évalués (quelle est la question et qui la pose ?).

Il est notamment indispensable de faire apparaître et de justifier la prise en compte ou non des effets directs et indirects liés au changement d'usage des sols, que ce soit en termes d'impacts environnementaux (intensification de l'effet de serre notamment) qu'en termes d'impacts sociaux (dans le cas de cultures énergétiques se substituant à des cultures alimentaires).

#### 5.6.6.4. Unité fonctionnelle

Il convient de définir les unités fonctionnelles de référence auxquelles les évaluations se rapportent, en sorte de s'assurer que la comparaison des filières étudiées se fait sur la base d'un même service rendu en tenant compte de la durée du service rendu. L'ensemble des flux à prendre en compte doivent être clairement identifiés.

L'unité fonctionnelle (UF), au sens défini par la norme ISO 14040, est l'expression quantifiée d'un service (« obligatory properties » concept). Dans le cas des bioénergies (et de l'énergie en général), elle se rapporte donc à une unité d'énergie thermique, électrique ou mécanique (dans le cas des carburants). Dans le cas des usages non-énergétiques, les options sont plus variées (isolation, emballage, peinture, structure...), mais très importantes à définir précisément, en particulier une comparaison en masse pour des matériaux n'est en général pas satisfaisante.

Une UF quantitative doit également se référer autant que possible à des normes techniques (référence ISO ou équivalent CEN/NF) bien identifiées (conductivité thermique, pouvoir couvrant ou d'opacité...). Mais la définition de l'unité fonctionnelle doit aussi prendre en compte les aspects qualitatifs, qui peuvent être multiples spécialement pour les « produits complexes » (« *positioning properties* » concept). En outre dans le cas particulier des produits qui ont des impacts directs sur la santé humaine par exemple, ces derniers doivent être identifiés et documentés, non pas pour être directement incorporés dans l'inventaire du cycle de vie mais pour être disponibles pour l'interprétation des résultats de l'ACV.

Les unités fonctionnelles « idéales » suivantes sont souvent proposées pour les usages bioénergies :

- Carburants : distance unitaire (kilomètre) parcourue sur un cycle normalisé, à performances véhicules équivalentes;
- Électricité : kWhélec produit et distribué à l'utilisateur;
- Chaleur : kWh distribué à l'utilisateur;
- Cogénération : 3 UF possibles :
  - kWhélec, la chaleur étant considérée comme un coproduit,
  - kWhchaleur, l'électricité étant considérée comme un coproduit,
  - x kWhélec + y kWhchaleur, x et y étant à préciser (ratio x/y constant).

Par ailleurs, l'étude ne vise pas toujours à comparer directement des filières entre elles mais parfois à comparer différents scénarios, par exemple :

- différents scénarios de valorisation d'une ressource donnée,
- différentes compositions d'un mix énergétique
- différents modes de fabrication du même produit

Dans ces cas de figure, il faut en plus définir une base commune de comparaison des scénarios, ce qui est différent d'une unité fonctionnelle.

#### **5.6.6.5. Évolution des impacts globaux**

Le problème potentiel est de développer un indicateurs synthétique d'impact qui soit 'représentatif' d'une situation / d'un contexte particulier et ne pas être universel. La tentation « marketing » sera de simplifier la note d'évaluation, mais avec un/des biais non visibles. Nous risquons donc d'avoir différents indicateurs synthétiques non comparables. Faut-il chercher un critère synthétique unique globalement reconnu ? Une approche « classique » consiste à monétariser tous les impacts (internalisation des externalités) avec toutes les difficultés inévitables rapportées par la littérature économique.

#### **5.6.6.6. Évaluation multicritère**

Le contexte actuel, marqué par une demande forte de critères de durabilité pour les nouvelles filières qui se mettent en place, est favorable à une évolution des méthodologies ACV, notamment en applications aux spécificités des filières utilisant la biomasse végétale :

- Prise en compte des spécificités des ressources « vivantes » que sont les différents types de biomasse.
- Mise en place d'outil d'évaluation et de comparaison de systèmes structurellement très différents (algues vs. forêts, filières procédés de production de biomasse hors sol vs. filières mobilisant des surfaces cultivées, etc.).
- Mise en place d'outil d'évaluation et d'indicateurs utilisables pour les différents acteurs d'une filière en vue de l'amélioration de ses pratiques et de ses activités.
- Extension des logiques ACV aux impacts autres qu'environnementaux : économie, social avec une complexité croissante sur les enjeux de pondération (approche monétariste qui peut être réductrice).

Dans ce chapitre il faut distinguer plusieurs choses :

Dans l'ACV, à l'étape « analyse des impacts », dans la 3ème phase « évaluation », on peut appliquer une méthode d'analyse multicritère qui permet d'identifier le système qui respecte le plus l'environnement sur l'ensemble des critères environnementaux (les impacts).

Pour répondre au principe de développement durable, on peut réaliser 3 types d'ACV : environnemental, économique et social. On réalise ensuite une analyse multicritère qui permet d'identifier le système le plus en adéquation avec le principe du développement durable en considérant les 3 familles de critères ; environnementale, économique et sociale.

On pourrait rajouter une quatrième famille de critères qui a été très peu étudiée par l'ACV : les risques d'accident qui doivent être considérés dans l'étude des énergies renouvelables.

### **5.7. Etude prospective sur les usages non alimentaires de la biomasse végétale : les scénarios d'évolution à 2050**

Quatre scénarios d'usages non-alimentaires de la biomasse végétale à l'horizon 2050 construits par le groupe de travail sont ensuite présentés. L'implication des scénarios sur l'occupation des sols a été explorée, de façon succincte et simplifiée, et en se référant à des ordres de grandeur issus d'exercices



de prospective de référence sur l'alimentation et l'énergie. Ce travail propose, à grands traits, quelques éclairages sur les tensions possibles entre usages de la biomasse et les implications sociales et environnementales d'un développement à grande échelle.

### **5.7.1. Cadre d'analyse et méthode de l'étude prospective**

#### **4.4.5.7.1.1. Démarche générale et cadre d'analyse**

L'étude prospective sur les futurs usages non-alimentaires de la biomasse végétale a suivi la méthode classique d'élaboration des scénarios, s'appuyant sur un groupe d'experts constitué pour l'occasion, et l'a complétée par un travail d'illustration quantitative partant des besoins futurs alimentaires et en biomasse estimés pour les confronter avec les surfaces disponibles au niveau mondial.

Quatre scénarios d'évolution possible des usages non alimentaires de la biomasse ont été construits. Le recours à la méthode des scénarios a permis de faire le lien entre toutes les dimensions du sujet, de les intégrer dans une vision prospective cohérente et d'identifier des voies d'évolution originales et contrastées.

#### **4.2.5.7.1.2. Eléments de méthode**

##### ***Le champ de l'étude***

La notion de *produit biosourcé* employée dans l'étude est celle définie dans le cadre de l'ARP VegA : les produits biosourcés sont les « produits énergétiques et industriels issus du végétal hors des domaines de l'alimentaire et de la santé, dont les applications principales portent sur l'énergie, la chimie organique et les biomatériaux ». La réflexion prospective s'est intéressée plus particulièrement à deux axes : la production d'énergie et la production de molécules pour la chimie ; la question des biomatériaux n'a pas été intégrée à l'étude.

L'horizon temporel choisi pour les scénarios est 2050. Cet horizon éloigné permet d'envisager de réelles ruptures, notamment sur le plan énergétique, mais aussi sur les plans démographiques et alimentaires. L'échelle spatiale retenue est l'échelle mondiale, permettant ainsi d'intégrer les enjeux climatiques, alimentaires et énergétiques globaux à la réflexion. Cependant, le point de vue adopté est nettement centré sur les pays du Nord, notamment en ce qui concerne les attentes sociétales, les pratiques de consommation, les usages énergétiques, etc. Le temps imparti à l'étude ne nous a pas permis de traiter plus spécifiquement des enjeux pour les pays en développement (accès à l'énergie, raréfaction des ressources en biomasse, filières charbon de bois, etc.).

##### ***La méthode des scénarios***

L'étude a mis en œuvre la méthode des scénarios dite d'analyse morphologique, dont les principales étapes sont :

i.(i) la décomposition du système étudié en variables et composantes : cette première phase consiste à découper l'objet considéré – ici les usages de la biomasse – en variables clés, elles-mêmes regroupées en dimensions, ici nommées « composantes » (cf. tableau 57).

ii.(ii) la formulation d'hypothèses d'évolution par variable, s'appuyant sur une analyse des tendances passées et des signaux faibles, puis la construction de scénarios partiels, ou microscénarios, obtenus en croisant les hypothèses par variable

iii.(iii) la combinaison des microscénarios pour la formulation de scénarios d'ensemble contrastés, cohérents et plausibles.

## Description analytique du système

Pour les besoins de l'étude, un système concernant les usages non alimentaires de la biomasse végétale a été structuré en 5 composantes :

Tableau 59 - Variables et composantes du système décrivant les usages non alimentaires de la biomasse végétale

### **Composante 1 - Ressources énergétiques et en carbone**

Production de carbone et d'énergie fossile, innovations dans l'usage de l'énergie par secteur, politiques énergétiques

### **Composante 2 - Attentes sociétales des citoyens et des consommateurs**

Régimes de consommation, d'habitat, de participation des citoyens aux orientations sociotechniques, régimes d'innovation

### **Composante 3 - Filières produit biosourcés et innovations technologiques**

Filières biocarburants, bois-énergie, chimie du végétal, articulations entre ces filières, structuration spatiale

### **Composante 4 - Gouvernance et politiques publiques**

Politiques et gouvernances mondiales sur le changement climatique, politiques énergétiques, régulation des marchés agricoles, politiques des marchés des produit biosourcés, politiques nationale et territoriale d'appui aux filières produit biosourcés, politiques de R&D sur les produit biosourcés

### **Composante 5 - Développement et croissance socioéconomique**

Croissance économique, démographie, modes de vie et de consommation, consommation et régimes alimentaires, pression sur les ressources et l'environnement

## **Les scénarios de référence**

Pour certaines variables ou composantes, des hypothèses issues d'exercices de prospective mondiale ont été mobilisées.

i.(i) Les hypothèses sur le cadre socioéconomique général et les dimensions environnementales se sont notamment appuyées sur les scénarios du Millenium Ecosystem Assessment MEA, (2005), du GIEC (Special Report on Emissions Scenarios 2000, 2007) et du scénario Agrimonde 1 de la prospective Agrimonde (2009).

ii.(ii) Les analyses du World Energy Outlook (WEO 2007, 2008) de l'Agence Internationale de l'énergie ont également été mobilisées, et l'exercice Energy Technology Perspective 2008 ou ETP (AIE, 2008) a plus particulièrement fourni un cadre de réflexion sur les systèmes énergétiques et les innovations technologiques dans ce domaine. Des hypothèses du World Energy Technology Outlook de la Commission européenne (WETO-H2) ont également été mobilisées.

iii.(iii) Enfin, la prospective Agrimonde a très largement inspiré les réflexions sur l'alimentation et sur l'évolution de l'occupation des sols (INRA-CIRAD, 2009).

### **1.3.5.7.1.3. L'illustration des scénarios par des ordres de grandeur : une confrontation des résultats de prospectives sur l'énergie et l'alimentation**

Les scénarios VegA sont avant tout qualitatifs et **en aucun cas ne prétendent donner des estimations quantifiées de nature prédictive** sur le développement des usages de la biomasse.

Cependant, en s'appuyant sur les liens existants, par construction, entre les scénarios VegA et des scénarios de référence quantifiés (*cf.* ci-dessus), des ordres de grandeurs sur la démographie, la consommation alimentaire et énergétique, et les émissions de gaz à effet de serre liées au secteur énergétique ont été empruntés à ces différents exercices, de manière à illustrer les scénarios et donner la mesure de certaines transformations possibles.

Tableau 60 : Illustrations quantitatives : indicateurs et scénarios de référence

Variable	Indicateur	Scénarios ou projections de référence
Démographie	Population mondiale	Projections médianes de l'ONU à 2050 (ONU, 2006, <i>World Population prospects: the 2006 revision</i> )
Consommation alimentaire	Consommation journalière individuelle, (en kilocalorie par jour et par personne)	Scénarios Agrimonde (Agricultures et alimentations du monde en 2050 : Scénarios et défis pour un développement durable, 2008)
Consommation énergétique et mix énergétique	Energie primaire par type de source (en millions de Tep)	Scénarios ETP, Agence Internationale de l'Energie, 2008.
Emissions de Gaz à effets de serre du secteur énergétique	Tonnes d'équivalent CO2 par an	Scénarios ETP, Agence Internationale de l'Energie, 2008

Ces chiffres ne sont donc pas issus de travaux de modélisation spécifiques aux scénarios VegA, mais «empruntés» à différents scénarios issus de prospectives de référence qui ne portent pas sur le même objet. **Les valeurs mentionnées doivent donc, étant donnée cette construction, être interprétées et manipulées avec prudence.**

Dans un deuxième temps, le groupe de travail s'est proposé, sur la base des quatre scénarios construits, d'analyser la cohérence entre les ordres de grandeur retenus sur la consommation de bioénergie et de biomolécules et ceux relatifs à l'évolution de la consommation alimentaire. Il s'agit de repérer, à grand trait, les éventuelles tensions générées par ces nouveaux usages de la biomasse sur l'occupation des sols, et de réfléchir sur l'opportunité (ou non) et les moyens d'atteindre les niveaux de consommation projetés dans une variété de configurations socio-économiques, politiques et de régimes d'innovation.

#### 5.7.1.4. Les hypothèses par composante

##### 5.7.1.4.1. Composante 1 : ressources énergétiques et en carbone en 2050

Les évolutions à venir du paysage énergétique mondial et les transformations possibles des systèmes sont des aspects déterminants des usages futurs de la biomasse qui vont conditionner la place de la bioénergie et des biomolécules. Trois axes ont été explorés pour formuler des microscénarios contrastés sur cette composante.

##### *Le devenir de la production de carbone fossile*

En premier lieu, différentes hypothèses portant sur l'état futur de la production de combustibles d'origine fossile ont été envisagées, étant donné leur rôle prépondérant dans les systèmes énergétiques mondiaux actuels (*cf.* partie 5.5.2). Les fortes incertitudes concernant le pic – ou le plafond – de production de pétrole (peak-oil) et de gaz ont conduit à formuler deux hypothèses contrastées, prenant notamment en compte l'évolution des capacités de production et la mise en œuvre de voies technologiques pour substituer le pétrole par le charbon pour un certain nombre d'usages (pour les transports notamment).

(1) Une première hypothèse envisage des investissements massifs et des innovations dans les secteurs pétroliers et gaziers, qui **maintiennent un niveau d'offre en pétrole et en gaz** relativement conséquent jusque dans les années 2050, bien que décroissant à partir des années 2020-2025, mais surtout **un recours accru au charbon**. Les coûts de production du pétrole et du gaz augmentent graduellement sur la période ; le charbon, qui s'y substitue en partie, atteint en 2050 une place centrale dans la production de carbone fossile.

(2) Selon une seconde hypothèse, un **déclin plus précoce et plus marqué** de la production de pétrole intervient, suivi de celui du gaz. Malgré une augmentation de la production de charbon, des épisodes réguliers de carence de la production par rapport aux niveaux de consommation provoquent de fortes tensions sur les marchés de l'énergie, et de grandes fluctuations des prix du carbone fossile sur toute la période.

### ***Innovations sur les sources, les vecteurs et les usages énergétiques***

Un deuxième axe de réflexion a porté plus largement sur les transformations possibles relatives aux sources, aux vecteurs et aux usages énergétiques dans les transports, dans le secteur résidentiel-tertiaire et le secteur industriel. Trois hypothèses d'évolution ont été envisagées.

(1) Une **hypothèse au fil de l'eau** correspond à une situation où, en 2050, ni le type de sources mobilisées ni les modes de production et d'usage de l'énergie n'ont connu de changement radical. L'innovation est principalement de nature incrémentale. Elle concerne par exemple dans le domaine des transports, la taille et le poids des véhicules (véhicules urbains), la performance des carburants, la baisse des émissions de polluants (particules etc.), ou encore dans le secteur résidentiel l'amélioration de l'isolation thermique des logements neufs. Le carbone d'origine fossile reste la source majoritaire pour la production d'électricité et de chaleur, de même que pour les transports.

(2) Une seconde hypothèse explore **une transition radicale des systèmes énergétiques qui s'affranchissent des ressources fossiles et intègrent des finalités environnementales**. Cette transformation repose sur des innovations technologiques de rupture, qui portent à la fois sur les grands réseaux énergétiques et sur les usages de l'énergie. Dans la production d'électricité, les énergies fossiles sont peu à peu remplacées par l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables. Le secteur des transports se « décarbonise », avec l'émergence de véhicules à hydrogène et électriques. L'amélioration de l'efficacité énergétique au niveau de la production, de la distribution et des usages de l'énergie constitue un axe majeur d'innovation. Dans les domaines de l'habitat (reconfiguration énergétique des logements, bâtiments passifs,...) et de l'industrie (application des principes de l'écologie industrielle) notamment. Ces innovations permettent de réduire fortement la consommation énergétique. De profonds changements dans les pratiques, globalement plus économes, accompagnent ces transformations.

(3) Une autre voie de transition énergétique, qui est une variante de l'hypothèse précédente, a également été envisagée, sur le principe d'une **réorganisation profonde des infrastructures et des réseaux énergétiques, en lien avec des dynamiques d'aménagement des territoires et les évolutions des modes de vie**. Cette hypothèse considère une reconfiguration spatiale progressive de la fourniture, de la distribution et de la consommation de l'énergie à l'échelle des territoires métropolitains et ruraux, associée à une transformation des localisations, des échanges et des déplacements qui participerait à la maîtrise des besoins en énergie. Des solutions énergétiques décentralisées sont développées pour un certain nombre d'usages et de configurations territoriales, en fonction des ressources et des technologies mobilisables, des acteurs, et des usagers. Les

infrastructures de dimension collective se développent (réseaux de chaleur par exemple). Ainsi dans les transports, un recours à de **nouvelles combinaisons modales et un développement des transports collectifs interviennent**, de même que **l'utilisation de vecteurs énergétiques différents selon les usages** : par exemple, un recours à l'énergie électrique pour le transport dans les villes (moins polluante pour l'air), et des transports de plus longue distance basés sur des vecteurs plus facilement stockables et transportables (combustible fossile et biocarburants).

### ***Evolution des politiques énergétiques***

Appréhender le devenir des systèmes énergétiques appelle une réflexion sur l'évolution des politiques publiques de l'énergie, particulièrement structurantes dans ce secteur. En fonction des objectifs prioritaires qui leur seront possiblement assignés et des modes d'intervention privilégiés, quatre évolutions possibles ont été esquissées.

(1) Une première hypothèse considère des **politiques énergétiques fortement orientées par la prise en compte du changement climatique**. Des mesures volontaristes en faveur d'une économie faible en carbone adoptées par les Etats se traduisent dans des objectifs ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'innovation et le développement de nouvelles filières énergétiques sont soutenus par des aides publiques directes et indirectes, pour faire émerger une offre énergétique de substitution au carbone fossile.

(2) La seconde hypothèse explorée est celle d'une évolution vers des **politiques publiques guidées principalement par un objectif de souveraineté énergétique**. L'impératif de sécurité énergétique et de stabilité des approvisionnements inciterait les Etats à limiter le plus possible leur dépendance vis-à-vis du pétrole ou du gaz, dont la production est particulièrement concentrée géographiquement.

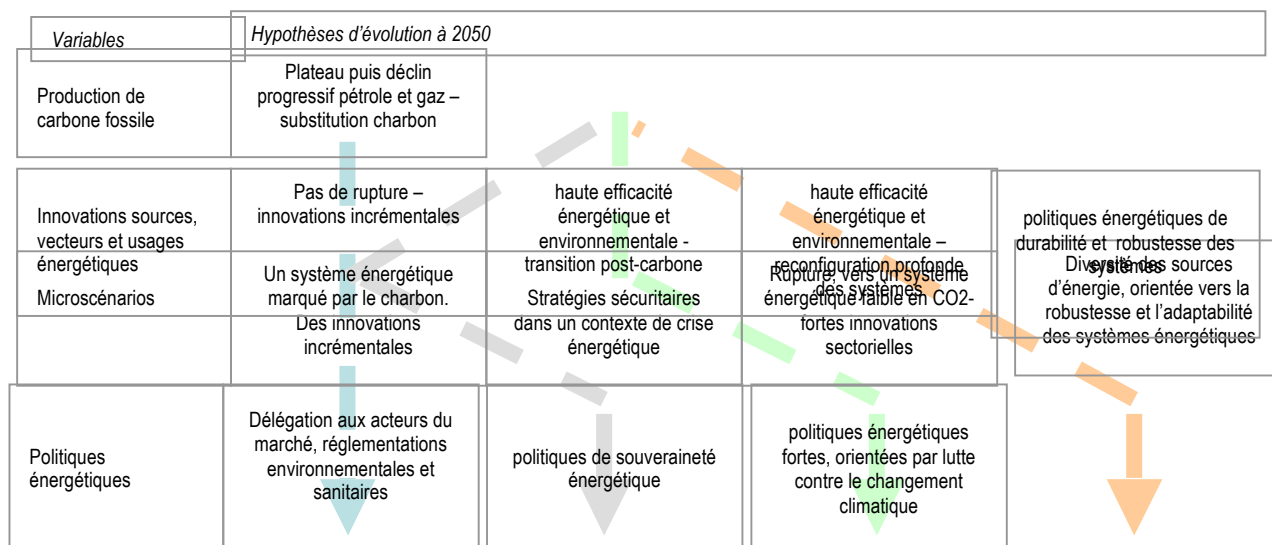
(3) Dans un troisième cas de figure, ce sont des **préoccupations liées à la robustesse et à la durabilité des systèmes énergétiques face à des ruptures potentielles** des approvisionnements ou à des aléas environnementaux (climatiques notamment) qui structurent les politiques publiques. Selon cette hypothèse, une diversification des sources est recherchée, avec en particulier un développement des énergies renouvelables et propres (émissions de GES entre autres), et la mise en œuvre de solutions énergétiques à des échelles territoriales, avec un rapprochement d'une partie de la production énergétique de son usage final.

(4) Enfin, une **situation de laisser-faire** où les politiques énergétiques sont faibles et n'imposent pas d'orientations fortes en termes d'objectifs et de moyens a été envisagée. De fait il s'agit d'une situation où les politiques énergétiques sont déléguées aux acteurs du marché de l'énergie. L'action publique se limite à l'édiction de réglementations et de normes encadrant les secteurs des transports et des services dans le sens d'une amélioration des performances énergétiques, environnementales et sanitaires des systèmes énergétiques.

### ***Synthèse des hypothèses de la composante 1 et microscénarios***

Le tableau suivant relate les différentes hypothèses envisagées par le groupe de travail pour les différentes variables portant sur les évolutions des systèmes énergétiques et les microscénarios qui ont été construits sur cette base.

**Tableau 61 : Composante 1 : Ressources énergétiques et en carbone en 2050 (A REVOIR AU FINAL MISE EN PAGE DU TABLEAU)**



#### 5.7.1.4.2. Composante 2 : attentes des citoyens et des consommateurs vis-à-vis des produit biosourcés

Les attentes des citoyens et des consommateurs vont orienter le développement des produit biosourcés (i) par leur participation, ou non, à la construction des marchés, notamment à travers la mise en place de labels et de certifications environnementales, (ii) en orientant les débats publics, par le développement de fronts de controverse mais aussi de manière réflexive en précisant le cadre de mobilisation et les finalités des produit biosourcés, et (iii) en déterminant le développement des filières produit biosourcés dans les territoires, à la fois de façon normative et réactive lorsque des conflits d'usages émergent autour de la production. Il s'agit globalement de construire des hypothèses variées permettant de situer la place des consommateurs, des citoyens et des usagers dans la construction des innovations sociotechniques.

Ainsi, dans cette composante, les questions qui vont être examinées ont trait à l'engagement des consommateurs sur les marchés, au rapport des individus au territoire, et à l'implication ou à la réactivité des individus face aux innovations sociotechniques. Chacune des hypothèses retenues ici s'insère dans un cadre plus général de fonctionnement reliant les consommateurs et les marchés de produit biosourcé<sup>718</sup>. Cela justifie l'utilisation du terme de « régime ». En effet, les attentes des citoyens et des consommateurs ne sont pas exprimées de manière abstraite en présupposant un système d'offre et de demande où les citoyens et les consommateurs n'auraient qu'à se positionner et à exprimer leur choix sur le développement durable par exemple. C'est parce que des cadres et des produits marchands se sont structurés que les valeurs et les opinions des individus peuvent s'exprimer sur les marchés. On envisage ainsi des situations de co-construction, qui valent aussi bien pour une offre et une demande requalifiées que pour une offre et une demande déqualifiées. Ainsi, on considère par exemple que les produits low-cost correspondent à une co-construction d'un engagement faible des consommateurs sur les marchés, à la fois par des segments de marché qui se spécialisent sur des produits à bas prix, et par des consommateurs qui accordent une faible importance aux valeurs écologiques de préservation.

<sup>718</sup> Barbier, 2009

Le premier axe de réflexion s'intéresse aux **relations des consommateurs aux marchés**. Il s'agit d'examiner la co-construction<sup>719</sup> des produits biosourcés par les consommateurs et des consommateurs par les produits biosourcés en partant du mode d'engagement des consommateurs sur les marchés<sup>720</sup>. Trois hypothèses d'évolution possible de l'expression des attentes des consommateurs à travers leurs actes de consommation ont été formulées : un consumérisme actif, une consommation civique, et une consommation low-cost dominante.

(1) Dans une première hypothèse, on assiste à l'ascension d'un **consumérisme structurant et actif** (voire activiste) et au développement de l'action organisée de groupes de consommateurs, dans la lignée des réflexions actuelles sur la consommation engagée<sup>721</sup>. Les associations de consommateurs et les représentants d'usagers renforcent les exigences de durabilité sur les produits biosourcés et participent à la définition de labels, de normes, de réglementation ; ils coproduisent les produits biosourcés et sont moteurs de leur émergence.

(2) Dans une deuxième hypothèse, **les consommateurs suivent et se conforment à des recommandations et à des réglementations publiques** par leurs actes de consommation ; ces recommandations reflétant des objectifs de consommation durable fonctionnent comme des prescriptions. Cette hypothèse reprend des éléments de réflexion du modèle de justification de la cité civique<sup>722</sup>.

(3) Dans un troisième cas, on fait l'hypothèse d'absence d'offre push pour les produits biosourcés, qui se justifie plus globalement par un **environnement de marché dominé par des exigences de low cost**, avec éventuellement à la marge, pour des *happy few*, une offre plus spécifiée sur des produits biosourcés. Des normes *a minima* sont appliquées sur les produits.

Le second axe envisage le **type de rapport qu'ont les individus au territoire**, en s'inspirant des modèles Voice/Exit/Loyalty développés par Albert O. Hirschman, des réflexions de Pierre Lascombes<sup>723</sup> sur le bien commun comme construit territorial, et de la conception des problèmes publics développée par John Dewey<sup>724</sup>.

(1) Dans la première hypothèse, le territoire est pour les individus le lieu d'une proximité sociale et de formulation collective des problèmes publics. Les individus ont une vision territorialisée de leurs relations et des interactions entre leurs activités ; localement ils prennent part aux débats sur les évolutions du territoire et s'organisent autour d'enjeux qui les concernent en examinant les conséquences collectives des actions individuelles.

(2) Dans la seconde, les individus accordent peu d'importance aux relations sociales de proximité et sont peu impliqués dans la vie du territoire (Exit). Ils appartiennent à des réseaux sociaux multiples qui pour la plupart sont extérieurs au territoire. Cependant, étant soucieux à titre individuel de leur cadre de vie, les opérations d'aménagements et le développement de nouvelles activités sont fréquemment à l'origine de conflits d'usages et de voisinages (Voice).

---

<sup>719</sup> Callon, M. <http://www.csi.ensmp.fr>

<sup>720</sup> Chatriot A., Chessel M-E et Hilton M. (2004), *Au nom du consommateur. Consommation et politique en Europe et aux Etats-Unis au XXe siècle*, Paris, La Découverte.

<sup>721</sup> Dubuisson-Quellier, S., Lamine, C., Le Velly, R. 2011. *Sociologia Ruralis* 5(3):304-323.

<sup>722</sup> Boltanski, L., Thevenot, L. 1991. *De la justification. Les économies de la grandeur*. Gallimard.

<sup>723</sup> Lascombes, P. et Le Bourhis, J.P. 1998. Le bien commun comme construit territorial, identités d'action et procédures. *Politix*, n°42.

<sup>724</sup> Dewey, J. 2010. *Le public et ses problèmes*. Gallimard.

Un troisième axe de réflexion envisage **le type de relations que les individus entretiennent avec les différents acteurs de l'expertise scientifique et avec les innovations sociotechniques**. Les trois hypothèses formulées s'articulent autour d'une discussion du modèle de démocratie technique<sup>725,726</sup>.

(1) Une première hypothèse d'évolution que nous avons qualifié de **régime participatif** considère de nouvelles modalités de participation des individus, basées sur une implication croissante de citoyens ou groupes de citoyens, qui fabriquent une expertise multiple et collective. Au sein d'agoras constituées, les débats avec les différents acteurs de l'innovation conduisent à la définition d'orientations sociotechniques où les conséquences des innovations sont explorées et prises en compte.

(2) Dans une seconde hypothèse qualifiée de **régime bureaucratique** à expertise captive, les individus peu impliqués délèguent les décisions concernant les orientations sociotechniques au politique et à l'expertise scientifique qui est directement mobilisé par l'Etat.

(3) La troisième hypothèse, **régime technocratique à expertise contradictoire**, décrit une situation de délégation des choix sociotechniques par les individus, où une expertise contradictoire avec une multiplicité d'acteurs (experts et contre-expert d'agences, de grandes ong, d'acteurs privés) à l'échelle nationale et internationale (« Adhocratie ») évalue les orientations sociotechniques.

Le quatrième axe de réflexion prospective décrit **les configurations d'acteur qui déterminent l'innovation**. Trois hypothèses ont été formulées.

(1) La première envisage une **hybridation forte entre recherche publique et privée** qui peut évoluer jusqu'à une « annexion » de certains thèmes de recherche par des entreprises privées.

(2) La seconde envisage une **innovation centralisée**, *Top-down*, pilotée par l'Etat (recherche publique) qui définit l'objectif de l'innovation et le type de recherche à développer, avec des alliances avec les acteurs privés pour le développement des technologies [proche du modèle de recherche en mode 1 développé par Nowotny<sup>727</sup>].

(3) la troisième hypothèse envisage un **régime d'expérimentation collective** qui reprend la terminologie le modèle développé par A. Rip et P.-B. Joly (à paraître). Il s'agit d'un régime d'innovation distribué et ouvert intégrant de multiples acteurs. Cela se traduit par des innovations induites par les usagers ou basés sur des 'communautés'. Dans ces innovations, l'engagement des acteurs ne concerne pas tant « la société civile » dans son ensemble, mais l'engagement sélectif de groupes de personnes concernées par un sujet, un problème, une « issue ». Il s'agit de collaborations entre professionnels « établis », scientifiques et ces groupes de personnes concernées, autour de problèmes particuliers et situés, qui peuvent ensuite éventuellement évoluer vers des problématiques collectives ou d'intérêt général. Pour la science, ce type d'innovations implique de nouvelles façons de travailler avec les acteurs, et une organisation complémentaire de la science en « laboratoire ».

### **Synthèse des hypothèses et microscénarios**

Tableau 62 : composante 2 : Attentes des citoyens et des consommateurs vis-à-vis des produits biosourcés

<sup>725</sup> Lascoumes, P., et Barthe, Y. 2001. Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique, Paris, Le Seuil, La Couleur des Idées.

<sup>726</sup> Pestre, D. 2006. Introduction aux Science Studies, la Découverte, coll. Repères, 122p.

<sup>727</sup> Nowotny, H. 2006. Cultures of technology and the quest for innovation (ed.), New York, Oxford Berghahn Books



Variables	Hypothèses d'évolution à 2050			
<b>Mode de consommation</b>	Consommation Low-cost	Consomérisme actif	Consommation civique	
<b>Régime d'habiter et territoire</b>		Peu de relations de proximité, des réseaux sociaux éclatés et une attention au cadre de vie	Territoire lieu de la proximité sociale	
<b>Relation de la société aux sciences et aux techniques</b>	Régime bureaucratique à expertise captive	Régime technocratique à expertise contradictoire	Régime participatif	
<b>Régime d'innovation</b>	Hybridation forte recherche publique et privée	Top-down, piloté par l'Etat et alliance avec acteurs privés	Multiacteurs, expérimentation collective, participation des usagers	
<b>Microscénarios</b>	Des attentes sociétales principalement déléguées au marché et différenciées	Une gestion étatique de l'innovation dans une situation de crise et d'engagement faible des consommateurs et citoyens	Un engagement civique pour les enjeux environnementaux et une gestion technocratique à expertise multiple	Un engagement participatif des individus sur la base d'une diversité de réseaux, notamment territoriaux

#### 5.7.1.4.3. Composante 3 : filières produit biosourcés et innovations

Cette composante explore plusieurs trajectoires possibles d'évolution des filières biomasse. Les différents usages de la biomasse végétale pour l'énergie et la chimie sont envisagés, avec des dynamiques possiblement différenciées selon les filières concernées. Diverses trajectoires d'innovation, incluant l'émergence de voies technologiques nouvelles, sont prises en compte, ainsi que des configurations différentes des filières selon les acteurs impliqués dans leur développement. Enfin, sont évoqués à grands traits les caractéristiques possibles de ces filières en termes de structuration spatiale et de mode d'insertion dans les marchés.

#### *Hypothèses d'évolution des filières biocarburants pour les transports*

(1) Une première hypothèse explore une situation dans laquelle **les filières biocarburants de première génération continuent de représenter le modèle dominant** de production de produit biosourcés à destination des transports à l'horizon 2050. Cette situation adviendrait dans un contexte où l'innovation, déléguée aux acteurs privés, serait de nature principalement incrémentale et orientée vers la compétitivité. Considérées comme risquées économiquement (investissements lourds et coûts logistiques importants), les filières fondées sur d'autres générations de biocarburants n'émergent que tardivement, lorsque les prix des carburants classiques d'origine fossile augmentent sensiblement. Notamment, les biocarburants lignocellulosiques peuvent émerger dans les bassins où la ressource forestière est abondante et exploitable à bas coût pour ce type d'usage. Selon cette hypothèse, donc, les filières de transformation de la biomasse s'appuient sur les systèmes et les technologies les plus mûres. Les grands groupes agroindustriels consolident leurs positions sur ces marchés, valorisant leur savoir-faire logistique et leur maîtrise des filières agroindustrielles, mais une diversité d'acteurs s'implique également : investisseurs issus du secteur financier (banques, fond d'investissement etc.) dans un mouvement plus général de financiarisation du secteur de la production et du foncier agricole, groupes pétroliers, soucieux de s'investir plus en amont pour consolider leurs approvisionnements. Il en résulte des filières biocarburants intégrées verticalement, reposant sur de grands complexes industriels de production de biomasse, produisant des produit biosourcés standardisés à destination des marchés

nationaux et internationaux. Les filières basées sur la canne à sucre et l'huile de palme dominent durablement les marchés mondiaux des produits biosourcés ; la biomasse est produite dans les pays aux avantages comparatifs les plus marqués sur ces productions, et ayant développé les infrastructures idoines.

(2) Une seconde hypothèse envisage le **développement d'une diversité de filières biocarburants** (liquide ou gazeux) **dans le monde**, qui se développent **en fonction des sources de biomasse disponibles**. Deux variantes ont été explorées.

(i) Selon une première variante, **des trajectoires d'innovation dominantes se mettent en place par grandes régions du monde ou par pays**, avec des investissements de grande ampleur et des unités de transformation de taille importante, s'appuyant sur de grands bassins régionaux d'approvisionnements. Dans chaque situation, on développe des technologies, des procédés et des filières qui s'adaptent à un type dominant de biomasse. Selon la filière, les acteurs impliqués varient en fonction des compétences et des savoir-faire nécessaires, ainsi que des alliances ou modes de contractualisation développés entre acteurs industriels et acteurs de la production de biomasse. Ainsi, les biocarburants lignocellulosiques apparaissent dans les grandes régions forestières, les biocarburants à base de cultures agricoles perdurent dans certains pays (Brésil, Indonésie par exemple), les biocarburants à base d'algues se développent dans les pays où l'espace littoral le permet ou dans les lieux où les infrastructures d'aquaculture terrestres, confinées ou de plein air, sont possibles.

(ii) Selon une deuxième variante, **la biomasse disponible est transformée à proximité, dans de petites unités décentralisées**, et pour des usages situés dans ce même territoire ou à proximité. Des chaînes d'approvisionnement locales se développent. La mise en place de ces petites unités de transformation s'appuie sur une forte innovation vers des technologies de transformation de pointe et « légères » (en tonnage et en investissement), efficaces énergétiquement. Des trajectoires multiples d'innovation émergent, portées par des acteurs très divers selon les situations territoriales (PME innovantes, groupements de producteurs de biomasse, collectivités, filiales de grands groupes du secteur énergétique etc.). Cette hypothèse va de pair avec une transformation importante du secteur automobile, qui doit s'adapter à une plus grande diversité de carburants et mettre au point des moteurs robustes.

### ***Devenir des filières biomasse pour la production d'électricité et de chaleur***

Diverses hypothèses, non exclusives, ont été considérées sur l'évolution des filières de production de chaleur et d'électricité à partir de biomasse, en fonction du type d'usage concerné.

Un premier axe concerne les **usages domestiques individuels**. (1) L'hypothèse tendancielle d'un accroissement des usages dans le cadre des systèmes actuels dits « traditionnels » de combustion de biomasse solide est envisageable (dans les pays du Sud comme du Nord), sur la base de filières plus ou moins structurées et formelles. (2) Une autre voie consiste en un développement de systèmes énergétiquement plus efficaces, s'appuyant d'une part sur une optimisation des foyers de combustion (efficacité énergétique et pollution aérienne) et d'autre part sur une gestion des circuits d'approvisionnement en biomasse (avec une amélioration de la première transformation quant il y a lieu, notamment pour le charbon de bois dans les pays en développement), pour limiter les pertes sur l'ensemble de la filière.

Un second axe concerne **les usages de la biomasse à l'échelle industrielle et collective**. (1) Une première hypothèse envisage leur développement dans un cadre plutôt décentralisé, fondé sur de nouvelles technologies de chaufferies à bois à haute efficacité énergétique, de gazéification, de cogénération, ou encore de méthanisation, avec d'une part une valorisation de la chaleur sur des sites

industriels ou des réseaux urbains et d'autre part la possibilité d'injecter du biogaz ou de la bioélectricité dans les réseaux courants de gaz ou d'électricité. Ces filières peuvent se mettre en place dans des configurations variées, en faisant intervenir une diversité d'acteurs et des partenariats multiples en fonction d'opportunités locales de production et d'usage, ou se faire *via* un pilotage plus global par les macroacteurs de l'énergie et/ou de l'environnement. Il est envisageable que ce pilotage aille jusqu'à une certaine intégration verticale de la filière jusqu'à la production de biomasse par ces macroacteurs énergétiques, soucieux de maîtriser les approvisionnements et la chaîne de valeurs. (2) Une autre trajectoire a été envisagée, qui consiste à accroître la mobilisation de la biomasse comme matière première complémentaire des matières d'origines fossiles dans les centrales thermiques à charbon ou à gaz, dans une logique de substitution partielle et *via* des technologies de co-combustion.

### ***Devenir des filières biomasse pour des usages en chimie***

De nombreux usages de la biomasse dans le domaine de la chimie sont entrevus et commencent à se développer, par exemple dans les domaines de la chimie de base (lubrifiants, alcools,...), de la chimie de spécialité (tensioactifs, monomères,...) et des polymères (comme les bioplastiques). Diverses hypothèses contrastées quant au développement de nouvelles filières de fabrication de ces composants ont été explorées.

(1) L'hypothèse d'une production de biomolécules dans une **logique d'incorporation aux filières classiques** de la chimie est tout d'abord envisagée. Les biomolécules sont alors conçues pour avoir les mêmes caractéristiques et propriétés que les molécules de synthèse issue de la chimie classique, et s'y substituent partiellement, comme matière première complémentaire. Les acteurs de la pétrochimie et des filières papetières sont particulièrement impliquées dans le développement de ces filières.

(2) Une autre voie de substitution partielle peut au contraire passer par des **filières spécifiques** pour un certain nombre de produits, valorisant plus directement les propriétés fonctionnelles des biomolécules. Dans ce cas, les filières ne convergent pas vers la fabrication d'intermédiaires standards, et mettent en relation directement un producteur de biomasse, un transformateur et un usager industriel ou artisanal, sur des marchés segmentés.

(3) Selon une dernière hypothèse, plus en rupture, c'est l'ensemble de la chimie du carbone fossile qui est peu à peu remplacée par la chimie du carbone renouvelable végétal, progressivement mais massivement et dans une **logique à terme de substitution totale**. Cette trajectoire est fondée sur des innovations de rupture et une reconfiguration profonde des filières actuelles de la chimie. Selon les molécules d'intérêt, le craquage de la matière végétale est employé pour produire des intermédiaires chimiques standards sur le modèle de la pétrochimie, ou de nouvelles voies chimiques s'appuyant sur les propriétés spécifiques des molécules du végétal. En termes d'organisation des filières et d'innovation, ces évolutions font appel à d'étroites collaborations entre acteurs d'horizons et de métiers différents. Il s'agit par exemple des acteurs de la production de biomasse, des industriels de la chimie et des entreprises agroindustrielles, qui mutualisent les compétences, connaissances et savoir-faire pour mettre en place de nouveaux procédés et modèles de filières adaptés à ce type de matière première.

L'articulation entre ces ensembles de filières par type d'usage (électricité-chaaleur, transports, chimie) a également été prise en compte. Une hypothèse considérée est celle de la **convergence des filières au niveau des bioraffineries**, qui destinaient ses produits à une variété de filières aval, et notamment un couplage de la production de biocarburant et de biomolécules pour les secteurs de la chimie. Cela suppose, en termes d'innovation, une coordination très forte entre acteurs des différentes filières. A l'inverse, **un découplage et un développement indépendant** des différents secteurs est envisageable.

Enfin, dernier point étudié, celui de la structuration spatiale des filières : (i) localisation des usines dans les grands **nœuds logistiques** (ports notamment), approvisionnement et distribution sur les marchés internationaux, (ii) ancrage régional des unités de transformation dans des bassins d'approvisionnement agricoles ou forestiers et (iii) unités de taille réduite et distribuées géographiquement sont les schémas qui ont été considérés dans les microscénarios.

### Synthèse des hypothèses et microscénarios

Tableau 63 : composante 3 : Filières produit biosourcés et innovations

Filières	Hypothèses à 2050			
Biocarburants	Diversité de filières - trajectoires d'innovation dominantes par grandes régions du monde	Filières 1ère génération dominantes – pas d'innovation rupture	Diversité de filières – usage territorialisé et trajectoires innovation multiples	
Electricité et chaleur	Co-combustion centrale	Filières domestiques tendancielle	Filières domestiques plus efficaces et plus propres	Développement usages collectifs et industriels – systèmes +/- décentralisés
Chimie	Biocrude – Incorporation aux filières chimie classique	Innovation rupture – vers une substitution totale		Substitution partielle – fonctionnalités biomolécules
Microscénarios	Substitution partielle du C fossile, basée sur des trajectoires industrielles dominantes mais différenciées selon l'accès à la biomasse	La biomasse comme matière première complémentaire des ressources fossiles en fonction du marché	Des innovations de rupture dans l'usage de la biomasse pour la chimie et l'électricité	Valorisation de la biomasse des territoires et usages localisés et diversifiés (énergie, chimie)

#### 5.7.1.4.4. Composante 4 : gouvernance mondiale et politiques publiques

Les politiques publiques ont été structurantes dans l'évolution récente des usages de la biomasse, avec en premier lieu les politiques directement adressées aux filières biocarburants, sous-tendues par des objectifs nationaux environnementaux, énergétiques, industriels ou de développement rural. Mais ce sont également des orientations politiques plus générales des Etats qui peuvent infléchir les devenir des usages de la biomasse non alimentaire (l'évolution des cadres réglementaires sur l'environnement et la santé par exemple). L'objet de cette composante est d'explorer les diverses évolutions possibles de ces politiques publiques, en prenant en compte leur insertion dans des dynamiques plus globales, impliquant une gouvernance à l'échelle internationale.

#### Les politiques publiques spécifiques aux produit biosourcés

Un premier aspect concerne les politiques publiques spécifiques aux produits biosourcés, qui pourraient être mises en place, prolongées ou supprimées par les Etats. Sans analyser en détail les outils et mesures qui pourraient être privilégiés, il s'agit de considérer une diversité d'orientations possibles.

Une première situation peut être envisagée, tendancielle à plusieurs égards, selon laquelle le développement des filières produits biosourcés fait l'objet de **politiques publiques nationales**

**volontaristes.** Diverses motivations peuvent sous-tendre ces politiques, se traduisant pas des modes d'intervention différents.

(1) Une première motivation possible fait écho à des **préoccupations d'ordre stratégique quant à la sécurité énergétique** nationale et à la dépendance vis-à-vis des matières premières fossiles. Une série de mesures incitatives pourrait dans ce cas être mobilisée à l'échelon national (ou supranational, comme dans le cas de l'Union Européenne), à l'instar des politiques actuelles sur les biocarburants de première génération (objectifs d'incorporation, mesures fiscales, prix garantis, aides aux investissements etc.<sup>728</sup>).

(2) On peut également imaginer un cas de figure où les **politiques sur les produits biosourcés sont intégrées à des orientations politiques plus générales et très volontaristes sur l'environnement et le changement climatique.** De fortes exigences réglementaires, sur les bilans environnemental (GES notamment) et sanitaire des produits et des filières, stimuleraient le déploiement de filières basée sur du carbone renouvelable, tout en leur imposant un certain nombre de critères de durabilité environnementale au travers de normes et de systèmes de certification.

(3) Autre hypothèse prise en compte, celle où les politiques publiques qui visent les filières produits biosourcés sont davantage **centrées sur des objectifs de développement territorial**, faisant intervenir entre autres les collectivités. Les filières produits biosourcés sont selon cette hypothèse encouragées et soutenues par des mesures diverses, dès lors qu'elles s'inscrivent dans le développement économique local et national, participent d'une robustesse et d'une durabilité des systèmes, rendent un certain nombre de services écologiques ou encore respectent le cadre de vie.

(4) Une dernière hypothèse a été prise en compte, plus en **rupture par rapport aux tendances actuelles** dans de nombreux pays : les **politiques publiques nationales** en vigueur au début du siècle sont **progressivement abandonnées**, suite notamment aux controverses et aux impacts liés au développement des biocarburants de premières génération. Une délégation du secteur aux acteurs des marchés s'opère, et l'action publique se positionne principalement dans la structuration et l'encadrement de ces marchés (réglementations, normes sanitaires, environnementales, etc.).

### ***Les politiques de structuration des marchés de produit biosourcés***

Un troisième axe de réflexion s'est intéressé aux politiques de structuration des marchés de produits biosourcés, et a notamment pris en compte la nature des règles qui structurent les échanges internationaux de produits biosourcés. Trois hypothèses ont été considérées.

(1) Selon la première, seuls des **standards de commercialisation** des produits biosourcés sont mis en place, permettant d'avoir des caractéristiques stables et des produits identifiés ; ils favorisent le développement d'un commerce international de produits biosourcés – entrée produits biosourcés transformés dans accords OMC ?

(2) Selon une deuxième hypothèse, parallèlement à la standardisation des produits biosourcés voit le jour une **multiplicité d'initiatives aux niveaux nationaux et international** (labels, codes de bonne pratique etc.) faisant intervenir une diversité d'acteurs (industriels, ONG, organisations internationales) ; sur la base d'un engagement volontaire des parties prenantes, ils qualifient les caractéristiques des produit biosourcés (recyclabilité, bilan énergétique, origine renouvelable, etc.). Mais cette prolifération de démarches volontaires s'effectue sans harmonisation des critères de durabilité à large échelle.

---

<sup>728</sup> Bureau, J.C., Disdier, A.C., Gauroy, C. and Treguer, D. 2010. *Energy Policy* 38(5):2282-2290.

(3) Un troisième cas considère l'éventualité que se mette en place un **système de certification international** (envisagé par Jinke *et al.*<sup>729</sup>), basé sur une normalisation de type ISO et s'appuyant sur des ACV et des critères contraignants de durabilité environnementale et sociale. La mise en place de ce système, qui structure les échanges internationaux à 2050, a nécessité un haut niveau de coopération internationale, d'engagement des acteurs publics et privés, et la révision de certaines règles régissant les accords commerciaux internationaux (OMC).

### **Les politiques de recherche et développement**

Un deuxième axe de réflexion prospective décrit les politiques de recherche et d'innovation mises en œuvre par les Etats, et plus largement les régimes de production des savoirs dans lesquels elles pourraient s'inscrire.

(1) Une première hypothèse envisage des **politiques de recherche fortement orientées vers le développement d'innovations à caractère industriel ou marchand**, dans un contexte d'intense compétition internationale. Les laboratoires publics travaillent étroitement avec la R&D privée ; ils sont de plus en plus soumis à une logique de « retour sur investissement » de la part des Etats, soucieux de conquérir un leadership économique. Le renforcement de la propriété intellectuelle dans le jeu concurrentiel, associé à un relatif « laisser-faire » vis-à-vis de la prolifération des brevets, aboutit en 2050 à une **privatisation des savoirs poussée** (process, semences, gènes) et à des phénomènes d'exclusivité ayant encouragé des effets de *lock-in*<sup>730</sup>.

(2) Une hypothèse où l'intervention publique se rapporte davantage à la figure de l'« Etat modernisateur » peut être formulée, avec des **politiques publiques de R&D très volontaristes, et un rôle central des Etats** qui pilotent l'innovation et le développement en lien étroit avec les **grands acteurs sectoriels**. Selon le contexte économique et géopolitique mondial, la situation de la circulation des savoirs qui y est possiblement associée peut être extrêmement différenciée : (i) d'une situation où les Etats se positionnent comme facilitateurs, promoteurs d'une science ouverte, en s'appuyant sur des **accords multilatéraux ambitieux sur le droit de propriété intellectuelle**, afin de faciliter les transferts technologiques, limiter les coûts d'accès à l'innovation et éviter les trop larges exclusivités ; (ii) à une situation de repli et de secret industriel, de privatisation des savoirs très poussée, voire à un éclatement des systèmes de gestion de la propriété intellectuelle et une bilatéralisation des accords<sup>731</sup>.

(3) Enfin, une situation plus intermédiaire a été envisagée, dans laquelle les politiques de R&D s'inscrivent davantage dans des stratégies d'incitation. En parallèle des activités de recherche publique sur les produits biosourcés, ces **politiques accompagnent l'émergence de projets innovants et stimulent la circulation des connaissances** et des savoir-faire, les échanges d'expériences et les transferts de compétences et de technologie au sein de réseaux territoriaux, nationaux et internationaux. Ils accompagnent aussi **l'émergence de nouveaux systèmes de gestion de la propriété industrielle** (systèmes de gestion collective, systèmes de licences publiques, plateformes de brevets<sup>732</sup>), avec une grande diversité de pratiques selon les particularités sectorielles. Les modes

<sup>729</sup> Dam J. van, Junginger, M., Faaij, A., Jürgens, I., Beste, G., Fritsche, U. 2008. *Biomass and Bioenergy* 32(8) :749-780.

<sup>730</sup> Pestre, D. 2006. Introduction aux Science Studies, la Découverte, coll. Repères, 122p.

<sup>731</sup> Lallement R. (2006), *Prospective de la Propriété Intellectuelle pour l'État- stratège. Quel système de propriété intellectuelle pour la France d'ici 2020 ?*, Conseil d'analyse stratégique, Paris.

<sup>732</sup> Rip, Joly et Callon, à paraître Joly P-B, Rip A. et Callon M. (2010), 'Reinventing Innovation', chapter in Maarten Arentsen, Wouter van Rossum, and Bert Steenge (eds.), *Governance of Innovation*, Cheltenham: Edward Elgar, 2010, pp. 19-32

d'innovation en réseau s'en trouvent facilités. Pour stimuler les entreprises innovantes et protéger de la privatisation certaines ressources du vivant, une restriction du champ du brevetable se met en place dans certains secteurs spécifiques, dans le cadre d'accords internationaux.

### ***Gouvernance mondiale et politiques publiques liées au changement climatique et à l'environnement***

S'inspirant des scénarios globaux du GIEC<sup>733</sup> et du MEA<sup>734</sup>, deux hypothèses contrastées ont été envisagées sur la question du traitement des questions environnementales à l'échelle mondiale.

(1) La première considère que les négociations internationales sur les enjeux environnementaux globaux (changement climatique, biodiversité, etc.) du début de siècle n'ont abouti que sur des **accords peu contraignants et a minima**, et que les Etats ont été peu enclins à mettre en œuvre des politiques nationales ambitieuses en la matière. Ce sont donc des politiques publiques de nature plutôt réactives qui sont mises en œuvre, visant l'adaptation et le traitement des problèmes une fois qu'ils se manifestent et deviennent aigus.

(2) Selon la seconde hypothèse au contraire la prise en compte des enjeux globaux liés au changement climatique et à l'environnement a motivé **l'émergence d'une gouvernance mondiale forte**. Des accords internationaux ambitieux en faveur de la réduction des GES et de la gestion des biens publics mondiaux ont vu le jour, relayés au niveau des Etats par des politiques publiques nationales fortes environnementales et sectorielles.

### ***Gouvernance mondiale sur l'alimentation, régulations des marchés agricoles***

Une dernière dimension, déterminante à examiner pour envisager le futur des usages non alimentaires de la biomasse, concerne les régulations des marchés agricoles et la prise en compte des enjeux alimentaires dans la gouvernance mondiale. Trois éventualités à 2050 ont été distinguées.

(1) Une hypothèse selon laquelle les processus de libéralisation des échanges se sont poursuivis au niveau international, avec en particulier un aboutissement des négociations sur **l'ouverture des marchés agricoles et des accords de libre échange** dans le cadre de l'OMC.

(2) Une deuxième hypothèse envisage la mise en place d'une **régulation multilatérale des marchés agricoles**. Cette **forte gouvernance autour des enjeux alimentaires** a émergé autour d'un consensus sur la nécessité de maîtriser les fluctuations des prix agricoles, notamment de prévenir l'influence croissante des marchés énergétiques sur les marchés agricoles, et de permettre la mise en place de politiques agricoles nationales adaptées aux objectifs de sécurité alimentaire et de développement agricole, dans les pays du Sud en particulier. Plus largement, ces régulations ont aussi pris en considération les aspects fonciers et de gestion des ressources naturelles, sur la base d'un droit international affermi.

(3) Une dernière voie a été imaginée, selon laquelle le contexte économique et géopolitique induit les Etats à adopter des **politiques sécuritaires, notamment à l'égard de l'accès aux ressources et aux chaînes d'approvisionnement** (énergétiques et alimentaires notamment). Les échanges de biens agricoles ont alors lieu dans le cadre d'une bilatéralisation renforcée des relations internationales, et les rapports de force économiques et géostratégiques se cristallisent autour des enjeux alimentaires.

---

<sup>733</sup> GIEC. <http://www.ipcc/ch>

<sup>734</sup> MEA. Millenium Ecosystem Assessment, <http://www.unep.org/maweb/>

## Synthèse des hypothèses et microscénarios

Tableau 64 : composante 4 : Gouvernance mondiale et politiques publiques

Variables	Sous-variables	Hypothèses à 2050			
Gouvernance mondiale et politiques publiques liées au changement climatique		Politiques proactives, accords internationaux ambitieux de réduction des GES et sur l'environnement		Politiques réactives, logiques d'adaptation, accords minimaux - initiatives régionales	
Gouvernance mondiale sur l'alimentation - régulations des marchés agricoles		Régulation multilatérale des marchés internationaux agricoles et fonciers, selon objectifs de sécurité alimentaire et de développement rural	Libéralisation accrue des marchés agricoles et internationalisation des marchés fonciers	Relations bilatérales entre Etats	
Politiques de structuration des marchés produit biosourcés		Labels volontaires + normes internationales	Systèmes nationaux de certification + normes internationales	Multiplicité de labels privés. Codes bonnes pratiques internationaux	Standardisation a minima des produit biosourcés échangés au niveau international
Politiques spécifiques sur les produit biosourcés	Pol. spécifiques d'appui aux filières produit biosourcés	Politiques d'appui territorialisées, selon objectifs de développement local (emplois, accès énergie, environnement etc.)	Politiques nationales d'appui aux filières (objectifs d'incorporation, fiscalité, aides à l'investissement et etc.)	Pas d'appui public à la structuration des filières	
	Politiques de R&D et régime de production de savoirs	Recherche publique sur les produit biosourcés ; appui à la mise en réseau des acteurs et à la circulation des savoirs (licences, systèmes de gestion PI innovants)	Pilotage fort de la R&D par Etats + collaboration grandes entreprises. Privatisation des savoirs et accords de PI bilatéraux	Innovation tournée vers les marchés – course à la propriété intellectuelle	
Microscénarios		Des politiques territoriales tournées vers une gestion durable, soutenues par des accords internationaux et des politiques nationales. Innovation ouverte.	Accords internationaux sur changement climatique et politiques publiques motrices dans les mutations sectorielles – transferts technologiques	Sécurité énergétique des Etats, échanges internationaux et standards environnementaux a minima. Accords bilatéraux sur la PI.	Laisser-faire, peu de régulations internationales et privatisation de la connaissance

### 5.7.1.4.5. Composante 5 : croissance et développement

Le développement des filières produits biosourcés est étroitement lié à l'évolution du paysage économique et sociétal dans lequel elles s'insèrent. Cette dernière composante s'intéresse aux évolutions générales du contexte économique et géopolitique mondial, qui peuvent influencer de manière significative les stratégies et les marges de manœuvre des acteurs publics et privés concernés par les filières produits biosourcés. Les transformations dans les modes de vie et de consommation, en particulier énergétique et alimentaire, sont explorés. Enfin, ont été pris en compte l'effet global que les activités humaines auront eu sur l'état des écosystèmes et le niveau de pression exercé sur les ressources naturelles. Tout d'abord, s'inspirant des scénarios du MEA, du GIEC et d'AgriMonde, des hypothèses sur le contexte général économique et géopolitique mondial ont été réalisées.

(1) Une première hypothèse explore l'éventualité d'un **ordre mondial très fortement marqué par la libéralisation du commerce international**, avec l'OMC comme institution centrale de ce processus de mondialisation. Selon cette hypothèse encore, l'économie mondiale connaît une croissance soutenue pendant la période, tirée par l'essor des pays initialement « émergents » au début du siècle. Malgré un accroissement global des revenus, les inégalités de développement restent marquées, entre pays comme en leur sein, en particulier dans les pays en développement entre les métropoles et les autres



territoires, marquant l'avènement d'un monde à deux vitesses.

(2) Une seconde hypothèse se place au contraire dans le cadre d'une **coopération internationale très forte, qui se cristallise autour de l'enjeu du changement climatique**, et encourage l'émergence d'une économie de la connaissance autour des nouvelles technologies faibles en carbone. Pour être en mesure de traiter ces enjeux globaux, une coopération Nord-Sud très étroite s'est mise en place pour faciliter les transferts de technologies, les flux de capitaux et étendre le développement de cette économie « verte » aux pays en développement.

(3) Autre voie envisagée, celle d'une **gouvernance mondiale multilatérale** qui, à la suite de crises répétées, **s'organise autour de la gestion des biens publics mondiaux**, avec entre autres pour objectif d'accroître la résilience et la durabilité des systèmes alimentaires et énergétiques. L'éventualité d'une mondialisation de plus en plus portée par des **pouvoirs décentralisés** a été ici explorée, avec une montée des grandes régions métropolitaines et des territoires, porteurs d'innovations organisationnelles et institutionnelles. Pour remédier aux problèmes majeurs d'insécurité alimentaire, l'action publique et l'aide au développement se situent ici dans la logique qui privilégie l'amélioration de la répartition des revenus et le développement agricole et territorial. Celui des pays en développement est particulièrement moteur de la croissance économique.

(4) Enfin, l'hypothèse d'un **monde fragmenté et hétérogène**, marqué durant la première moitié du XXI<sup>ème</sup> siècle par une série de **crises économiques et géopolitiques**, a été formulée. En résulte une tendance au repli national et aux stratégies sécuritaires, notamment vis-à-vis de l'accès aux ressources, avec des Etats qui entretiennent des relations bilatérales par le biais desquelles s'expriment pleinement les rapports de force.

Une deuxième dimension a été abordée, celle relative aux évolutions possibles de la démographie mondiale et du phénomène d'urbanisation, liée notamment aux migrations rural-urbain. Cette dimension peut en effet orienter à la fois l'évolution de la demande énergétique et alimentaire, l'évolution des modes de consommation, ainsi que les usages du sol. Trois hypothèses contrastées ont été retenues.

(1) D'abord, celle d'une **croissance moyenne de la population**, qui s'élève à 9 milliards d'individus en 2050<sup>735</sup>, sous l'effet du développement économique et d'une transition démographique qui concerne de plus en plus de pays. Cette éventualité a été associée à différentes évolutions des équilibres urbain-rural.

(i) Une poursuite de la **tendance lourde à l'urbanisation**, qui peut être nourrie à la fois par la tendance à la métropolisation et par un exode de subsistance des populations rurales. L'emprise au sol des espaces artificialisés pourrait ainsi plus que doubler d'ici 2050, pour atteindre de l'ordre de 1,2 millions d'hectares<sup>736</sup>. Les espaces périurbains, qui comptent aujourd'hui pour une grande part des terres cultivées et fertiles pourraient être les plus touchés.

(ii) Une **inflexion de ce phénomène et une stabilisation des flux de population entre villes et campagnes** peut également être envisagée. Dans les pays du Nord, un des moteurs de cette inflexion résiderait dans l'attractivité des territoires ruraux, pour leur qualité de vie notamment, qui repose sur la mise en œuvre de relations urbains-rural plus équilibrées. Dans les pays en développement, le principal élément déterminant serait la vitalité du développement rural et l'évolution de l'accès aux services.

(2) Enfin, s'inspirant du scénario *Order from Strength* du MEA<sup>737</sup>, une hypothèse **d'accroissement**

<sup>735</sup> en référence au scénario médian des projections de l'ONU (ONU, 2006).

<sup>736</sup> UNEP 2008. <http://unep.org/.../2008/AnnualReport2008>.

<sup>737</sup> Le scénario tendanciel de l'ETP 2008 de l'AIE projette un triplement du nombre de véhicules individuels à l'horizon 2050 (AIE 2008).

**démographique plus rapide a été considérée** (9,5 milliards en 2050) liée à une transition démographique beaucoup plus lente dans un certain nombre de pays, résultant notamment d'un faible développement économique. Cette évolution va ici de pair avec **un exode massif vers les villes et se traduit par une urbanisation non maîtrisée**, un fort étalement urbain et une ghettoïisation accrue des populations pauvres.

Un troisième axe a été discuté, celui portant sur l'évolution des modes de vie et de consommation, étroitement associé à celui sur l'évolution du contexte économique et sociétal.

(1) L'éventualité de **l'adoption par une part importante de la population mondiale de modes de consommation comparables à celles des sociétés occidentales actuelles** a tout d'abord été envisagée. Une telle perspective traduite sur le plan énergétique conduit à une augmentation considérable (voire un doublement à 2050) de la consommation énergétique, comme le laissent suggérer les projections tendanciennes de l'AIE (WEO 2008), avec en particulier une explosion de la demande dans les transports<sup>738</sup>. Côté consommation alimentaire peuvent être envisagées une « occidentalisation » des pratiques et des filières alimentaires et l'adoption de régimes alimentaires plus carnés, évolutions qui peuvent être associées à une hausse des revenus et/ou un mode de vie plus urbain. Ces évolutions vont de pair, selon cette hypothèse, avec la poursuite de la tendance globale à l'industrialisation et à la concentration des filières agro-alimentaires, associées à des modes de distribution et de consommation générateurs de pertes, aussi bien chez les usagers que dans les systèmes de restauration ou plus en amont.

(2) A l'opposé, une rupture pourrait être envisagée dans les pays du Nord, avec **l'adoption de modèles de consommation plus sobres**. Sous-tendus par des préoccupations environnementales et sanitaires, des transformations dans les pratiques de consommation énergétique, associées plus largement à des mutations sectorielles profondes, peuvent contribuer à infléchir significativement la tendance à l'explosion de la demande énergétique. Cette hypothèse peut concerner également le domaine de l'alimentation, avec l'adoption de régimes et de comportements alimentaires moins utilisateurs de denrées et moins générateurs de pertes, guidée en premier lieu par des préoccupations d'ordre nutritionnel et sanitaire, et par une prise en compte globale des effets environnementaux des systèmes alimentaires. L'hypothèse, dans les pays en développement et émergents, d'une amélioration des régimes alimentaires sans pour autant qu'il y ait convergence vers des modes occidentalisés, mais un **maintien d'une diversité** dans la composition des régimes alimentaires a également été retenue, associé à une diversité de systèmes alimentaires.

---

<sup>738</sup> Le scénario tendanciel de l'ETP 2008 de l'AIE projette un triplement du nombre de véhicules individuels à l'horizon 2050 (AIE 2008).

## Synthèse des hypothèses et microscénarios

Tableau 65 : composante 5 : Croissance et développement

Variables	Hypothèses d'évolution à 2050			
	Contexte économique et géopolitique	Libéralisation commerce mondial	Coopération autour de l'émergence d'une économie verte	Coopération et renforcement échelon territorial
Démographie et urbanisation	Croissance moyenne, urbanisation forte	Croissance moyenne, stabilisation des flux villes/campagne et développement rural		Croissance démographique forte, exode rural massif
Modes de consommation	Extension des modèles occidentaux de consommation	Transformation des modes de consommation au Nord, sobriété – maintien de diversité		Inégalités, dualisme métropoles/arrières pays
	▼	▼	▼	▼
Microscénarios	Mondialisation libérale et occidentalisation	Mondialisation des technologies vertes	Mondialisation des territoires	Régionalisation de crise

### 2.5.7.2. Les quatre scénarios d'évolution possible des usages non alimentaires de la biomasse végétale à l'horizon 2050

#### 2.1.5.7.2.1. Les hypothèses par composante

De l'examen des tendances, des controverses et des enjeux de long terme dans lesquels s'insèrent les usages non alimentaires de la biomasse, a découlé la définition d'un cadre d'analyse pour la construction de scénarios contrastés. Le système « biomasse non alimentaire » a été structuré en 5 composantes.

Pour chacune des variables de ces cinq composantes, des différentes hypothèses d'évolution à l'horizon 2050 ont été définies. La combinaison de ces hypothèses par variable donne lieu à des scénarios d'évolution par composante, appelés microscénarios. C'est la combinaison, *in fine*, de ces microscénarios qui est à la base des quatre scénarios d'évolution des usages non alimentaires de la biomasse végétale à l'horizon 2050. L'annexe 2 restitue en détail les hypothèses formulées pour ces différentes variables et composantes. Le tableau 66 suivant résume les microscénarios et leur combinaison par scénario :

Tableau 66 : Synthèse des microscénarios et scénarios VegA

Composantes	Hypothèses d'évolution à 2050			
<b>1 - Croissance et développement économique</b>	Mondialisation libérale et généralisation du mode de consommation « occidental »	Mondialisation des territoires connectés	Mondialisation des technologies « vertes »	Régionalisation de crise
<b>2 - Ressources énergétiques et en carbone</b>	Rupture dans le modèle énergétique - de fortes innovations sectorielles	Diversité de sources d'énergie et essor des énergies renouvelables - adaptabilité des systèmes énergétiques	Priorité à la sécurité énergétique : consommer moins, sécuriser l'approvisionnement	Un système énergétique qui reste basé sur le carbone fossile, des innovations incrémentales
<b>3 - Attentes des citoyens et des consommateurs</b>	Une préoccupation civique pour les enjeux environnementaux, et une gestion technocratique à expertise multiple	Des attentes sociétales principalement déléguées au marché et différenciées	Un engagement faible des citoyens et une délégation de la gestion de l'innovation à l'Etat	Un engagement participatif des individus, sur la base d'une diversité de réseaux, notamment territoriaux
<b>4 - Filières produit biosourcés et innovations technologiques</b>	La biomasse comme matière première complémentaire des ressources fossiles	Des innovations de rupture dans l'usage de la biomasse pour la chimie et l'électricité	Substitution partielle du carbone fossile - Des trajectoires différenciées selon l'accès à la biomasse dans les grandes régions du monde	Valorisation de la biomasse du territoire et usages localisés et diversifiés (énergie, chimie)
<b>5 - Gouvernance et politiques publiques</b>	Laisser-faire, peu de régulations internationales et privatisation de la connaissance	Accords internationaux sur changement climatique et politiques publiques motrices dans les mutations sectorielles. Système DPI équilibré	Sécurité énergétique des Etats, échanges internationaux et standards environnementaux a minima. Accords bilatéraux sur la PI.	Des politiques territoriales tournées vers une gestion durable, soutenues par des accords internationaux et des politiques nationales. Innovation ouverte.

Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
------------	------------	------------	------------

### 2.2.5.7.2.2. Récit des scénarios d'évolution des usages non alimentaires de la biomasse à 2050

#### 5.7.2.2.1. Scénario 1 : fuite en avant sur l'énergie et l'environnement, des usages de la biomasse limités

En 2050, les usages de la biomasse pour l'énergie et la chimie connaissent un développement limité. Dans un contexte de poursuite des trajectoires énergétiques fondées sur l'énergie fossile (charbon) et en l'absence de politiques publiques, le développement des filières biomasse a été contraint par la faible innovation et la concurrence avec les produits issus du carbone fossile. De surcroît, l'augmentation de la demande alimentaire mondiale, consécutive d'une adoption large de modes de consommation occidentaux, a produit des tensions sur l'offre en produits agricoles. Dans le domaine du transport, les agroc carburants compétitifs se développent et sont incorporés aux carburants classiques en fonction des prix des énergies fossiles. Là où la biomasse est facilement mobilisable, à bas coûts, elle est employée en co-combustion dans les centrales thermiques. De plus, s'appuyant sur une

différenciation des attentes des consommateurs, les marchés de niche se sont développés pour les biomolécules sur la base de labels environnementaux et sanitaires.

### ***Mondialisation économique, inégalités et tensions sur les ressources naturelles et l'alimentation***

En 2050, le monde se caractérise par une libéralisation économique poussée des marchés, avec un développement du commerce international et une croissance mondiale élevée tirée par les pays émergents (Chine, Inde, Brésil). Pour l'énergie, l'alimentation et l'environnement, la tendance dans ce scénario est au laisser-faire, sans rupture technologique et institutionnelle face à ces enjeux. Les politiques publiques des Etats et les régulations internationales sont limitées y compris dans le secteur agricole et en ce qui concerne le changement climatique et l'environnement. Associée à une croissance économique mondiale forte, l'élévation des revenus d'une partie de la population dans les pays en développement s'est traduite par une diffusion du mode de vie occidental, mais aussi par un accroissement des inégalités sociales. Dans le domaine de l'alimentation, les changements de pratiques alimentaires (notamment dans les pays émergents, avec un accroissement de la consommation de viandes et de produits laitiers) a conduit à une augmentation de la demande alimentaire globale. Elle s'est traduite par une demande accrue de foncier pour l'agriculture et l'élevage, une intensification des systèmes de production et une hausse des prix des biens alimentaires et de leur volatilité. En l'absence de régulation, cette situation provoque des crises alimentaires récurrentes dans les pays du sud.

### ***Un système énergétique mondial qui reste fondé sur les énergies fossiles et marqué par un retour en force du charbon***

Conformément à l'évolution des modes de vie et au développement économique, la demande énergétique mondiale a explosé (multipliée par deux en 40 ans) bien que certains pays en voie de développement continuent de connaître une forte précarité énergétique. En l'absence d'innovations radicales dans les usages et les technologies, les trajectoires technologiques restent fondées sur les ressources fossiles, y compris dans le secteur des transports, grâce à un usage étendu du charbon (technologies « coal-to-liquid »), et des investissements massifs sur la prospection gazière et pétrolière. Ainsi, jusqu'en 2050, le prix des énergies fossiles n'a augmenté que graduellement. En l'absence de politiques énergétiques publiques, l'évolution des systèmes énergétiques a été déléguée aux acteurs des marchés de l'énergie. Des actions sur l'efficacité énergétique, ont légèrement contenu l'explosion de la demande. Les énergies alternatives aux énergies fossiles ne se sont que modestement développées. Face à une pénurie annoncée des ressources, le monde est peu préparé à une transition majeure.

### ***Une biomasse énergétique en complément des matières fossiles***

La biomasse est mobilisée en fonction de sa compétitivité sur les marchés. Dans le domaine des transports, la biomasse est mobilisée de façon limitée, selon son coût et en complémentarité avec les matières fossiles. En effet, dans un contexte de libéralisation économique accrue, les Etats du Nord comme du Sud ont peu à peu abandonné les politiques publiques de soutien aux filières biocarburants, jugées à l'époque chères, distorsives, et peu efficaces par rapport à leurs objectifs environnementaux et sociaux. De ce fait, les biocarburants ne sont restés présents que dans les pays et pour les filières où ils sont compétitifs, et ce d'autant que les prix agricoles sont élevés et volatiles. Ces productions sont développées dans le cadre d'alliances entre grands groupes agroindustriels, valorisant leur savoir-faire logistique et leur maîtrise des filières agroindustrielles, industriels pétroliers, soucieux entre autres de s'investir plus en amont pour consolider leurs approvisionnements, et investisseurs issus du secteur financier (banques, fond d'investissement, etc.) s'inscrivant dans un mouvement de financiarisation du

secteur de la production agricole. Il en résulte des filières biocarburants intégrées verticalement, basées sur de grands complexes industriels de production de biomasse, en relation avec des bioraffineries. Les filières basées sur la canne à sucre et l'huile de palme dominent durablement les marchés mondiaux des biocarburants. L'innovation a été principalement incrémentale, et, en l'absence de soutien public, les biocarburants lignocellulosiques ont émergé très tardivement et de façon marginale.

La biomasse est également utilisée pour la production de chaleur et d'électricité à l'échelle industrielle, en co-combustion dans les centrales thermiques, ou en cogénération dans les usines. Les producteurs d'énergie et les industriels y ont recours lorsqu'ils ont accès à une biomasse bon marché sur les marchés domestiques ou internationaux. Par ailleurs, l'usage « traditionnel » de la biomasse est resté très présent dans les zones rurales du Sud, avec des impacts sur l'environnement de plus en plus sévères et un accès à l'énergie très fragilisé pour une part croissante de la population.

Des usages de la biomasse pour la chimie se sont développés sur certains segments de marché. Dans un contexte plutôt dominé par une consommation de masse et low-cost, une certaine segmentation perdure, répondant à des demandes différenciées des consommateurs. Ainsi les populations ayant un niveau élevé de revenus font valoir des exigences de durabilité des produits. Bien qu'ayant un poids secondaire sur les marchés, ces consommateurs sont moteurs de l'émergence de produits biosourcés, valorisés pour leurs propriétés environnementales et sanitaires (biodégradabilité, recyclabilité, moindre toxicité, etc.) ; une multitude de labels privés ont vu le jour, aux référentiels disparates et portés notamment par les grands distributeurs.

La production mondiale de biomasse non alimentaire est concentrée géographiquement dans de grands pays producteurs qui ont développé une économie de rente sur ce type de filière, valorisant des conditions agro-climatiques et économiques favorables (coût de la main d'œuvre, du foncier). Des bioraffineries transforment la biomasse et livrent une variété de produits biosourcés. Elles se situent soit sur des sites industriels installés près des bassins de production agricoles ou forestiers, soit proche des sites portuaires, industriels ou des nœuds logistiques dans les pays importateurs. Elles s'approvisionnent sur les marchés internationaux en biomasse pré-transformée et répondant à des standards minimaux de commercialisation.

### ***Recherche et innovation : une technoscience orientée par les marchés***

La R&D est surtout portée par de grands groupes privés. La recherche s'est fortement orientée vers le développement d'innovations à caractère industriel ou marchand, et est de plus en plus soumise à une logique de « retour sur investissement », dans un contexte d'intense compétition internationale et d'accélération de la propriété intellectuelle. L'expertise de macro-acteurs tels que de grandes firmes, des agences internationales, de grandes ONG internationales et des Etats domine les débats, et les citoyens ont relativement peu de prises sur les orientations sociotechniques. Dans le secteur de la valorisation de la biomasse, ce contexte d'innovation, associé à l'absence de soutiens publics spécifiques, a été peu favorable à l'implication de nouveaux acteurs, et a entraîné des effets de lock-in sur les trajectoires technologiques, et n'a pas permis l'émergence d'innovations de rupture.

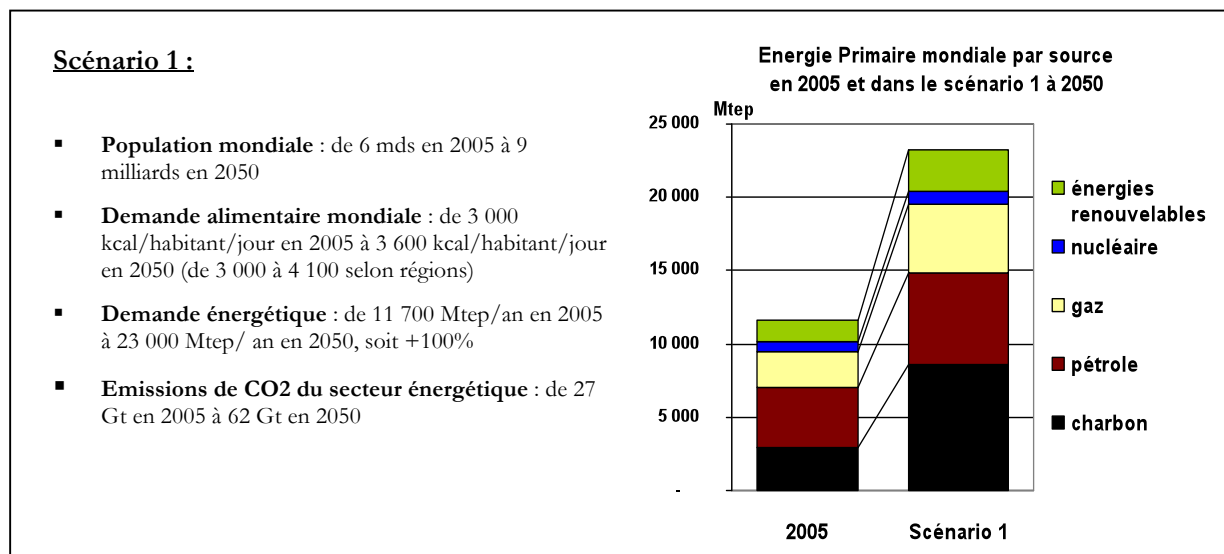


Figure 36 : Scénario 1

#### 5.7.2.2.2. Scénario 2 : la biomasse dans la « néo-modernisation verte »

En 2050, les usages non alimentaires de la biomasse s'inscrivent dans un mouvement de modernisation écologique des secteurs d'activités qui vise une sortie des énergies fossiles et une limitation des émissions de GES, dans le cadre d'un développement durable. Des politiques environnementales volontaristes et le repositionnement des grands acteurs industriels ont favorisé l'émergence d'une chimie du végétal qui en 2050 s'est substituée à une part importante de la pétrochimie classique. L'usage de la biomasse pour l'électricité et la chaleur s'est développé, associé à une transition globale du système énergétique. En revanche, la biomasse est peu mobilisée dans les transports, la logique dominante étant la substitution totale des vecteurs carbonés dans les transports (principalement par l'hydrogène).

#### **Une mondialisation des technologies « vertes »**

En 2050, une reconfiguration profonde des secteurs de production s'est opérée, par le biais de politiques industrielles et de systèmes de normalisation exigeants. Les Etats ont en effet mis en œuvre des politiques publiques nationales et internationales ambitieuses en faveur d'une économie faible en carbone, avec des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, et une gestion proactive des enjeux environnementaux. L'innovation et le développement de technologies nouvelles et propres sont devenus moteurs d'une croissance économique mondiale soutenue. L'engagement civique des citoyens, qui délèguent le traitement des enjeux du développement durable aux Etats, se traduit dans les modes de consommation. La demande alimentaire mondiale s'est modérément accrue du fait d'un rééquilibrage des systèmes alimentaires.

#### **Vers un système énergétique à faible émission de CO<sub>2</sub>**

Le secteur de l'énergie a fait l'objet de politiques particulièrement ambitieuses, en faveur d'une sortie des énergies fossiles. La hausse de la demande énergétique, liée à la croissance économique et à l'évolution démographique, a été limitée grâce à des mesures fortes sur l'efficacité énergétique et grâce à l'évolution progressive des usages. Des objectifs contraignants de substitution au carbone fossile et de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ont été fixés. Les énergies fossiles représentent encore en 2050 près de la moitié des ressources énergétiques (contre 80 % au début du siècle), mais l'appui à

l'innovation et au développement de nouvelles filières a accéléré la substitution par des énergies alternatives, notamment le nucléaire et les énergies renouvelables. Dans les transports individuels, l'hydrogène s'est imposé comme vecteur énergétique dominant, adaptés à tous types de déplacements ; sous l'effet de politiques publiques volontaristes et d'efforts de R&D, d'importantes avancées technologiques ont permis cette évolution. En 2050, la transition est relativement avancée : l'hydrogène représente 20 à 25 % des usages énergétiques dans les transports, et la plupart des nouveaux véhicules construits fonctionnent à l'hydrogène. Ces évolutions ont étroitement associé les constructeurs automobiles, ainsi que tous les acteurs de la production et de la distribution de l'énergie, qui se sont repositionnés. En 2050, les vecteurs carbonés sont encore présents, notamment dans les secteurs où les technologies à hydrogène n'ont pas encore été mises au point (aériens, fret maritime et terrestre). L'électricité reste présente dans les transports collectifs urbains et sur rail.

### ***La biomasse, source renouvelable d'énergie et de matières premières...***

Dans ce contexte, la biomasse est apparue comme une source renouvelable d'énergie et de matière carbonée particulièrement intéressante car capable, dans des conditions de production et de valorisation bien définies, de répondre aux objectifs environnementaux (réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de l'impact des produits sur l'environnement).

La biomasse est assez peu mobilisée dans le domaine des transports : la logique dominante étant la substitution totale des vecteurs carbonés dans les transports (hydrogène, électricité), les efforts de R&D et les investissements se sont concentrés sur d'autres innovations et filières.

Dans le secteur de la chimie, les fortes exigences réglementaires sur l'impact environnemental et sanitaire des produits ont favorisé l'émergence d'une chimie du végétal qui valorise les propriétés des matières issues du végétal : recyclabilité, biodégradabilité, faible toxicité, etc. De ce fait, la chimie du carbone renouvelable se substitue en 2050 à une part importante de la pétrochimie classique. Des bioraffineries, qui sont le résultat d'alliances entre agroindustriels et industriels de la chimie, sont installées sur les sites traditionnels de la chimie lourde. Les filières de l'industrie chimique sont profondément réorganisées autour de cette nouvelle matière première, notamment les filières aval qui doivent s'adapter aux caractéristiques différentes des produits issus de la biomasse (moindre stabilité, variabilité des produits).

Stimulé par des politiques publiques incitatives, l'usage énergétique de la biomasse s'est surtout développé pour la production d'électricité et de chaleur, dans le cadre de systèmes à haute efficacité énergétique (innovations dans les systèmes de cogénération, production de biogaz et de bioélectricité reliée aux réseaux de distribution), associés à une amélioration des performances énergétiques des bâtiments et, dans le secteur industriel, de l'application des principes de l'écologie industrielle.

Les pays du Sud, pour lesquels l'usage « traditionnel » de la biomasse est un enjeu énergétique central, ont mis l'accent sur l'amélioration et la diffusion de foyers individuels et d'infrastructures collectives performants, voire ont mis en œuvre sa substitution par d'autres sources et vecteurs énergétiques, dans les grandes agglomérations notamment. Un axe fort d'innovation a concerné les modes de gestion des prélèvements de la biomasse pour lutter contre la déforestation. La coopération économique internationale entre les pays du Nord et du Sud a conditionné ces évolutions.

### ***... mais soumise à des critères stricts de durabilité environnementale et sociale***

La production, la transformation, et le commerce des produits biosourcés sont soumis à des normes strictes (de type ISO) sur les émissions de GES, les bilans énergétiques, et les impacts sur les



ressources naturelles. Un système de certification international, basé sur des ACV et avec des standards élevés de durabilité, a vu le jour et structure le commerce international des produits biosourcés. Les règles du commerce international autorisent à présent les restrictions commerciales fondées sur des critères de durabilité environnementale et sociale.

Par ailleurs, une régulation des marchés agricoles s'est mise en place, pour éviter les tensions avec l'alimentation, limiter les effets du développement du commerce international des produits biosourcés sur l'environnement (forêts, biodiversité, ressources naturelles) et favoriser le développement agricole et rural. Les transactions foncières internationales sont contrôlées, le droit international ayant été renforcé en la matière.

### ***Des « Etats modernisateurs », en étroite coopération avec les grands acteurs industriels***

Toutes ces évolutions, qui vont dans le sens d'une modernisation écologique impulsée par les Etats, ont été réalisées en étroite collaboration avec les acteurs économiques majeurs. L'effort d'innovation s'est concentré sur la mise au point d'une trajectoire technologique dominante par secteur d'activité. Des accords internationaux se sont multipliés, mettant notamment en œuvre une forte coopération Nord-Sud, ainsi que des partenariats pour faciliter les transferts des technologies et le développement d'une économie « verte ». Par ailleurs, le système de droit de propriété intellectuelle s'est rééquilibré en faveur d'une science plus ouverte et des accords multilatéraux ont été conclus, visant à promouvoir le recours aux licences, à éviter les trop larges exclusivités et à limiter les coûts d'innovation. Dans les filières de valorisation de la biomasse, l'innovation est essentiellement portée par des macroacteurs, grands groupes de l'énergie, de la chimie, de l'agro-industrie et industries forestières et papetières, qui cofinancent des start-up et développent des filiales dans ces nouveaux secteurs. Ces macroacteurs conquièrent massivement les nouveaux marchés que constituent les pays en développement. Cependant, ils se heurtent aux limites de la transposition de modèles industriels conçus au Nord (investissements lourds, haute technologie) qui s'avèrent parfois peu adaptés aux problématiques des pays concernés.

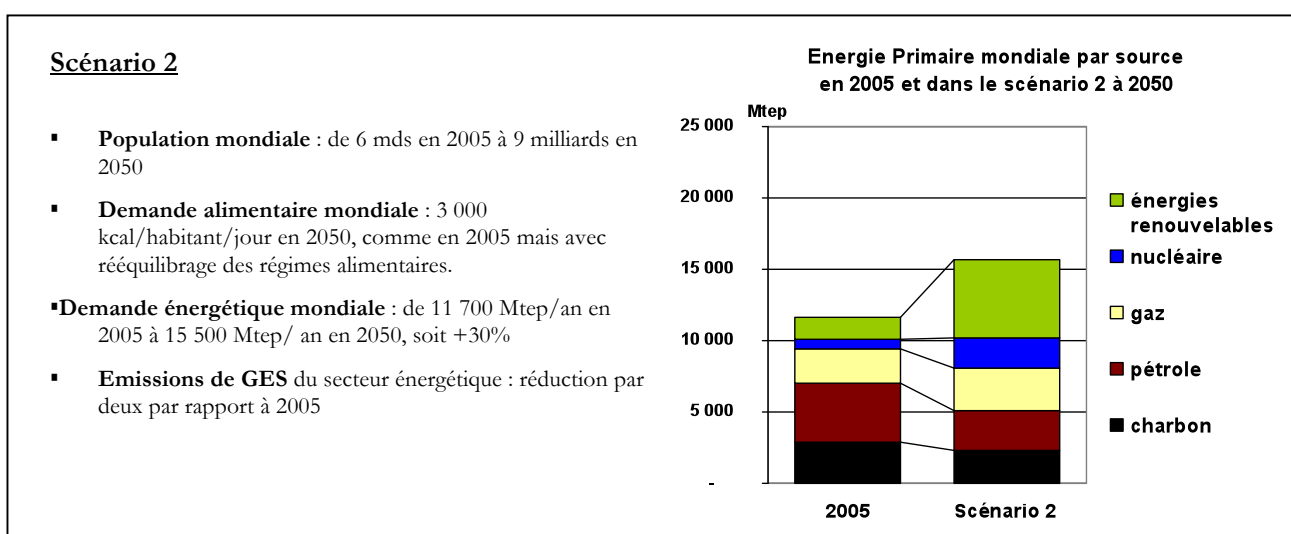


Figure 37 : scénario 2

### **5.7.2.2.3. Scénario 3 : course à la biomasse, dans un contexte de crise énergétique**

Dans un contexte de fortes tensions géopolitiques autour de l'énergie, les Etats ont développé des politiques de sécurisation de leur approvisionnement énergétique. En 2050, la biomasse est massivement mobilisée pour réduire la dépendance aux énergies fossiles, à la fois dans le domaine des transports et dans la production de chaleur et d'électricité. Les pays structurent des filières adaptées à la nature des ressources en biomasse dont ils disposent, mais aussi à celles qu'ils peuvent importer. Les échanges internationaux de biomasse se développent fortement, dans des cadres bilatéraux surtout, et l'ampleur des pressions exercées sur les ressources menace très sévèrement la sécurité alimentaire et les écosystèmes.

#### ***Un monde fragmenté et en crise...***

En 2050, le repli national domine dans un monde fragmenté, hétérogène, qui a été marqué durant la première moitié du siècle par une série de crises économiques et géopolitiques. Les Etats, avant tout préoccupés du maintien de leur sécurité et de l'accès aux ressources, coopèrent peu entre eux si ce n'est dans le cadre de relations bilatérales. En particulier, aucun accord international multilatéral ni sur les grands enjeux globaux ni sur le commerce international n'a vu le jour. Dans un contexte de crise économique, le développement agricole et rural a peu bénéficié d'investissements. Les fortes inégalités, l'exode rural et la fragilité des systèmes alimentaires dans un grand nombre de pays se traduisent par d'importants problèmes d'accès à l'alimentation pour les populations pauvres, aussi bien urbaines que rurales.

#### ***... où la sécurité des approvisionnements énergétiques est devenue prioritaire***

Les fortes fluctuations du prix du pétrole, et le contexte géopolitique tendu autour des ressources pétrolières ont conduit les Etats à rechercher la sécurité énergétique, en diversifiant les sources, en sécurisant leurs approvisionnements et en limitant la consommation. La priorité est donnée à l'exploitation des ressources énergétiques nationales et à l'économie d'énergie dans tous les secteurs. Mais les énergies fossiles restent dominantes dans les mix énergétiques (plus de 80 % de l'énergie primaire). Les crises économiques et géopolitiques ont limité les capacités d'innovation et d'investissement pour développer des technologies et des filières nouvelles, malgré un prix de l'énergie devenu très élevé. Le charbon, plus abondant et plus distribué géographiquement, devient particulièrement central (près d'un tiers de l'énergie primaire), avec le développement des technologies « coal to liquid ». Restant très dépendants des énergies fossiles, particulièrement dans le domaine des transports, les Etats s'assurent la stabilité des approvisionnements dans le cadre d'accords bilatéraux, qui structurent les stratégies énergétiques.

#### ***La biomasse, une ressource mobilisée dans des filières industrielles variées, pour limiter la dépendance au pétrole***

La biomasse constitue une ressource en carbone importante qui permet de limiter la dépendance aux produits fossiles et de sécuriser les approvisionnements énergétiques. Elle est utilisée sous la forme de biocarburants dans les transports mais aussi pour la production de chaleur et d'électricité (co-combustion dans les centrales thermiques à charbon ou à gaz). Les Etats valorisent la biomasse disponible sur leurs territoires ou en importent, soit pour compléter leur propre production, soit s'ils en ont les moyens, pour ne pas mettre en péril leur souveraineté alimentaire.

Différentes filières de biocarburants et différents types de bioraffineries se sont développés selon les régions du monde : les filières et les procédés s'adaptent à la biomasse disponible (agricole, forestière, algale, oléagineuse, lignocellulosique, etc.), ce qui se traduit, en termes de technologies mobilisées, par une grande hétérogénéité entre pays. Le développement de ces filières a été fortement appuyé par les Etats (objectifs contraignants d'incorporation de produit biosourcés, aides directes aux filières, exonération de taxes), en lien avec les producteurs et premiers transformateurs de biomasse (agro-industrie, foresterie et industriels du bois) et les acteurs de l'énergie qui se repositionnent sur ces filières.

Les usages de la biomasse dans la chimie se sont relativement peu développés. Dans un contexte de marché dominé par le low-cost, les produits biosourcés n'ont pas de place spécifique, si ce n'est sur des segments très particuliers (produits pharmaceutiques par exemple). Il s'agit surtout de valoriser les sous-produits de la bioénergie, et de les intégrer dans les filières chimiques classiques.

### ***Une course à la biomasse qui menace la sécurité alimentaire, l'environnement et le développement rural***

En l'absence de réelle alternative aux énergies fossiles, la course à la ressource énergétique s'est entre autres manifestée par une course à la production de biomasse. Elle est exploitée dans de nombreuses régions du monde, souvent au détriment de l'environnement, et dans certains cas extrêmes de façon minière. De grandes structures industrielles produisent la biomasse et alimentent la consommation domestique et les échanges internationaux. Certaines régions structurellement déficitaires en produits agricoles, alimentaires et/ou non-alimentaires ont recours à l'importation ; d'autres ont au contraire développé une économie de rente, notamment dans les pays où les réserves foncières étaient importantes. En 40 ans, une profonde recomposition de la géographie des productions agricoles alimentaires et non-alimentaires s'est opérée au niveau mondial.

Des logiques contractuelles entre opérateurs privés ou entre Etats se mettent en place et les marchés internationaux de produits biosourcés sont dominés par des macroacteurs privés. Dans le cadre d'échanges bilatéraux entre Etats, les échanges Nord-Sud sont particulièrement intenses, tout comme les transactions foncières à grande échelle. Ces transactions organisent la cession de terres à de grandes compagnies sur la base de droits fonciers à plus ou moins long terme, et le plus souvent sans contrôle des impacts environnementaux ni prise en compte des droits des populations locales. Dans ces pays, les tensions avec la production alimentaire sont de plus en plus fortes.

### ***Des innovations au service de filières industrielles de masse, sous l'égide des Etats et des grandes compagnies***

Dans le domaine de la recherche et de l'innovation, ce sont les Etats qui sont moteurs : ils financent la recherche et le développement de nouvelles technologies afin de mettre en place de nouvelles filières industrielles de masse. Pour cela ils ont développé des coopérations étroites avec de grandes entreprises privées : les laboratoires publics et privés interviennent en amont dans la recherche fondamentale, tandis que les applications technologiques sont développées directement par de grandes entreprises.

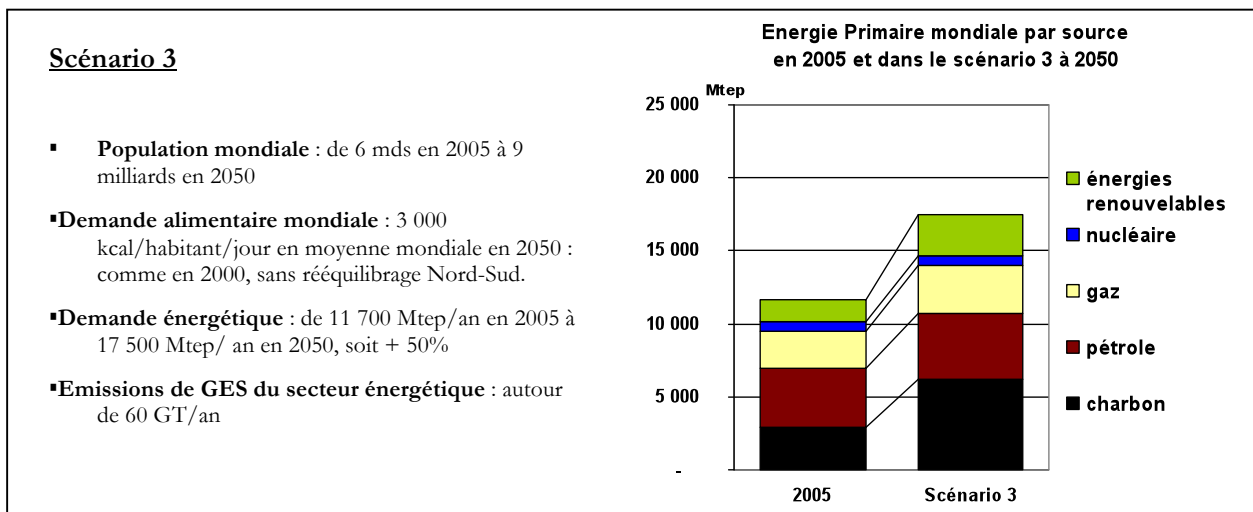


Figure 38 : scénario 3

#### 5.7.2.2.4. Scénario 4 : des territoires métropolitains et ruraux qui mobilisent la biomasse pour une diversité d'usages

En 2050, la biomasse est utilisée localement pour une diversité d'usages non alimentaires. Dans un contexte de poursuite de la mondialisation et de renforcement des dynamiques territoriales, ces usages s'inscrivent dans une logique de développement durable portée par les métropoles et les territoires ruraux. Ces derniers ont entrepris d'accroître l'adaptabilité et la robustesse des systèmes énergétiques et alimentaires locaux. Ainsi, selon les régions, la biomasse est tantôt mobilisée dans les transports, dans la production d'électricité, de gaz, de chaleur ou encore comme source de biomolécules. Et ce en fonction de la qualité de la ressource mobilisable, dans le cadre d'une gestion durable, et en s'appuyant sur les compétences des acteurs du territoire. Les filières se sont mises en place en jouant des complémentarités avec les autres filières, en limitant les concurrences avec les autres usages de la biomasse, tout en répondant à des objectifs de développement territorial.

#### **Une mondialisation des territoires connectés**

En 2050, la mondialisation est portée par de grands ensembles régionaux composés de métropoles, de villes moyennes et de territoires ruraux. Dans divers secteurs de l'économie, une certaine relocalisation s'est opérée en même temps que la circulation mondiale des informations, des individus et des savoirs s'est accélérée. Une diversité de formes institutionnelles et de systèmes de gouvernance se sont constitués à différentes échelles (aires métropolitaines, régions de type Lander, etc.) en associant acteurs privés et publics, afin de maîtriser le développement et l'aménagement du territoire. Cette gouvernance vise à renforcer l'adaptabilité et la robustesse des systèmes énergétiques et alimentaires, afin qu'ils répondent aux enjeux environnementaux, d'emploi et de cadre de vie. Au niveau international, une forte coopération pour la lutte contre le changement climatique et la préservation des écosystèmes globaux s'est mise en place, avec une action concentrée sur les territoires et différenciée selon les enjeux locaux.

De plus, les préoccupations de la société vis-à-vis du développement durable se sont traduites par un engagement multiple des individus en tant qu'acteurs du territoire et usagers de produits biosourcés. En cohérence avec les valeurs de protection de l'environnement, les modes de consommation des individus ont évolué vers davantage de sobriété. Les pratiques alimentaires au Nord sont globalement

moins consommatrices, tandis que les régimes alimentaires se sont améliorés dans le Sud, grâce à une amélioration des revenus liée au développement rural.

### ***Des systèmes énergétiques territorialisés, diversifiés, et orientés vers l'efficacité énergétique***

Les systèmes énergétiques ont connu une profonde réorganisation : un développement décentralisé de la production s'est réalisé répondant aux usages de l'énergie sur le territoire. Les collectivités territoriales ont mis en place des politiques visant à améliorer l'autonomie énergétique, qui privilégient le développement des énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique. Si en 2050 une part importante de la production est encore concentrée, et si les énergies fossiles restent très présentes dans le système énergétique mondial, une diversité de solutions a vu le jour dans les territoires, solutions techniques mais aussi d'ordre organisationnel. Dans le domaine des transports en particulier, la réorganisation spatiale des infrastructures, des échanges et des déplacements et l'aménagement du territoire ont eu une grande part dans la diminution des besoins en énergie. De nouvelles combinaisons modales ont été mises en œuvre et divers vecteurs énergétiques sont mobilisés en fonction des usages : l'énergie électrique s'est imposée dans les villes, moins polluante pour l'air, tandis que les transports individuels de longue distance continuent d'utiliser les carburants fossiles et les biocarburants, de même que les secteurs aériens et maritimes.

### ***Une contribution forte de la biomasse au développement énergétique et économique des territoires***

Dans ce contexte, une diversité de filières mobilisant la biomasse sont valorisées car elles participent à la robustesse des systèmes en termes d'approvisionnement (énergétique, en carbone renouvelable, en matériaux). Le caractère distribué de cette ressource permet à un grand nombre de territoires de la mobiliser pour divers usages. Ceux-ci varient en fonction de la quantité et la qualité des ressources accessibles (produits et sous-produits agricoles et forestiers, déchets urbains, industriels ; selon les situations locales), des capacités d'investissement, des compétences et des technologies qui ont pu être développées dans les territoires, et dans les limites d'une gestion durable et génératrice d'emplois à l'échelle des territoires. Une grande diversité de ressources en biomasse est produite ou récupérée.

Les usages de la biomasse pour l'électricité et la chaleur ont connu le développement le plus important : unités de cogénération à petite échelle ou centrales thermiques qui approvisionnent des infrastructures collectives et industrielles, voire individuelles (groupes électrogènes dans les pays du Sud notamment). Le biogaz (méthanisation à partir d'algues, de résidus de cultures, de déchets,...) s'est également développé. Dans le domaine des transports, les biocarburants peuvent compléter ou remplacer, en fonction des ressources locales, les carburants fossiles pour les transports de moyenne et longue distances (par exemple, des régions ont une flotte de véhicules roulant à l'éthanol pour leur service de bus régional). Les constructeurs de véhicules se sont adaptés et ont mis au point des moteurs robustes pouvant fonctionner avec une diversité de mélanges de carburants. Des chaînes d'approvisionnement locales se développent. D'autre part, des filières « chimie verte » se sont mises en place sur certains segments, sans passer par la production d'intermédiaires chimiques standards. De petites unités, fondées sur un lien fort entre producteurs de biomasse et entreprises, développent des produits spécifiques (bioplastiques par exemple).

Les technologies développées correspondent surtout à des systèmes de transformation de pointe, « légers » en tonnage et en investissement, mais efficaces énergétiquement (ex : développement d'unités de gazéification à petite échelle, couplée à de la cogénération, développement de biodigesteurs, etc.). Quant aux producteurs de biomasse, il n'est pas rare qu'ils associent cette activité à la production de services environnementaux, qui assure en partie la rentabilité de l'activité.

### Une variété de trajectoires d'innovations, en expérimentation collective

L'innovation a été à la fois technologique (transformation de la biomasse, motorisation, nouveaux mélanges de carburants, etc.), logistique (circuits de distribution) et organisationnelle : gestion des ressources en biomasse, organisation des bassins d'approvisionnement, maîtrise de la cohérence et de la durabilité des nouvelles filières, intégration territoriale dans les stratégies d'aménagement et de développement économique. En particulier, une hybridation entre les filières produits biosourcés et les filières agroalimentaires et forestières s'est faite au niveau des systèmes de culture (mise en place de cultures en dérobée, exploitations de terres marginales et bandes enherbées) et de l'organisation industrielle (valorisation des déchets des IAA, etc.).

Ces évolutions ont impliqué une multiplicité d'acteurs publics et privés : collectivités territoriales, usagers (associations de résidents, de consommateurs, etc.), petites et grandes entreprises, qui collaborent autour d'intérêts multiples (ex : valoriser une ressource, vendre un service, développer un nouvel usage, etc.). Des processus d'expérimentation collective, qui intègrent les savoirs profanes des usagers dans la construction des produits biosourcés, ont été au cœur des innovations, prenant forme dans des réseaux divers et plus ou moins ouverts. Les Etats sont intervenus en appui, en stimulant la circulation des connaissances et des savoir-faire, les échanges d'expériences et les transferts de compétences et de technologies à l'échelle nationale et internationale.

Un rééquilibrage entre savoirs publics et privés a été favorable à ces évolutions, accompagné d'un développement de nouveaux systèmes de gestion de la propriété intellectuelle (systèmes de gestion collective, plate-formes communes de brevets). Une grande diversité de pratiques s'est mise en place, selon les particularités sectorielles ; notamment les nouveaux modes d'innovation en réseau s'en sont trouvés facilités, et cette situation a consolidé les PME et les créateurs d'entreprises innovantes. La recherche publique a développé de nouveaux modes d'intervention, complémentaires des activités scientifiques en « laboratoire », et adaptés à ces nouvelles trajectoires d'innovation.

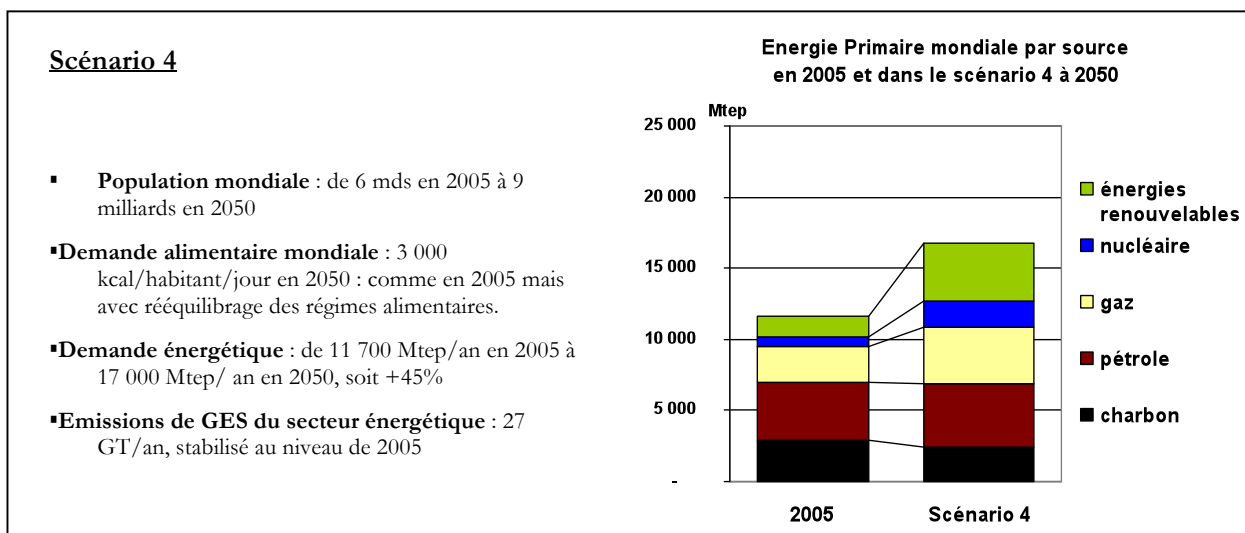


Figure 39 : scénario 4

### 3.5.7.3. Implication des scénarios sur l'occupation du sol

#### 3.4.5.7.3.1. Objectif et démarche

Les 4 scénarios qualitatifs VegA mettent en exergue le fait que les interactions entre usages alimentaires et non alimentaires de la biomasse dépendront avant tout des trajectoires sociotechniques, des dynamiques économiques et des demandes sociétales dans lesquelles s'inscrira l'essor des nouveaux usages et des logiques sectorielles (agriculture, énergie) dans lesquels ils seront intégrés – développement agricole notamment. L'ampleur et le rythme de l'essor de la production n'en demeurent pas moins des facteurs décisifs : ils détermineront dans une large mesure l'ampleur des transformations induites sur l'occupation des sols et l'usage du foncier, le niveau de pression qui s'exercera sur les écosystèmes et les ressources naturelles, ainsi que les conséquences sur les marchés, les économies locales et les territoires.

Ainsi, pour prendre la mesure des transformations associées à ces évolutions, il s'agit d'illustrer les scénarios par des ordres de grandeur. Mais quantifier l'utilisation future de la biomasse n'est pas un exercice aisé. Il existe de nombreuses études et travaux scientifiques qui estiment la quantité de biomasse potentiellement mobilisable pour des usages non alimentaires, à l'échelle mondiale ou régionale. Les résultats obtenus sont extrêmement divers, en fonction des méthodologies employées et des paramètres intégrés à la réflexion. Cette variabilité est notamment due aux hypothèses faites sur deux paramètres très incertains : la disponibilité future en terre d'une part (qui dépend entre autre des hypothèses faites sur les usages alimentaires de la biomasse, et notamment sur les rendements agricoles considérés pour cette production), et les rendements de la biomasse énergétique d'autre part. Le potentiel mobilisable peut ainsi varier d'un facteur 10 d'une étude à l'autre<sup>739, 740</sup>.

Parallèlement, dans les exercices de prospective sur l'énergie, la biomasse apparaît de plus en plus comme une source d'énergie vouée à se développer. L'énergie primaire issue de la biomasse est dans certaines études multipliée par 3 à 4 par rapport aux usages actuels au niveau mondial. Les « nouveaux usages », impliquant de nouvelles technologies (cogénération, co-combustion, BTL, etc.) prennent généralement le pas sur les usages dits « traditionnels » (combustion simple, charbon de bois). Fait marquant, la biomasse se développe systématiquement et même plus abondamment dans les scénarios les plus « verts », ou du moins les plus vertueux du point de vue des émissions de gaz à effet de serre – c'est le cas par exemple dans les scénarios ETP (AIE 2008), ou dans ceux du WETO H2 (CE 2006). La plausibilité d'une telle hypothèse n'est pas sans poser question, comme le soulignent les controverses sur la biomasse.

Le groupe de travail s'est proposé d'explorer cette dimension en confrontant des estimations quantifiées élaborées pour la demande alimentaire et énergétique à 2050. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur deux prospectives de référence, qui ont été présentées précédemment (cf. Partie 5.5.2.3.) : la prospective Inra-Cirad Agrimonde et l'ETP 2008 de l'AIE. L'objectif de cet exercice n'est pas à proprement parler de répondre à la question « *Quelle quantité de biomasse peut-on espérer allouer à des usages non alimentaires ?* », mais de s'appuyer sur des ordres de grandeur pour envisager les conséquences d'un développement des nouveaux usages de la biomasse dans chaque scénario et

---

<sup>739</sup> Hoogwijk et al, 2003

<sup>740</sup> Forchlung et al. 2009

ensuite de revenir sur la cohérence, la plausibilité des scénarios élaborés, pour souligner les tensions consécutives à leur réalisation.

### **3.2.5.7.3.2. Principe, hypothèses et résultat des simulations**

La démarche consiste à :

- (1) considérer les **ordres de grandeur de la demande en bioénergie et biomolécules** rencontrées en prospective énergétique, et à formuler à partir de ces ordres de grandeur des hypothèses sur la demande dans les quatre scénarios VegA ;
- (2) traduire cette demande en surface requise pour la production de biomasse par scénario ;
- (3) confronter ces surfaces avec les projections sur l'occupation des sols rencontrées dans les exercices prospectifs sur l'alimentation.

#### **3.2.4. Les hypothèses sur la demande en biomasse dans les scénarios pour la production d'électricité, les biocarburants et les biomolécules**

Pour formuler des hypothèses sur les besoins en biomasse dans les scénarios VegA, le groupe de travail s'est donc appuyé sur les trois scénarios énergétiques mondiaux de la prospective ETP 2008 de l'AIE décrits plus haut.

#### **Encadré 1 - La biomasse dans les scénarios ETP :**

Les projections de l'ETP sur les mix énergétiques et technologiques sont réalisées selon trois hypothèses d'évolution des émissions de gaz à effet de serre : un scénario de type *business as usual*, un scénario de stabilisation des émissions à 2050, intitulé *Act Map*, et un scénario de division par deux des émissions, dénommés *Blue Map*. La biomasse figure dans ces trois scénarios parmi les sources possibles d'énergie, et des projections sur les utilisations de la biomasse ont été réalisées et ventilées par type d'usage<sup>741</sup>.

L'utilisation de biomasse dans les transports varie d'un scénario à l'autre entre 70 et 600 Mtep environ (20 Mtep en 2005), l'utilisation pour la production de biomolécules entre 0 et 250 Mtep environ, et celle pour les nouveaux modes de production d'électricité et chaleur (hors usages « traditionnels ») de l'ordre de 500 à 800 Mtep selon les scénarios (120 Mtep en 2005)<sup>742</sup>. Fait marquant, ce dernier usage connaît un essor particulièrement marqué, et ce dans les trois scénarios. Enfin, l'usage dit « traditionnel » de la biomasse (environ 900 Mtep en 2005) régresse dans les trois scénarios : il baisse d'un quart environ dans le scénario Baseline, il est divisé par deux dans le scénario Act Map et par trois dans le scénario Blue Map.

<sup>741</sup> Il convient de souligner que dans l'ETP 2008 l'usage de biomasse se développe particulièrement dans les scénarios les plus exigeants en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'AIE a donc implicitement considéré que les nouvelles filières biomasse présentent un bilan GES positif. Aussi, les débats en cours sur le bilan GES de la production de biomasse n'ont donc pas été intégrés à la réflexion, et en particulier les émissions liées aux changements directs et indirects d'affectation des sols. Nous ne retiendrons donc ici que les ordres de grandeur d'utilisation de la biomasse, et prendrons en considération cette dimension dans la suite du raisonnement.

<sup>742</sup> Les projections d'utilisation de la biomasse de l'ETP 2008 ont été observées pour 3 postes : « power generation », « transportation biofuels » et « biofeedstocks ».



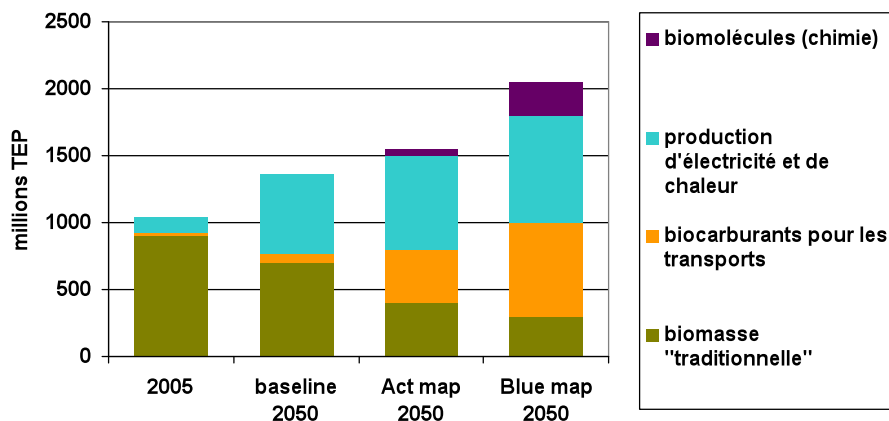


Figure 40 : Utilisation de la biomasse pour les transports, l'électricité et la chaleur, la chimie et les usages 'traditionnels' en 2050 d'après les Scénarios ETP 2008 (source : auteurs, d'après AIE, 2008)

En appliquant les ordres de grandeur relevés dans l'ETP 2008 aux hypothèses retenues dans les scénarios VegA, les besoins en biomasse dans les scénarios ont été définis en rapprochant les scénarios élaborés des scénarios de l'ETP : grossièrement, la quantification du scénario 1 s'inspire du scénario Baseline (*business as usual*) de l'ETP, celle du scénario 2 du scénario Blue Map de l'ETP (sauf pour les biocarburants, qui se développent peu dans le scénario 2 VegA), le scénario 4 s'appuie sur les projections du scénario Act Map de l'ETP ; le scénario 3 est quant à lui un croisement entre Act Map et Baseline.

Quelques points marquants se dégagent de cette construction :

- les **nouveaux usages pour la production d'électricité et de chaleur** se développent dans tous les scénarios (fidèlement aux projections de l'ETP 2008). C'est tout particulièrement le cas dans le scénario 2, qui s'inspire du scénario Blue Map de l'ETP 2008 ;
- les **usages dans le secteur des transports** restent limités dans le scénario 1 (qui a été rapproché du scénario *business as usual* ou Baseline de l'ETP 2008). En revanche, ils se développent de façon importante dans les scénarios 3 et 4 (qui pour cet usage s'inspirent du scénario Act Map de l'ETP 2008) ;
- enfin, l'hypothèse la plus importante sur **l'usage de biomasse dans la chimie** concerne le scénario 2 (hypothèse d'une innovation de rupture dans ce secteur).

Pour les trois usages étudiés (qui ne comprennent pas les usages dits « traditionnels »), on obtient les ordres de grandeur suivants pour les quatre scénarios à l'horizon 2050 :

)

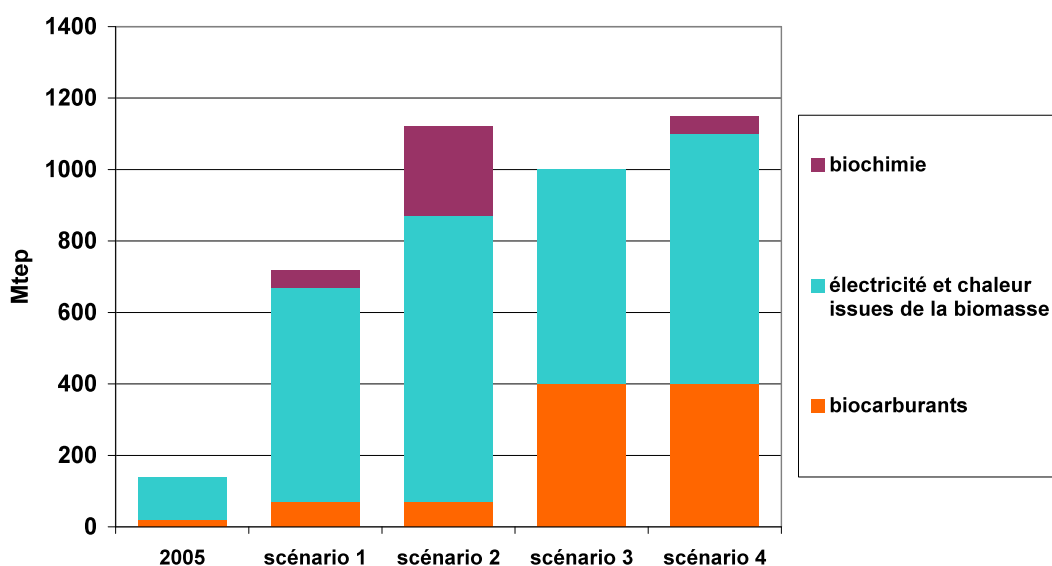


Figure 41 : Utilisations de la biomasse dans les scénarios pour trois usages : production d'électricité, de biocarburants et de biomolécules (en millions de tep)

### 3.2.2. Traduction en surface requise pour la production de biomasse par scénario

(i) Méthode :

Les quantités de biomasse par scénario ont été traduites en surfaces à mobiliser, sur la base d'hypothèses de rendements énergétiques moyens par unité de surface (en tep/ha). **Seuls les usages dans les transports, pour la synthèse de biomolécules et les nouveaux modes de production d'électricité et de chaleur sont pris en compte** dans ces calculs. Les usages « traditionnels » de la biomasse n'ont pas fait l'objet de simulation.

Rappelons-le, l'objet n'est pas ici de réaliser des simulations de nature prédictive sur les futures surfaces dédiées à la biomasse, mais de raisonner de façon très globale et d'obtenir des **ordres de grandeur génériques « témoins »** afin d'examiner la plausibilité des scénarios élaborés.

De ce fait, des hypothèses très schématiques sur le type de biomasse mobilisée et le type de transformation ont été faites pour réaliser les calculs :

- pour les biocarburants, nous considérons que la biomasse est issue de cultures dédiées et de résidus agricoles pour les scénarios 2, 3 et 4. Selon les scénarios, ces biocarburants sont de première ou /et deuxième génération.;
- Pour la production d'électricité et de chaleur, l'hypothèse est faite que la totalité de la biomasse est issue de la culture de taillis à courte rotation ;
- Pour la production de biomolécules, un rendement de biocarburant de seconde génération a été retenu.

Tableau 67 : Hypothèses de calcul des surfaces dédiées par usage

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Biocarburants	1ère génération Cultures dédiées 0,4 à 2 tep/ha	2ème génération, Cultures dédiées 1,5 tep/ha + 20% résidus agricoles	1ère et 2ème génération Cultures dédiées + 20% résidus	1ère et 2ème génération Cultures dédiées + 20% résidus

		(0,5 tep/ha)		
Bioélectricité (et chaleur)	1,8 à 3 tep/ha {hyp. 100% TCR – 10tMS/ha - rendement de 40 à 70% (électricité, cogénération)}			
Chimie, biomolécules	1,5 tep/ha			

La quantité d'énergie utilisée pour chaque usage (ou équivalent énergie pour les biomolécules) est convertie en appliquant rétroactivement : (1) un rendement énergétique moyen de transformation de la biomasse (tep par tonne de matière sèche) et (2) un **rendement culturel moyen mondial** par unité de surface (tonne de matière sèche par hectare). En annexe 3 figurent le détail des rendements utilisés et les sources bibliographiques dont ils sont extraits.

Enfin, élément important, les **technologies et les rendements considérés sont ceux en vigueur actuellement (productivité constante)** de façon à prendre la mesure des marges de progression à l'horizon 2050 vis-à-vis des technologies et des systèmes de production actuels.

(ii) *Résultats des simulations : Surfaces théoriques correspondantes pour la production de biomasse*

Le tableau suivant présente les résultats de la traduction des demandes en biomasse en surfaces dédiées à la production de biomasse par scénario :

Tableau 68 : Surfaces dédiées à la biomasse non alimentaire (biocarburants, électricité et chaleur, biomolécules) dans les scénarios VegA :

Usage	Biocarburants			Bioélectricité-chaleur		Biomolécules		Total		
	Mtep	Surfaces dédiées Mha	Surfaces collecte résidus	Mtep	Surfaces Mha	Mtep	Surfaces Mha	Mtep	Surfaces Mha	Surfaces collecte résidus
Scénario 1	70	35 à 275	-	600	200 à 335	50	35	720	270 à 545	-
Scénario 2	70	40	35	800	270 à 440	250	165	1120	475 à 645	35
Scénario 3	400	190 à 500	200	600	200 à 335	-	-	1000	390 à 835	200
Scénario 4	400	190 à 500	200	700	230 à 390	50	35	1150	455 à 925	200

Pour répondre à la demande en biomasse pour les trois usages étudiés, telle qu'elle a été définie en s'inspirant des scénarios de l'ETP 2008, les surfaces qu'il faudrait théoriquement mobiliser s'échelonnent entre 270 et 925 millions d'ha. A titre de comparaison, les surfaces mondiales cultivées (toutes cultures confondues) en 2005 s'élevaient à 1,5 milliards d'hectares.

### 3.3.5.7.3.3. Interprétations

#### 3.3.1. Enseignements généraux

Ces résultats appellent une première remarque sur **l'ampleur des surfaces** ainsi calculées, qui est

considérable. Ces simulations n'ont assurément aucune portée prédictive, les limites de la méthode employée sont manifestes et les hypothèses sous-jacentes très tranchées (surfaces cultivées dédiées, rendements moyens mondiaux, productivité constante). Ces résultats ont cependant la vertu de **donner la mesure des transformations que peuvent induire de tels niveaux de demande en biomasse** pour ces trois nouveaux usages. C'est d'autant plus le cas que ces calculs ne prennent pas en compte les usages qui pèsent actuellement le plus dans la consommation énergétique de biomasse, à savoir les usages « traditionnels ». Utilisée sous cette forme, la biomasse est, rappelons-le, la première source d'énergie dans de nombreuses régions du monde, si ce n'est la seule. La tendance est à l'augmentation des quantités de biomasse utilisées pour ces usages traditionnels, et il est fort probable que cette tendance se prolonge<sup>743</sup>, à moins que leur efficacité énergétique ne s'améliore sensiblement ou que les biocombustibles soient progressivement remplacés par d'autres sources d'énergie, comme le postule l'AIE dans l'ETP 2008.

Autre fait marquant, les fourchettes de surfaces obtenues sont très larges. Ce fait est étroitement lié à la méthode de calcul. En effet, le type de biomasse produite n'a pas été différencié en fonction de sa localisation ; les rendements par unité de surface employés n'ont donc pas été « optimisés » de ce point de vue. Mais cela met tout de même l'accent sur le fait que **certaines systèmes de production de biomasse non alimentaire** (ceux obtenus à partir de grains notamment) **sont particulièrement consommateurs d'espace**, et que cela peut avoir des conséquences massives sur l'occupation des sols dans le cas d'un développement à grande échelle des filières concernées.

Un constat émerge également des simulations relatives au scénario 2 : le développement à large échelle de l'usage de produit biosourcés dans le domaine de la chimie pourrait mobiliser des quantités de biomasse considérables, et des surfaces importantes (250 millions d'hectares dans les simulations faites pour le scénario 2).

Les résultats relatifs aux **surfaces de collecte de résidus agricoles** posent également question. Dans les scénarios 3 et 4 par exemple, pour produire 1/5<sup>ème</sup> de la biomasse utilisée dans les transports, soit 7 à 8 % de la demande totale en bioénergie, la collecte concerne des superficies de l'ordre de 200 millions d'hectares d'après les simulations. Cela signifie que les résidus sont collectés sur l'équivalent d'un dixième des surfaces cultivées dans le monde, ce qui suggère un déploiement logistique considérable et la mise en place de filières nouvelles, plus ou moins longues, dont la rentabilité économique et l'efficacité énergétique ne sont pas assurées. Dans ce contexte, l'enjeu de maîtrise des exportations de la matière organique des sols est de plus en plus prégnant au vu des surfaces arables concernées. Enfin, les résidus agricoles font d'ores et déjà l'objet d'usages variés, qu'ils soient à destination de l'élevage, d'usages énergétiques ou domestiques divers (dans les pays en développement) ; une concurrence accrue entre les usages doit donc être envisagée.

### **3.3.2. Comparaison avec les scénarios d'occupation des sols de la prospective Agrimonde**

La prospective Agrimonde présente deux situations contrastées de consommation alimentaire et de type de systèmes de production agricoles à 2050, ainsi que les dynamiques d'occupation des sols associées (cf. partie 5.5.2). Nous nous intéressons ici à l'évolution de l'occupation des sols du scénario Agrimonde 1, qui a été construite sur la base de données sur les potentiels cultivables (données FAO et IIASA<sup>744</sup>) et à dire d'experts, en prenant en compte les facteurs physiques de disponibilité et de qualité des sols et en les croisant avec des critères de durabilité. Ainsi, la préservation d'espaces forestiers, pourvoyeurs de services écosystémiques, a été un critère important dans ces estimations, et les

<sup>743</sup> FAO 2008. Biofuels. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0100e/i0100e.pdf>

<sup>744</sup> Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st century (IIASA et FAO).

hypothèses sur l'augmentation des rendements assez modérée par rapport à des scénarios très « intensifs ».

**Encadré 2 : Evolution de l'occupation des sols dans le scénario Agrimonde 1**

millions d'hectares	2000	2050 scénario Agrimonde 1	variation 2000-2050
surfaces cultivées	1 529	2 104	+575
surface en pâture	3 326	2 845	-494
surfaces en forêts	3 905	3 879	-47
« autres »	3 873	3 873	0

Parmi les 575 millions d'ha surnuméraires cultivés en 2050, la plus grande part est dédiée à l'augmentation des surfaces cultivées pour l'alimentation (355 millions d'ha), et **220 millions ha environ sont dégagés pour la production de biomasse agricole non alimentaire à l'horizon 2050**. Les pays OCDE libèrent ainsi dans ce scénario près de 20 % de leur surface cultivée pour des usages non-alimentaires en 2050, l'Afrique subsaharienne et l'Amérique latine y consacrent respectivement 5 et 10 %, l'essentiel des accroissements de surfaces cultivées y étant dévolus à l'alimentation. En Asie, à cause de l'augmentation de la demande alimentaire, peu de surfaces sont disponibles pour développer les cultures non-alimentaires, et au Moyen Orient du fait de la faible disponibilité de terres, aucune surface n'est dédiée aux usages non-alimentaires.

Bien que calculées à productivité constante, contrairement aux estimations réalisées dans l'exercice Agrimonde, les surfaces calculées dans nos simulations, de 270 à 925 millions d'hectares, excèdent largement celles envisagées dans le scénario Agrimonde 1. Quant à leur localisation, rien n'indique qu'elle sera de même nature dans les scénarios VegA, car elle dépend des conditions économiques, politiques et sociales dans lesquelles se développent les filières (cf. infra).

Si donc, comme les résultats des simulations le laissent entendre, davantage de surfaces sont mises en culture pour la production de biomasse non alimentaire, cela pourrait se traduire :

- par davantage de conversion des terres occupées par la forêt en terres cultivées ? Des réserves de terres cultivables importantes se trouvent en effet dans les zones actuellement forestières<sup>745</sup>. Le scénario Agrimonde limite par construction le recours aux espaces forestiers, qui diminuent tout de même de 47 millions d'ha. De façon évidente, l'intérêt environnemental d'un recours à la bioénergie serait très significativement réduit s'il devait se faire au prix d'une déforestation massive, par rapport à d'autres solutions énergétiques renouvelables, non seulement du point de vue des émissions de GES liées à la déforestation mais aussi de la perte de biodiversité sauvage, de la dégradation potentielle des sols, et de la perte des autres services écosystémiques rendus par les forêts (vis-à-vis de l'eau notamment)<sup>746, 747</sup>.
- par davantage de conversion des terres pâturées ? Réduire davantage l'espace dédié aux pâtures (il est déjà restreint dans le scénario Agrimonde 1, avec une diminution de 494 Mha par rapport à 2000) déboucherait sur une intensification des systèmes d'élevage, avec les enjeux de durabilité que

<sup>745</sup> Aujourd'hui, 12% des surfaces forestières dans les pays développés et 30% des surfaces forestières dans les pays en développement pourraient être mise en culture selon l'IIASA (IIASA 2000).

<sup>746</sup> Melillo, J.M., Reilly, J.M., Kicklighter, D.W., et al. 2009. Science 326(5958):1397-1399.

<sup>747</sup> PNUE 2009. <http://www.unep.org>

cela soulève. Cet aspect doit être nuancé par le fait que dans le cas des agrocarburants, la production de coproduits à destination de l'élevage (drèches, tourteaux) peut être substantielle. Cependant, les services écologiques rendus par les systèmes pastoraux doivent être pris en considération, de même que le carbone stocké dans les écosystèmes prairiaux qui pourrait être libéré massivement dans l'atmosphère.

- par l'usage des « autres terres émergées » ? Ces espaces, tels que classés dans la nomenclature Agrimonde, comprennent les zones marginales, les zones impropres à la culture, les espaces urbanisés, les fortes pentes, les zones dégradées ou à potentiel de rendement faible. Une partie de ces terres, bien que faiblement voire très faiblement productive, peut être mobilisée pour la production agricole, comme cela a déjà été le cas dans certaines régions du monde (en Asie en particulier). Elles constituent une réserve potentielle de terres importante, mais sous fortes contraintes climatiques, pédologiques ou topographiques. L'opportunité de mettre en culture ces espaces soulève plusieurs questions:

- l'accessibilité : les terres dites « marginales » le sont souvent parce que difficilement atteignables ou non reliées aux infrastructures, routières notamment ;
- le coût des infrastructures à mettre en place pour rendre ces terres productives : irrigation, terrassement, réseau de transport etc. ;
- l'échelle des bassins d'approvisionnement, si les rendements sont très faibles ou si ces espaces sont dispersés.

Ces éléments conditionnent fortement, au moins à court terme, la rentabilité des investissements à déployer pour les exploiter, et le bilan énergétique global des filières à mettre en place. La perspective peut être très différente si l'on envisage un usage localisé de la biomasse produite dans ces espaces et une transformation à petite échelle, en particulier dans des régions densément peuplées<sup>748</sup>.

En somme, cette approche simplifiée, de type « comptable », met l'accent sur le fait qu'**avec les technologies et les modes de production des produits biosourcés actuels, il est impossible de répondre à de tels niveaux de demande en biomasse non alimentaire sans entraîner des changements massifs d'allocation des sols au niveau mondial**, avec comme conséquence des tensions avec la production à vocation alimentaire (concurrence pour les surfaces), des pressions très fortes sur les écosystèmes et une libération massive de gaz à effets de serre, à techniques de production agricole inchangées.

### **3.3.3. Vers une diversification des sources de biomasse ?**

Ces ordres de grandeur mettent l'accent sur la nécessité de développer, pour répondre aux nouveaux usages, des sources de biomasse qui limitent les concurrences spatiales. Les sources de biomasse aujourd'hui envisagées se diversifient, à mesure notamment que les perspectives technologiques de transformation s'élargissent :

#### *Biomasse forestière*

En premier lieu est entrevue une utilisation accrue de la biomasse d'origine forestière ; c'est aujourd'hui la première source de biomasse à vocation énergétique, et outre son utilisation par combustion, elle est d'ores et déjà utilisée dans certaines filières de production d'électricité et chaleur mobilisant de nouvelles technologies (cogénération, chaufferies à haute efficacité énergétique, sous la forme de granulés par exemple). Un peu moins de la moitié de la production de bois mondial sert aujourd'hui à produire de l'énergie, le reste étant essentiellement destiné au bois d'œuvre et à la trituration. Dans les pays du Sud, l'usage énergétique prédomine largement tandis que dans la plupart des pays du Nord, il

<sup>748</sup> IAASTD, 2009. <http://unep.org/dewa/Assessments/Ecosystems/IAASTD>

occupe au contraire une place modeste dans la production forestière (cf. partie 5.5.2). Comment un accroissement de la production forestière globale dédiée aux nouveaux usages peut-il se traduire : substitutions d'usage, transformations des peuplements et essences, intensification et expansion des surfaces en plantation, augmentation des surfaces forestières exploitées ? Sur quelles zones, en fonction de la compétition internationale cet accroissement de la production pourrait-il se reporter ? Et quelles seront les implications de ces changements sur les écosystèmes, la biodiversité et le stockage de carbone ?

Par ailleurs, les forêts abritent un certain nombre **d'usages productifs** (production de bois de combustion, bois d'œuvre, cueillette alimentaire et médicinale etc.), ainsi que des usages **non productifs**, avec lesquels les **nouveaux usages non alimentaires de la biomasse entrent directement en concurrence**.

#### *Rémanents, déchets, effluents*

Les **rémanents forestiers** sont également de plus en plus cités comme une source possible de biomasse à transformer. Ils sont déjà utilisés par les populations rurales dans beaucoup de pays en développement, au même titre qu'une part des résidus agricoles. Le développement de leur collecte pour un usage à l'échelle industrielle pose les questions des coûts logistiques de collecte et des modalités de gestion de la matière organique des sols. La valorisation des **déchets de l'industrie du bois** (ceux qui ne le sont pas déjà), une utilisation accrue des produits en bois en fin de vie, des **déchets organiques urbains, issus de l'industrie agro-alimentaire** ou encore des effluents d'élevage sont également des pistes considérées. Les défis technologiques et logistiques associés à l'utilisation de telles sources sont considérables, mais les gisements potentiels très importants.

#### *Biomasse algale*

Enfin, un intérêt grandissant est porté à la biomasse issue de cultures **de micro et macroalgues** (en aquacultures côtières, en bassins ou en off-shore). Ces cultures présentent des potentiels de rendements par unité de surface intéressants et pourraient se développer dans des espaces moins concurrentiels avec les productions alimentaires. Les rendements actuellement obtenus sont prometteurs (avec des estimations de l'ordre de 27 tep/ha pour la biomasse algale pour la fabrication de biogaz et de 36 tep/ha pour les microalgues<sup>749</sup>). Mais pour l'heure, peu de projections sont faites quant aux potentialités de la biomasse algale. D'une part, des incertitudes pèsent sur la possibilité de développer des systèmes d'algoculture à grande échelle, d'autre part les systèmes d'algoculture soulèvent également de forts enjeux de maîtrise environnementale (gestion des effluents, invasivité des espèces cultivées par exemple) ainsi que des problèmes de conflits d'usage sur les espaces littoraux.

#### **3.4.5.7.3.4. Quelques enseignements plus spécifiques des scénarios**

Si l'analyse des résultats en terme purement spatial est déjà porteuse d'enseignements, des éclairages spécifiques peuvent être réalisés lorsque ces estimations quantitatives sont envisagées dans le cadre général des scénarios.

---

<sup>749</sup> D'après Y. Chisti, 2007, *Biotechnology advances* 25:294-306, sur la base d'une productivité en huile de 30%.

### Encadré 3 - Rappel des résultats des simulations par scénario :

Scénario	Bioénergie primaire (nouveaux usages uniquement*)	Surfaces théoriques correspondantes	
		Surfaces cultivées (Mha)	Surfaces collecte résidus (Mha)
Scénario 1 « Fuite en avant »	720 Mtep <3% de l'énergie primaire totale du scénario ~ 1/4 de l'énergie primaire renouvelable	270 à 545	-
Scénario 2 « Néo-modernisation verte »	1120 Mtep 5 à 10% de l'énergie primaire totale du scénario ~ 20% de l'énergie renouvelable	475 à 645	35
Scénario 3 « Course à la biomasse »	1000 Mtep ~ 5% de l'énergie primaire totale du scénario ~ 35% de l'énergie renouvelable	390 à 835	200
Scénario 4 « Usages diversifiés dans les territoires »	1150 Mtep 5 à 10 % de l'énergie primaire totale du scénario ~ 30 % de l'énergie renouvelable	455 à 925	200

\*Rappel : seuls les « nouveaux » usages de la biomasse pour la production d'électricité et de chaleur, de biocarburants et de biomolécules sont pris en compte. La biomasse traditionnelle, qui est l'usage le plus important, n'a pas fait l'objet d'estimations en termes d'occupation du sol.

#### 3.4.1. La biomasse, une solution pertinente quel que soit le paysage énergétique ?

Les systèmes énergétiques diffèrent sensiblement d'un scénario à l'autre, et la biomasse y occupe des places et des fonctions différentes. Le paysage énergétique décrit dans le scénario 1 interroge de façon spécifique l'opportunité d'un recours à cette solution énergétique : les nouveaux usages de la biomasse s'y développent dans un **contexte d'explosion de la consommation énergétique** (par la généralisation des modes de consommation occidentaux). Aussi, des quantités importantes de biomasse sont mobilisées pour une contribution énergétique qui reste très limitée en proportion : cela se traduit par une surface mobilisée comprise entre 270 et 545 Mha pour fournir moins de 3 % de l'énergie primaire totale. La pertinence du **recours à la biomasse en l'absence de politique forte de maîtrise de la consommation** s'en trouve fortement questionnée. De surcroît, le contexte politique et économique (prix de l'énergie, prix des matières premières) ayant dans ce scénario incité les opérateurs à s'appuyer sur les technologies énergétiques les plus mûres et les plus compétitives, les



modes de production et de transformation de la biomasse ne sont **pas particulièrement sélectionnés selon leurs performances et leur sobriété vis-à-vis des superficies mobilisées** (biocarburants agro-sourcés) **ni des ressources** (en eau par exemple, à moins que leur coût ne l'impose).

Un autre risque est lié au processus de libéralisation et de financiarisation de la production de biomasse non alimentaire (agricole ou autre) constitutif de ce scénario. L'expression de logiques de rentabilité à court terme et de retours sur investissement, plus ou moins déconnectées des réalités territoriales, pourrait en effet encourager des phénomènes de surexploitation ou de dégradation des ressources, et ce à très grande échelle, d'après les simulations. Ce phénomène peut éventuellement être contrebalancé dans ce scénario par les exigences de durabilité des consommateurs du Nord, qui pourraient se traduire par des démarches de labellisation environnementale ou de certification.

Le scénario 3 illustre quant à lui une situation de paysage énergétique sous tension, où l'urgence de la situation – qui découle entre autres d'un manque d'anticipation – conduit à des modes de production et de prélèvement de la biomasse dévastateurs d'un point de vue environnemental et social (cf. supra). Les surfaces théoriques calculées dans les simulations sont très importantes ; elles représentent l'équivalent de 25 à 50% des surfaces actuellement cultivées. Dans ce contexte, et en l'absence de cadre international de régulation environnementale et commerciale, les régions à potentiel cultivable important (Afrique, Amérique Latine surtout) et à foncier bon marché, avec l'installation de systèmes de production industriels intensifs en intrants, voire par exploitation « minière » de la biomasse forestière pourraient connaître des déforestations massives ou une transformation rapide de leurs pâtures en terres arables. C'est donc un scénario où l'impact sur les écosystèmes peut être extrême, du fait de la **primauté accordée à l'approvisionnement énergétique et de l'absence de gouvernance forte sur les enjeux environnementaux**.

#### ***3.4.2. Concilier accroissement des usages de la biomasse, réduction des gaz à effet de serre et durabilité environnementale : un défi pour l'innovation***

Les scénarios 2 et 4 sont, par construction, des scénarios où la biomasse s'insère dans une perspective de durabilité et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les résultats des simulations sur l'occupation des sols **questionnent avec acuité la faisabilité de concilier ces objectifs environnementaux exigeants avec des objectifs ambitieux de développement des usages de la biomasse**. Deux formes de transition socio-écologique sont envisagées dans ces scénarios.

L'objectif de réduction des GES est particulièrement structurant du scénario 2 ; c'est l'amélioration de l'efficacité énergétique et des reconfigurations sectorielles pour réduire les émissions qui sont visées. Or la mobilisation de surfaces atteignant plusieurs centaines de millions d'ha (475 à 645 Mha dans les simulations) est susceptible de provoquer des changements d'affectations des sols de grande ampleur. Ces derniers sont porteurs de phénomènes de déstockage massif de carbone et d'impacts très sévères sur la biodiversité (Melillo, 2009). Ce scénario met donc particulièrement en tension les **capacités à déployer des innovations pour améliorer l'efficacité des filières biomasse** (en termes de systèmes de production et d'efficacité d'utilisation de la ressource végétale) et pour développer le **recours à des ressources en biomasse alternatives limitant l'impact environnemental** de ces nouveaux usages. Y apparaissent aussi très prégnantes les questions relatives aux **modes d'évaluation** des systèmes de production (agricoles et sylvicoles) et des filières sur l'ensemble du cycle de vie des produits biosourcés/bioénergies.

Dans le scénario 4, la biomasse est une option énergétique largement mobilisée, en tant que **source d'énergie renouvelable et distribuée dans l'espace**. Elle est même l'un des moteurs de la décentralisation des systèmes énergétiques. Les **formes d'utilisation de la biomasse sont fonctions**

**des ressources et des contextes locaux.** Ce scénario fait l'hypothèse que certains usages « traditionnels » ont en partie évolué vers des manières de transformer la biomasse plus efficaces énergétiquement et permettant de valoriser des formes variées de biomasse. Par construction, une priorité du scénario 4 est l'insertion des systèmes énergétiques dans une perspective plus large de développement territorial et de consolidation de l'accès à l'énergie pour les habitants des territoires, qui reste un enjeu très fort dans les pays du sud. En l'état, les ordres de grandeurs considérés dans les simulations sur la biomasse mobilisée (455 à 925 Mha) semblent impossibles à atteindre dans le cadre de la durabilité qui définit ce scénario, soulevant notamment des **problèmes aigus de concurrence avec les autres usages de la biomasse dans les territoires.** Cela appelle, comme dans le scénario 2, une réflexion sur les sources de biomasse permettant de limiter les concurrences spatiales (valorisation des déchets organiques urbains, industriels notamment, mobilisation des haies), sur la possibilité d'augmenter la productivité sans grever la durabilité des systèmes de production, ainsi que sur l'efficacité globale des filières. Plus particulièrement, le scénario 4 met en lumière la nécessité **d'inventer des complémentarités entre systèmes énergétiques et systèmes alimentaires au niveau territorial, des articulations entre usages, des hybridations entre filières, et des modalités de gestion maîtrisée des ressources naturelles et des flux de matière,** et ce en impliquant une diversité d'opérateurs aux intérêts multiples et variés.

Cela apparaît très nettement : les **innovations** requises sont **de nature technologique**, mais aussi dans une large mesure **de nature organisationnelle, institutionnelle, sociétale.** Les modes de gouvernance, les modalités d'intervention publique, l'engagement des acteurs privés et des usagers de la ressource et les modes de gestion diffèrent fortement dans les **deux formes de transition socio-écologique** décrites dans les scénarios 2 et 4. Les modalités de construction de l'innovation elle-même entrent en jeu : rapprocher des acteurs issus de mondes scientifiques et industriels différents, associer une grande diversité de parties dans les processus (petites entreprises, grands groupes, recherche publique et privée, collectivités, associations), repenser la place des usagers ou des acteurs territoriaux dans l'innovation, développer une approche globale pour répondre aux défis environnementaux à l'échelle des filières (ex : éco-conception).

### **3.4.3. Biomasse, filières agricoles et systèmes alimentaires : l'enjeu majeur de la gouvernance**

L'ampleur du phénomène qui est suggéré dans les simulations montre que le développement des nouveaux usages de la biomasse pourrait contribuer de façon significative à une transformation radicale des équilibres agricoles et alimentaires mondiaux.

Dans le scénario 1, l'extension des types de filières et des modes de consommation alimentaires à *l'occidental* entraîne l'explosion de la demande en biens agricoles de base, qui, indépendamment des usages non alimentaires, met sous tension la capacité de l'agriculture à répondre à cette demande. A cela s'ajoute la demande en matières premières agricoles pour les biocarburants, qui restent principalement agro-sourcés, et qui – les simulations le soulignent – mobilisent une part conséquente des ressources et des superficies cultivables, à productivité constante. On est donc dans ce scénario dans la situation où **une compétition directe s'exerce entre filières alimentaires et non alimentaires pour les produits agricoles de base**, et où, dans un contexte de faible régulation des marchés agricoles et énergétiques, les **risques d'accentuer la volatilité des prix** sont grands. Par ailleurs, la localisation de la production est essentiellement guidée dans ce scénario par les exigences de compétitivité et de rentabilité des opérateurs économiques, qui sont conduits à **investir dans les pays où les conditions pédoclimatiques, les coûts de la main d'œuvre et d'accès au foncier sont les plus avantageux.** Cela peut d'une part entraîner une compétition avec la production alimentaire pour les meilleures terres, et d'autre part faire advenir une situation paradoxale où, dans le cadre d'une production de commodités à destination des marchés énergétiques internationaux (sauf si la demande

domestique est solvable), la rente foncière et la rente liée aux ressources naturelles sont massivement captées dans les pays même où l'accès à l'alimentation est problématique, et où l'accès à l'énergie est un facteur de précarité et un frein au développement. Des dynamiques de concentration foncière et de développement de grands systèmes industriels, quelle que soit l'efficacité économique à laquelle elles sont associées, ne vont pas spontanément dans le sens d'objectifs de développement rural et d'amélioration de la sécurité alimentaire (voir partie 2.2.3. Controverses sur les effet sur le développement rural). La question de la sécurité alimentaire ne se limite pas, en effet, à celle de la productivité agricole et des surfaces disponibles, mais concerne avant tout l'accès des populations aux biens alimentaires, et donc à leurs opportunités de mener une activité rémunératrice et durable.

Le scénario 3 envisage quant à lui la concurrence entre usages alimentaires et non-alimentaires dans une perspective d'interdépendance Nord-Sud, d'affirmation de stratégies nationales souverainistes vis-à-vis de l'énergie, et de division internationale du travail (production de biomasse / transformation et consommation de produit biosourcés). Dans une telle configuration, et étant données les surfaces potentiellement concernées, un certain nombre de pays pourraient subir des **pressions foncières très fortes**. Selon les rapports de force, qui dans ce scénario s'expriment dans le cadre des relations bilatérales, **les capacités de maîtrise de ce phénomène et de ses retombées internes par les Etats et par les populations concernées sont loin d'être acquises**.

Ces deux scénarios mettent ainsi particulièrement en avant le fait que les effets du développement de nouvelles filières biomasse en matière d'emplois, de droits des travailleurs, de revenus, et d'accès à l'énergie pour les populations rurales concernées sont fortement **conditionnés par la nature des systèmes de production et des filières** de biomasse développés et surtout par **les configurations institutionnelles** qui les encadrent : structuration du secteur agricole et organisation des acteurs, sécurité du droit foncier, politiques agricoles des pays producteurs, modalités de contractualisation entre Etats, compagnies et acteurs locaux, et modes de régulation des marchés internationaux.

Les scénarios 2 et 4 illustrent des situations, a priori, plus vertueuses sur le plan de la gouvernance et des objectifs de durabilité affichés. Des régulations à l'échelle internationale associées à des modalités de gouvernance articulant les échelons locaux, nationaux et internationaux, sont censées maintenir un équilibre entre filières et usages de la biomasse. Ces modalités restent largement à définir.

Le scénario 2 opte pour des systèmes ayant une gouvernance centralisée, avec le double risque d'une inadaptation des techniques élaborées aux contextes locaux et d'une fragilité des systèmes technologiques (privilegiant une seule technologie) à des événements inattendus, mais avec la promesse d'une efficacité industrielle accrue. Le scénario 4 présente des modes de gouvernance plus territorialisés jouant d'une diversité de technologies et s'appuyant sur les acteurs locaux, mais avec une moindre efficacité énergétique ou sur la réduction des gaz à effet de serre.

L'implication de nouveaux acteurs issus des secteurs de l'énergie, de la gestion de l'environnement ou de la chimie n'en reste pas moins susceptible de **transformer en profondeur les filières agricoles et forestières** concernées. Pour les exploitations agricoles et forestières, les modalités d'insertion aux marchés et d'intégration au sein de ces nouvelles filières peuvent prendre des formes contrastées. Penser et anticiper l'évolution de ces filières en prenant en compte l'ensemble des fonctionnalités des activités de production et leurs liens aux territoires reste un défi de taille.

#### 5.7.4. Conclusion

Quatre scénarios de devenir des usages non alimentaires de la biomasse à l'horizon 2050 ont été construits à l'occasion de cette réflexion prospective. Tous sont plausibles, certaines tendances sont

plus probables que d'autres, et certaines évolutions plus propices à un développement durable que d'autres. Comme dans tout exercice de prospective, d'autres trajectoires auraient pu être envisagées ; il aurait également été utile de différencier plus finement les trajectoires d'évolution selon les régions du monde. Mais le choix s'est porté sur les quatre visions contrastées présentées ici, qui ensemble, appréhendent les principaux facteurs d'incertitude qui entourent aujourd'hui l'évolution des usages de la biomasse. Ce ne sont que quatre voies possibles, mais elles posent des questions spécifiques - et y répondent partiellement -, et pointent différentes problématiques pour le domaine de la biomasse aujourd'hui, qui font échos aux controverses en cours :

=• Quel modèle de marché pour les filières biomasse dans un contexte de libéralisation et de fortes demandes alimentaire et énergétique ?

=• Quelle place de la biomasse dans un mouvement de modernisation écologique des secteurs d'activité, visant une sortie des ressources fossiles et à une limitation des émissions de GES ?

=• Quelles implications possibles d'un développement de la biomasse dans un contexte international d'insécurité énergétique et de dynamique de substitution massive aux énergies fossiles ?

=• Quelle place de la biomasse dans un mouvement de reterritorialisation des systèmes énergétiques et alimentaires, et d'innovation inter-sectorielle « intégrée » au niveau territorial (durabilité, efficacité, robustesse) ?

Les scénarios sont des récits qui esquissent des réponses à ces quatre grandes questions. Des trajectoires d'innovation différentes y sont associées. Dans l'un, l'innovation est principalement pilotées par les grandes entreprises agroindustrielles et du secteur de l'énergie, et dépend de la compétitivité des produit biosourcés sur les marchés (sc.1) ; dans d'autres scénarios, ce sont les Etats en association avec des macro-acteurs privés qui pilotent, motivés par des objectifs de développement durable, de modernisation et de croissance vertes dans un cas (sc.2), de sécurité énergétique dans l'autre (sc.3) ; dans un autre enfin, l'innovation résulte davantage de coordinations d'acteurs privés et publics au plan territorial (sc.4). Aussi, les scénarios reposent sur des types d'innovation distincts : le premier scénario est fondé sur une innovation technologique de nature incrémentale et sur des innovations marchandes en réponse à des demandes spécifiques des consommateurs (sc.1), le second sur une innovation centralisée et univoque qui s'appuie sur des technologies de rupture et répond à une demande globale de durabilité des citoyens (sc.2) ; le troisième privilégie une innovation centralisée orientée vers l'industrie et en réponse à des enjeux géopolitiques (sc. 3) ; dans le dernier scénarios, l'innovation est plurielle et décentralisée et allie une dimension technologique et organisationnelle tout en s'appuyant sur une variété d'acteurs du territoire (dont notamment des associations de résidents).

Comme on le voit, les innovations sont soit plutôt orientées par les usages finaux (sc.2), soit par les ressources en biomasse disponibles (sc.3), soit encore par une adéquation des deux et en accord avec d'autres usages du territoire (sc. 4). Les entreprises privées, les grands groupes industriels, les PME, les producteurs de biomasse (agriculteurs, forestiers etc.), l'Etat, les collectivités territoriales, les usagers, les consommateurs et les citoyens sont impliqués dans les dynamiques d'innovation à des échelles très différentes d'un scénario à l'autre. Finalement, les quatre scénarios procèdent de filières et de schémas de développement différents : inscrits dans des logiques d'incorporation ou de substitution totale, positionnés sur des segments de marché ou sur des marchés de masse, répondant à des demandes territorialisées ou à une demande internationale.

En esquissant à grands traits ces diverses dynamiques d'innovation, la réflexion prospective a mis particulièrement en avant le fait que le futur des usages de la biomasse ne peut être envisagé qu'à l'aune des orientations politiques, du positionnement des acteurs, du fonctionnement des marchés et des évolutions sociétales, pris conjointement. Un élément commun aux quatre scénarios apparaît nettement : tous reposent sur des interactions spécifiques, des synergies et des hybridations entre acteurs de mondes différents (sectoriels, scientifiques, institutionnels). Au travers de ces configurations, les scénarios interrogent tout particulièrement le positionnement de la recherche publique : son rôle

dans la production et la circulation des connaissances, sa relation à la propriété intellectuelle ou encore ses interactions avec les autres acteurs de la recherche et de l'innovation.

L'illustration quantifiée très schématique des quatre scénarios VegA, sans prétendre avoir une portée prédictive, apporte un éclairage sur les enjeux et limites des scénarios. Les ordres de grandeur obtenus sur les surfaces à mobiliser écartent la possibilité de répondre à des demandes massives en biomasse dans une perspective de développement durable en ne se basant que sur des cultures dédiées (qu'elles soient de 1<sup>ère</sup> ou de 2<sup>ème</sup> génération), et invitent à la prudence quant aux projections de long terme réalisées sur l'utilisation de la biomasse pour l'énergie et la chimie. L'inutilité d'un recours massif à la biomasse en l'absence de politique de réduction de la consommation énergétique est apparue très nettement. Ces résultats appellent enfin à considérer non seulement les tensions possibles avec les usages alimentaires, mais aussi avec les usages non alimentaires de la biomasse déjà existants et les relations de ces usages avec les dynamiques des espaces ruraux.

Cette analyse quantifiée a également permis d'envisager les impacts possibles d'un développement à large échelle des usages de la biomasse. Ainsi, il apparaît que la question de la concurrence entre filières alimentaires et non alimentaires dépasse la dimension purement spatiale du phénomène (il reste d'importantes surfaces cultivables dans le monde, bien que très inégalement réparties) : elle réside davantage dans la portée environnementale et sociale de la mobilisation de ces terres, et dans les contraintes ou contributions qu'elle peut engendrer sur les trajectoires de développement, et tout particulièrement sur les dynamiques agricoles dans les pays du Sud, qui seront absolument déterminantes dans la réponse aux défis alimentaires mondiaux à court et à long termes. Naturellement, les modes de gouvernance et de régulation internationaux seront décisifs pour maîtriser les effets de ces nouveaux usages et encourager leur adéquation avec les objectifs de développement durable.

Suivant les scénarios, les échelles d'action des acteurs publics et privés diffèrent. Mais dans tous les scénarios se joueront au niveau territorial les interactions entre activités de production et ressources naturelles (eau, sol, biodiversité), et les relations territoriales entre villes et campagnes (complémentarité, dépendance, fracture territoriale). Les différents usages de l'espace (productifs et non productifs) peuvent soit donner lieu à une gestion ségréguée par différenciation et spécialisation des espaces, soit à une gestion spatiale de la coexistence. Suivant les cas de figure, les modèles économiques des filières biomasse et les politiques publiques en appui peuvent se construire à l'échelle nationale, internationale ou territoriale. Certains enjeux comme l'alimentation, la réduction des gaz à effet de serre, le foncier, la biodiversité semblent appeler des régulations internationales. En effet dans la plupart des scénarios, les politiques publiques nationales de soutien aux produits biosourcés ont des conséquences nationales mais également internationales dans des pays tiers, producteurs de produits biosourcés. Dans ce cadre, une coordination internationale – et notamment une coopération Nord-Sud – apparaît également incontournable pour traiter des conséquences de la globalisation des marchés des produits biosourcés ; en particulier, la mise en place d'outils et d'institutions de régulation des interactions entre marchés agricoles et énergétiques. Enfin, face à des politiques incitatives de développement des filières biomasse, un enjeu majeur de la gouvernance semble être la mise en œuvre de formes de régulations territoriales qui permettent d'anticiper leurs effets (sociaux, environnementaux, économiques), et il n'est pas certain qu'une régulation des marchés de produits biosourcés (par des dispositifs de certification-standardisation) soit en mesure de traiter ces enjeux.

Ainsi les scénarios font apparaître que, dans les évolutions à venir, les politiques publiques des pays producteurs et importateurs seront décisives, de même que leur capacité à articuler les différents niveaux de l'intervention publique (territoriale, nationale, internationale, mondiale) et à associer aussi bien les acteurs économiques que les populations locales, les consommateurs et les usagers à la construction de ces nouveaux usages et filières.

## 6. Conclusions

À RÉDIGER

## 7. Lexique

### **Affectation des terres ou usage des terres (land use)**

Ensemble des activités et interventions entreprises dans un certain type de couverture terrestre (ensemble de mesures d'intervention humaines). Objectifs sociaux et économiques de la gestion des terres (pâturages, exploitation forestière et conservation, par exemple).

Source : GIEC, 2008.

### **Analyse de cycle de vie (ACV) (Life Cycle Assessment, LCA)**

Mesure des ressources nécessaires pour fabriquer un produit ou un dispositif destiné au bâtiment et la quantification des impacts sur l'environnement de cette fabrication, en considérant la totalité du cycle de vie avec les phases de fabrication, transformation, utilisation et destruction, "du berceau à la tombe".

Sources : Norme NF P 01-010, Normes ISO 14040 pour le cadre général à la méthode et à la déontologie, ISO 14041 pour les deux phases de l'ACV (objectifs, champs de l'étude et inventaire), ISO 14042 pour les lignes directrices de la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie et Norme ISO 14043 pour les exigences et recommandations en vue de l'analyse des résultats de l'inventaire et de l'évaluation de l'impact du cycle de vie.

*Remarque* : à étendre au delà du seul domaine du bâtiment.

*Ou*

Approche permettant de quantifier les impacts d'un « produit » (qu'il s'agisse d'un bien, d'un service ou d'un procédé), depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation, soit « du berceau à la tombe ». 4 quatre phases sont souvent décrites : la définition des objectifs ; l'inventaire ; l'évaluation des impacts sur l'environnement ; la recherche d'améliorations.

Source : ADEME.

*Remarque* : ces deux définitions n'abordent pas la question des co-produits, ni des substitutions.

### **Bilan énergétique**

Bilan comptable de toutes les quantités d'énergie produites, transformées et consommées sur une zone géographique et une période de temps données.

### **Biocarburant**

Carburant constitué de dérivés industriels tels que les gaz, alcools, éthers, huiles et esters obtenus après transformation de produits d'origine végétale ou animale. Un carburant est un combustible qui alimente un moteur thermique, qui transforme l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique.

Source : bulletin officiel [B.O.] n°34 du 27 septembre 2007.

<http://www.education.gouv.fr/bo/2007/34/CTNX0710514K.htm>

Note l'essence, le gazole, le MTBE, l'huile de colza, l'EMHV de colza, l'huile de tournesol, l'EMHV de tournesol, l'éthanol de blé, l'ETBE de blé, l'éthanol de betterave, l'ETBE de betterave et leurs mélanges

sont des biocarburants.

### **Biocombustible**

Combustible constitué de dérivés industriels tels que les gaz, alcools, éthers, huiles et esters obtenus après transformation de produits d'origine végétale ou animale.

Source : bulletin officiel [B.O.] n°34 du 27 septembre 2007.  
<http://www.education.gouv.fr/bo/2007/34/CTNX0710514K.htm>

### **Bioconversion**

Transformation par voie biocatalytique de matières d'origine biotique ou abiotique à des fins de production de substances ou d'élimination de ces matières premières

### **Biodégradation (biodegradation)**

Décomposition/dégradation de matières organiques ou de produits bio-sourcés par des micro-organismes (bactéries, champignons et/ou algues). Le critère est la perte de la fonction d'usage de la substance considérée.

La détermination du taux de biodégradabilité nécessite des mesures en laboratoire ou en milieu naturel selon trois catégories de test :

- Test de Sturm : test de laboratoire en milieu liquide. Conditions bien maîtrisées.
- Test de simulation en laboratoire, en milieu liquide ou solide. Conditions moins bien maîtrisées.
- Test in situ sur sol et compost. Conditions non maîtrisées.

Normes : ISO 17556:2003. Plastiques -- Détermination de la biodégradabilité aérobie ultime dans le sol par mesure de la demande en oxygène dans un respiromètre ou de la teneur en dioxyde de carbone libéré. ISO 14855-1:2005 Évaluation de la biodégradabilité aérobie ultime des matériaux plastiques dans des conditions contrôlées de compostage -- Méthode par analyse du dioxyde de carbone libéré -- Partie 1: Méthode générale. ISO 14853:2005. Plastiques -- Évaluation de la biodégradabilité anaérobie ultime des matériaux plastiques en milieu aqueux -- Méthode par détermination de la production de biogaz

### **Biodiversité ou diversité biologique**

Variabilité des organismes vivants de toute origine, y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et complexes écologiques dont ils font partie ; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes. (article 2 de la Convention sur la diversité biologique, adoptée le 22 mai 1992)

### **Bioéconomie (bioeconomy)**

Ensemble des activités économiques (santé, agriculture, industrie, énergie) bénéficiant des découvertes et innovations de produits et services issus des recherches sur les sciences biologiques.

Source : OCDE, <http://www.oecd.org/>

Remarque : terme employée aussi dans la théorie économique développée principalement par Nicholas Georgescu-Roegen qui utilise notamment le principe de l'entropie pour analyser les processus économiques (Nicholas Georgescu-Roegen, présentation et traduction de Jacques Grinevald et Ivo Rens, La décroissance : entropie, écologie, économie, Éd. Sang de la terre, nouvelle éd., 1995).

### **Biogaz (biogas)**

Gaz résultant du processus de dégradation biologique des matières organiques en l'absence d'oxygène  
Source : ADEME.

### **Biologie des systèmes**

Discipline qui a pour objectif l'identification des principes qui gouvernent l'organisation dynamique du

vivant. Elle s'applique à tout domaine biologique dès qu'il étudie des réseaux de systèmes vivants en interaction : de la régulation génomique aux théories de l'évolution, des réseaux génétiques, métaboliques et protéiques aux réseaux neuronaux, ou aux relations entre organismes dans un milieu naturel complexe. (cf ANR BIOSYS)

Mots-clés : complexité, modélisation, intégration

### **Biologie intégrative (integrative biology)**

Discipline qui a pour objectif l'étude intégrée des mécanismes qui président aux grandes fonctions physiologiques des organismes vivants et à leur évolution. Elle vise une approche globale intégrant à la fois les aspects moléculaires, génétiques, physiologiques, environnementaux, et inclus impérativement une composante de modélisation, statistique et informatique qui permet d'intégrer les différents niveaux d'organisation et d'interaction du vivant (de la molécule à la cellule, l'organe, le tissu, l'individu). Elle s'accompagne d'allers-retours entre modélisation et expérimentation.

Mots-clés : intégration données, pluri-disciplinarité, modélisation.

Source : agroBI dans le rapport INRA 2005 sur la biologie intégrative végétale.

### **Biologie synthétique (Synthetic Biology)**

Conception et élaboration de nouveaux constituants biologiques, fonctions ou systèmes.

### **Biologie structurale (structural biology)**

Compréhension et modélisation de la structure, de l'assemblage, des mobilités et des interactions des molécules et macromolécules biologiques aussi bien en solutions, aux interfaces qu'en systèmes condensés. Elle conduit à une meilleure connaissance des fonctions biologiques, mais aussi des organisations spatiales et temporelles au cours du développement.

Source : INRA

### **Biologie systémique**

Application de l'analyse systémique à la biologie en vue de décrire, à partir de la connaissance de ses composants et des relations qui existent entre eux, le fonctionnement d'un être vivant et les modifications de ce fonctionnement consécutives à des variations de ces deux éléments.

### **Biomasse (biomass)**

Ensemble des matières premières biologiques d'origine agricole, forestière, marine ou aquacole et/ou provenant des déchets industriels ou municipaux.

Ou

La fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales, de la sylviculture et des industries connexes ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers"

Source : L'article 29 de la loi 2005-781 de programmation fixant les orientations de la politique énergétique dite " POPE", du 13 juillet 2005,

Cette matière provient de divers types de ressources :

- Les produits d'origine agricole : subdivisés entre les cultures traditionnelles de plantes annuelles (céréales, oléagineux) cultivées principalement pour leur parties nobles (grains et graines et tubercules) et les cultures dédiées spécifiquement développées pour l'utilisation en bioraffinerie (Miscanthus, switch grass,...), ainsi que les résidus de cultures et d'élevage
- Les produits d'origine forestière : bûches, granulés, plaquettes et résidus de l'exploitation forestière ou de cultures sylvicoles spécifiques (taillis à courte ou très courte rotation)



- Les produits d'origine aquatique : algues, résidus de la pêche et de la pisciculture
- Les co-produits et effluents des industries de transformation des matières biologiques : scieries, papeteries, industries agroalimentaires, élevages industriels
- Les autres déchets organiques : déchets urbains, boues de station d'épuration, ordures ménagères, déchets verts de parcs et jardins.

### **Bioraffinerie (biorefinery)**

Ensemble technologique de procédés destiné à fractionner les composants de la plante récoltés (tiges, grains, tubercules, ...) en classes tissulaires (fibres) et biochimiques (lipides, polysaccharides, saccharose, protéines) générant des produits agricoles intermédiaires de première génération. Ces derniers peuvent être ensuite, si nécessaire, fonctionnalisés par différents procédés, mécaniques, chimiques ou biologiques, afin d'obtenir des produits non alimentaires et alimentaires intermédiaires de deuxième génération. Ces produits intermédiaires sont ensuite directement utilisés ou formulés selon les besoins des industriels finaux (matériaux, carburants, détergences, lubrifiants, ...).

Remarque : l'analogie avec la raffinerie de pétrole réduit la bioraffinerie aux seules opérations de fractionnement.

*Ou, définition plus large*

Des industries bio-intégrées, produisant à partir de la biomasse et d'une variété de technologies, à la fois des produits chimiques, des biocarburants, de l'énergie, des agromatériaux (incluant les fibres végétales) et des aliments et ingrédients alimentaires.

Source : Consortium Biorefiner Euroview

### **Biosynthèse (biosynthesis)**

Production d'une substance chimique par un organisme vivant au cours de son métabolisme, résultant d'une série de bioconversions généralement opérées par l'intermédiaire d'enzymes.

### **Biotechnologie (biotechnology)**

Ensemble des méthodes et techniques issues principalement des sciences de la vie et qui utilisent des organismes vivants (cellules, bactéries, levures, ...) ou leurs composants cellulaires (gènes, enzymes, ...), recombinés ou non, pour produire des biens ou des services pour la recherche et l'industrie

Les biotechnologies vertes concernent les végétaux, les blanches les enzymes et les microorganismes.

*Ou*

Mise en œuvre de matériel biologique pour une production de biens et de services,

Source : OCDE, 1980.

### **Biotechnologies blanches (white biotechnology)**

Elles se caractérisent par l'emploi de systèmes biologiques pour la fabrication, la transformation ou la dégradation de molécules grâce à des procédés enzymatiques ou de fermentation dans un but industriel. Elles sont utilisées comme alternatives aux procédés chimiques classiques et transforment des matières premières renouvelables.

### **Biotechnologies vertes ou biotechnologies végétales (green biotechnology)**

Elles comprennent les nouvelles techniques de la biologie moléculaire et ses applications génétiques. Elles couvrent diverses technologies telles que la manipulation et le transfert de gènes, le typage de l'ADN et le clonage de gènes végétaux et animaux.

Les biotechnologies vertes s'appliquent aux domaines de l'agriculture et de l'agroalimentaire.

### **Bois énergie ou bois de feu ou bois de chauffage**

Désigne un bois destiné à la combustion ou à la carbonisation. (source MAP, 2009).

### **Bois d'industrie**

Comprend le bois de trituration et les autres bois d'industrie.(source MAP, 2009).

### **Bois d'oeuvre**

Bois destiné au sciage, au tranchage, au déroulage ou à la fabrication de merrains ou des bois sous rails. (source MAP, 2009).

### **Bois de trituration**

Bois destiné à être déchiqueté ou dissous pour la fabrication de pâte à papier ou de panneaux de particules ou de fibres. (source MAP, 2009).

### **BtL biomass to liquid**

Technologie permettant de transformer la biomasse en un carburant synthétique liquide exempt de soufre, de paraffine et de composés aromatiques.

### **Chimie verte (green chemistry)**

Nouvelle approche de la chimie fondée sur douze règles qui visent à réduire la production de substances non désirées dans la conception, la production et l'utilisation des produits chimiques :

1 – Prévention ; 2 - Économie d'atomes ; 3 - Synthèses chimiques moins toxiques ; 4 - Conception de produits chimiques plus sécuritaires ; 5 - Solvants et auxiliaires plus sécuritaires ; 6 - Amélioration du rendement énergétique ; 7 - Utilisation de matières premières renouvelables ; 8 - Réduction de la quantité de produits dérivés ; 9 - Catalyse avec les procédés non stochiométriques ; 10 - Conception de substances non persistantes ; 11 - Analyse en temps réel de la lutte contre la pollution ; 12 - Chimie essentiellement sécuritaire afin de prévenir les accidents

Sources : Anastas, P. T.; Warner, J. C. Green Chemistry: Theory and Practice, Oxford University Press: New York, 1998, p.30

<http://www.epa.gov/greenchemistry/pubs/principles.html> ; <http://www.epa.gov/greenchemistry/>.

### **Cogénération (co-generation)**

Utilisation de la chaleur résiduaire de la production d'électricité (échappement des turbines à gaz, par exemple) à des fins industrielles ou de chauffage urbain.

### **Commodité (commodity)**

Produit chimique à faible valeur intrinsèque et commercialisé en vrac (bulk).

### **Co-produit (coproduct)**

Un co-produit (végétal ou animal) est un produit non principal issu de manière intentionnelle et inévitable d'une opération de déconstruction / séparation / fonctionnalisation et porteur de valeur ajoutée potentielle, après sa future transformation : il a des caractéristiques régulières et relativement génériques qui peuvent être garanties dans un cahier des charges, et sa disponibilité est prévisible et contractualisable. Il est créée au cours du même processus de fabrication et en même temps que le produit principal. Son prix se positionne par rapport à un prix de marché régional ou national, voire international. Par exemple, la paille est un co-produit.

Voir aussi déchet et sous-produit.

### **Composés organiques volatils COV (Volatile Organic Compounds, VOC)**

Composés organiques volatils, d'origine biologique (origine naturelle) ou anthropique (origine humaine), considérés comme des polluants.

### **Déchets**

Un déchet (sous entendu « vert », dans le contexte de ce document) est un produit variable dans le temps en quantité et en qualité ; il peut contenir des impuretés, dont des inhibiteurs des réactions biologiques, de façon incontrôlée et fortement variable ; dans cette classe se trouvent par exemple les déchets ménagers. Une matière première de ce type, si elle est gérée telle quelle, n'est compatible qu'avec des procédés biologiques robustes (pour supporter les à coups de composition et de qualité) et à long temps de séjour (pour supporter les à coups en quantité) : par exemple la méthanisation. A priori, un déchet représente un coût à assumer par celui qui le génère.

Voir aussi sous-produit et co-produit.

### **Développement durable (sustainable development)**

Développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. Le développement durable préconise la mise en place d'un développement économiquement efficace (générant du profit), socialement équitable (diminuant les inégalités) et écologiquement soutenable (respectueux des ressources naturelles).

Source : Gro Harlem Brundtland. Commission mondiale sur l'environnement et le développement, 1987

### **Eco-conception (sustainable design)**

Ingénierie technique visant la production de biens de consommation conçus, dès l'amont, pour limiter leurs impacts environnementaux, et disponibles dans les conditions techniques et économiques du moment.

*Ou*

L'écoconception est une démarche préventive qui se caractérise par la prise en compte de l'environnement lors de la phase de conception ou d'amélioration d'un produit.

L'objectif de cette démarche est d'améliorer la qualité écologique du produit, c'est-à-dire réduire ses impacts négatifs sur l'environnement tout au long de son cycle de vie, tout en conservant sa qualité d'usage.

Source : ADEME

### **Economie d'atomes (ou économie atomique ou utilisation atomique) (atom economy)**

L'utilisation atomique est définie comme le rapport de la masse molaire du produit recherché sur la somme des masses molaires de tous les produits qui apparaissent dans l'équation stœchiométrique. Si les sous-produits de la réaction ne sont pas tous identifiés, alors la conservation de la matière permet de remplacer le dénominateur par la somme des masses molaires de tous les réactifs.

Source : Trost B.M. « The atom economy, a search for synthetic efficiency » Science, 254 (1991) 1471

measure of the efficiency with which atoms are incorporated into the desired product; a desirable reaction would be one with a high yield of product and little or no production of waste.

### **Ecotoxicité :**

Propriété d'une substance de provoquer des effets néfastes sur les organismes vivants ou leur physiologie (effet au niveau biochimique) et leur organisation fonctionnelle (écosystème). Pour l'homme ou les mammifères, on parle plutôt de toxicité (humaine ou animale).

**Efficienc e (effectiveness)**

Exprime l'adéquation entre ce que l'on fait effectivement et ce que l'on voulait faire (but) : l'effet est rapporté à la finalité.

**Efficacité (efficiency)**

Exprime l'adéquation entre ce que l'on a fait ou produit (le résultat) et ce que l'on a consommé ou utilisé pour le faire (la ressource). L'effet du moyen est rapporté à sa cause (interprétation mécaniciste ou causaliste), sans égard aux finalités du système considéré. L'efficacité énergétique est le rapport du rendement énergétique d'un processus de transformation ou d'un système à son intrant énergétique

**Empreinte carbone (carbon footprint)**

L'empreinte carbone d'un produit est sa contribution, sur tout son cycle de vie, aux émissions CO2 et aux autres gaz à effet de serre.

Source : United Nations Carbon Balance Organization, 2008

**Energie primaire (primary energy)**

Consommation finale totale plus la consommation nécessaire à la production de cette énergie. Sont considérées les ressources énergétiques avant transformation : houille, lignite, gaz naturel, pétrole brut, rayonnement solaire, énergie hydraulique, énergie du vent, énergie nucléaire. Elle permet de mesurer le taux d'indépendance énergétique national et également d'additionner entre elles les consommations d'énergies différentes. Pour les combustibles, et par convention, on a la même valeur en énergie primaire et en énergie finale. Pour l'électricité, 1 kWh en énergie finale équivaut à 2.58 kWh en énergie primaire.

Source : <http://www2.ademe.fr/>

*Ou*

L'énergie primaire est l'ensemble des produits énergétiques non transformés, exploités directement ou importés. Ce sont principalement le pétrole brut, les schistes bitumineux, le gaz naturel, les combustibles minéraux solides, la biomasse, le rayonnement solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie du vent, la géothermie et l'énergie tirée de la fission de l'uranium. Source : INSEE

Dans le cas des matériaux l'énergie potentiellement contenue dans le matériau s'ajoute à l'énergie consommée pour son élaboration.

**Énergies renouvelables (renewable energy)**

Par convention, l'expression ENRt (ou ENR) s'applique aux énergies renouvelables autres que l'électricité hydraulique, éolienne, photovoltaïque et géothermique (haute enthalpie). Les ENRt comprennent, d'une part, des énergies non commercialisées, telles que le bois de chauffage ramassé ou " vendu au noir ", d'autre part, le bois de chauffage commercialisé, les déchets urbains et industriels, la géothermie valorisée sous forme de chaleur, le solaire thermique actif, les résidus de bois et de récoltes, les biogaz, les biocarburants et les pompes à chaleur.

<http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/methodef.htm>

*ou*

Ensemble des techniques de production d'énergie dont la mise en œuvre n'entraîne pas l'extinction de la ressource initiale et est renouvelable en permanence à l'échelle de temps humaine.

**Energie alternative (Alternative energy)**

Energie primaire issue de sources autres que celles de carbone fossile

### **Fibre (Fiber)**

Les fibres sont des formations élémentaires végétales, d'aspect filamenteux, se présentant généralement sous forme de faisceaux. Elles sont constituées des parois épaisses de cellules mortes qui assurent les fonctions de soutien des différents éléments aériens (tiges, pétioles, nervures des feuilles, ...), ou de renforts mécaniques de parties souterraines (racines).

Le terme fibre décrit aussi les structures spécifiques isolées des plantes, quelquefois organisées en faisceaux qui sont issues de procédés de fractionnement chimiques, mécaniques, ou enzymatiques, seuls ou en combinaisons. Ces fibres sont alors principalement utilisées pour des applications matériaux au sens large (papier, composites, .etc...)

### **Fischer-Tropsch**

Procédé de production de carburants par voie synthétique à partir de matières premières riches en carbone et en hydrogène.

La technologie comprend trois étapes :

1. La charge subit un vaporéformage (une gazéification dans le cas du méthane) qui permet de la transformer en « gaz de synthèse » : un mélange CO + H<sub>2</sub>.
2. Le gaz de synthèse est transformé en hydrocarbures paraffiniques sous l'action d'un catalyseur. Cette étape (synthèse de Fischer-Tropsch) est au cœur du procédé de chaque filière, quelle que soit la matière première de départ.
3. Les hydrocarbures formés subissent un hydrocraquage qui permet l'obtention des carburants classiques.

### **Gaz à effet de serre (greenhouse gas)**

Les gaz à effet de serre sont les composants gazeux de l'*atmosphère*, naturels et *anthropiques*, qui absorbent et émettent des radiations à des longueurs d'ondes spécifiques dans le spectre du *rayonnement infrarouge* émis par la surface de la terre, l'*atmosphère*, et les nuages. Cette propriété cause l'*effet de serre*. La vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), le *dioxyde de carbone* (CO<sub>2</sub>), l'*oxyde d'azote* (N<sub>2</sub>O), le *méthane* (CH<sub>4</sub>), et l'*ozone* (O<sub>3</sub>) sont les principaux gaz à effet de serre dans l'*atmosphère* de la terre. Il existe également des gaz à effet de serre résultant uniquement des activités humaines, tels que les *halocarbures* et autres substances contenant du chlore et du bromure, qui sont réglementés par le *Protocole de Montréal*. Outre CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, et CH<sub>4</sub>, le *Protocole de Kyoto* réglemente l'*hexafluorure de soufre* (SF<sub>6</sub>), les *hydrofluorocarbures* (HFC), et les *perfluorocarbures* (PFC), qui sont eux aussi des gaz à effet de serre.

Source : GIEC, 2008.

### **Génie métabolique**

Amélioration des activités cellulaires par modification des fonctions métaboliques quelles soient enzymatiques, d'échange et de régulation de la cellule, par génie génétique.

### **Génie enzymatique**

Le génie enzymatique englobe la conception de nouvelles fonctions enzymatiques ou optimisation des propriétés enzymatiques par modification de la séquence primaire des protéines et la mise en œuvre optimale dans des systèmes de production.

### **Génie des procédés (Process engineering)**

Concevoir, calculer, dessiner faire construire et faire fonctionner l'appareillage dans lequel on réalisera une réaction quelconque à l'échelle industrielle.

Source : J. Cathala.

*Ou*

Le Génie des Procédés est une science qui permet de concevoir, réaliser et faire fonctionner les installations industrielles de transformation (physique, chimique ou biologique) de la matière et de l'énergie en produits finis.

Source : [iutmrs.u3mrs.fr/Dpts/Gcgp/Fiche%20GCGP.pdf](http://iutmrs.u3mrs.fr/Dpts/Gcgp/Fiche%20GCGP.pdf)

### **Génomique fonctionnelle (functional genomic)**

Ensemble de techniques pour aborder l'expression du génome et son intégration dans l'élaboration des grandes fonctions métaboliques. Elle repose en particulier sur la mutagenèse insertionnelle et le séquençage partiel des gènes exprimés.

Source : J-F Morot-Gaudry, P. Lea, J-F Briat, Functional Plant Genomics, 2007.

*Ou*

Partie de la génomique qui étudie la fonction des gènes, leur régulation et les interactions de leurs produits d'expression, ARN et protéines.

Ces études nécessitent l'analyse simultanée du transcriptome et du protéome, dans diverses conditions physiologiques et sur divers génotypes sauvages et mutants ainsi que l'intégration des données obtenues. Source : JO DU 23-11-2006

### **Génomique structurale (structural genomic)**

Ensemble de techniques pour aborder l'organisation physique du génome sous forme de chromosomes.

Source : J-F Morot-Gaudry, P. Lea, J-F Briat, Functional Plant Genomics, 2007.

*Ou*

Partie de la génomique qui étudie la structure physique et l'organisation du génome et du protéome. JO DU 23-11-2006

### **Gestion durable des forêts**

« Gestion et utilisation des forêts d'une manière et à une intensité telles qu'elles maintiennent leur biodiversité, leur productivité, leur capacité de régénération, leur vitalité et leur potentiel à satisfaire, maintenant et dans le futur, les fonctions écologiques, économiques et sociales pertinentes, aux niveaux local, national et global, et sans causer de dommages à d'autres écosystèmes » (déclaration H1 d'Helsinki).

### **Hémisynthèse**

Synthèse d'une molécule réalisée à partir de biomolécules possédant déjà une partie de la molécule visée. L'hémisynthèse est définie par opposition à la synthèse totale.

### **Impact environnemental**

Ensemble des modifications de l'environnement, qu'elles soient négatives ou positives, dues à un organisme ou à un produit. (ISO 14 001)

### **Ingénierie réverse (reverse engineering)**

A pour objectif d'explorer les solutions nouvelles (itinéraires technologiques) pour des objets (aliments et/ou produits bio-sourcés) dont les caractéristiques sont définies qualitativement par des propriétés

identifiées (sensoriel, propriété mécanique, praticité, coûts (humain, énergie, environnemental,...), image et culture, sécurité). Les déterminismes de ces caractéristiques sont inter-reliées par des mécanismes sous jacents (évolutions biologiques, interactions des constituants, couplages de réactions et transferts), qui sont modulables par des choix technologiques (formulation et procédés), génétiques, des itinéraires techniques.

### **Itinéraire technologique (process management)**

Combinaison, de manière coordonnée, de différents procédés mis en œuvre à partir d'une ou plusieurs matières premières agricoles. Chaque matière première peut donc directement, ou par le biais de ses fractions, intervenir dans différents itinéraires technologiques.

### **Jachère**

Terre labourable que l'on laisse temporairement reposer en ne lui faisant pas porter de récolte (jachère dite « traditionnelle » ou « agronomique »). Avec la réforme de la PAC de 1992, apparaît la notion de « jachère aidée » (dite aussi « jachère institutionnelle » ou « gel ») : pour avoir droit aux aides sur les COP (céréales, oléagineux et protéagineux), les agriculteurs ayant une production annuelle théorique de plus de 92 tonnes de COP doivent mettre en jachère une partie de leurs terres ; les surfaces ainsi gelées donnent droit à une aide à l'hectare. Cette jachère aidée peut ne pas porter de récolte (comme la jachère traditionnelle) ; mais elle peut également recevoir des cultures destinées à des fins non alimentaires (dont l'exemple type est le colza pour diester). Elle est alors appelée « jachère industrielle » ou « jachère non alimentaire », bien qu'elle n'ait de jachère que le nom. (source MAP, 2009).

### **Kérosène (aviation fuel, avgas)**

Distillat de pétrole situé entre l'essence et le gasoil. Il doit distiller au moins 65 % de son volume avant 250°C. Sa densité relative est d'environ 0,80 et son point d'éclair égal ou supérieur à 38°C.

### **Lubrifiant**

Un lubrifiant a pour fonctions de réduire le frottement d'une pièce par rapport à une autre, d'éviter les contacts métal-métal, de permettre l'usinage mécanique, ou bien encore d'assurer des transferts thermiques dans des ensembles mécaniques en mouvement. Cependant, le terme lubrifiant est attribué aussi à des produits apparentés qui sont identiques dans la composition, la fabrication et les propriétés, mais servent à la transmission de la force, à la conduction de la chaleur, au refroidissement en tant qu'huiles isolantes, produits anticorrosion ou de produits auxiliaires pour les processus industriels sous le nom de « huiles de procédé ». Les lubrifiants sont indispensables pour assurer l'efficacité et la durée de vie de tout équipement mécanique, et s'inscrivent ainsi complètement dans une logique de durabilité.

### **Modélisation (modeling)**

Représentation simplifiée et formalisée d'un phénomène ou d'un système, élaborée à des fins d'exploration de la réalité, de prévision ou d'aide à la décision.

Source : collège direction Inra.

### **Modèle biomimétique**

Reproduction in vitro des interactions et des mécanismes hiérarchiques d'association entre biopolymères, pour conduire à la formation d'édifices supramoléculaires d'ordre et de mobilité déterminés. Les approches cinétique, thermodynamique et structurale s'appliquent entièrement à ces systèmes biologiques et débouchent sur une compréhension de la structure du vivant.

### **Nanotechnologies (nanotechnology)**

Technological developments on the nanometer scale, usually 0.1 to 100 nm (1/1,000  $\mu\text{m}$ , or

1/1,000,000 mm).

### **Naphta**

Distillat du pétrole, le naphta est un intermédiaire entre l'essence et le kérosène. Il fait partie des produits dits légers en raison de la faible masse moléculaire des hydrocarbures qui le compose.

### **Organisme génétiquement modifié (OGM) (genetically modified organism)**

Organisme dont le matériel génétique a été modifié par l'introduction d'un ou de plusieurs gènes étrangers afin de lui conférer une caractéristique nouvelle ou améliorée qui sera transmissible à la descendance. Le transfert de gènes peut s'effectuer entre organismes de la même espèce, mais il s'agit le plus souvent d'un transfert entre espèces différentes.

Bien qu'un organisme puisse être modifié génétiquement de façon naturelle ou par intervention de l'humain, les termes organisme transgénique et organisme génétiquement modifié, de même que l'abréviation de ce dernier (OGM) font plus spécifiquement référence aux organismes modifiés en laboratoire.

Source : OQLF

### **Pouvoir calorifique inférieur, PCI**

Quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée non condensée et la chaleur non récupérée.

### **Pouvoir calorifique supérieur, PCS**

Quantité de chaleur maximale dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, y compris la chaleur de condensation de la vapeur d'eau produite lors de la combustion

Nota : dans la pratique, la différence entre PCS et PCI est de l'ordre de grandeur suivant : Gaz naturel : 10%, Gaz de pétrole liquéfié : 9%, Autres produits pétroliers : 7-8%, Combustibles solides : 2-5%

### **Produit bio-sourcé (bio-based) ou bioproduit (bioproduct)**

Produits énergétiques et industriels issus du végétal hors des domaines de l'alimentaire et de la santé et dont les applications portent sur l'énergie (biofuels), la chimie organique et les matériaux biosourcés, fabriqué directement ou indirectement à partir de biomasse. Il peut s'agir de produits nouveaux ou novateurs ou de produits traditionnels.

### **Production intégrée (integrated crop production)**

Approche globale de l'utilisation du sol pour la production agricole qui cherche à réduire l'utilisation d'intrants extérieurs à l'exploitation (énergie, produits chimiques) en valorisant au mieux les ressources naturelles et en mettant à profit des processus naturels de contrôle et de régulation. (Viaux, 1999).

La logique de prévention repose sur une approche systémique par la création de conditions défavorables aux pathogènes et l'utilisation du potentiel d'autorégulation de l'éco-système, par combinaison de variétés résistantes, ajustement de la fertilisation azotée, lutte biologique, diversification des cultures, introduction de nouvelles cultures.

### **Produits de substitution aux céréales**

Déchets de l'industrie agroalimentaire ou produits amylacés, parmi lesquels on trouve le manioc et le corn gluten feed, qui entrent dans la composition des aliments du bétail. (source MAP, 2009).

### **Puits de carbone**

Les puits sont des processus, des activités ou des mécanismes, naturels ou artificiels, qui éliminent de l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre. (source MAP, 2009).



## **REACH**

Circulaire REGULATION (EC) No 1907/2006 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)

*Recyclable Package – A package that can be diverted from the wastestream through available processes or programs, and can be collected, processed and returned to be used as a raw material or product.*

## **Risque**

Mesure de la probabilité qu'une source de danger donnée ait des effets néfastes sur les organismes vivants, la santé, les biens et/ou l'environnement (US EPA).

## **Solvant**

Un solvant est un liquide qui a la propriété de dissoudre et de diluer d'autres substances sans les modifier chimiquement et sans se modifier lui-même. Les solvants sont utilisés lors des réactions chimiques au niveau industriel ou dans la mise en œuvre des formulations finales. Environ 300 molécules sont concernées, pour des applications très variées, depuis les peintures (principal poste), les adhésifs, l'imprimerie, jusqu'aux formulations de nettoyage.

## **Sous-produit**

Un sous-produit (végétal ou animal) est un produit ayant des caractéristiques peu variables, qui peuvent être décrites dans un cahier des charges, et dont la quantité est régulière dans le temps, éventuellement par campagne. Sa disponibilité peut être très locale (par exemple, résidus d'une conserverie, rétentats d'opération de séparation d'une laiterie, etc...). Un sous-produit peut faire l'objet d'un contrat de commercialisation, mais il est vendu quasiment au prix de revient, et souvent sur la base d'un prix local. Les sous-produits ont notamment des débouchés en alimentation animale, où ils sont d'ailleurs négociés en fonction de leur composition élémentaire (glucides, protéines, lipides) et non en fonction de leurs propriétés fonctionnelles.

Voir aussi déchets et co-produits.

## **Synthon (building block, synthon)**

Entité moléculaire mise en œuvre dans la synthèse d'une molécule afin d'y introduire un motif structural donné.

Note : Le terme trouve son origine dans la méthode dite de l'« analyse rétrosynthétique », qui consiste à concevoir un chemin de synthèse d'une molécule en la considérant comme la combinaison de fragments plus simples, réels ou hypothétiques, les synthons, qui sont traduits ensuite en réactifs servant de points de départ à la synthèse réelle, souvent une synthèse combinatoire.

Source : Journal officiel du 22 septembre 2005

## **Système (system)**

Ensemble d'éléments en interaction dynamique organisé en fonction d'un but qui évolue dans le temps. Les caractéristiques fondamentales sont les interactions entre les éléments, l'organisation explicite et/ou implicite, la finalité. Un système a des caractéristiques propres qui ne dépendent pas des individus qui la composent. Il existe une qualité émergente: le tout est différent de la somme des parties.

## **Système agricole (farming system)**

Désigne de manière globale, les systèmes de culture, les systèmes d'élevage, les itinéraires techniques

appliqués à une culture ou à un lot d'animaux, les systèmes fourragers, les systèmes de production, mais aussi l'organisation spatiale, les interactions et les coordinations qui existent entre ces divers systèmes au niveau des territoires

Remarque : système de culture = cropping system.

### **Tensioactif**

Les tensioactifs sont des composés qui modifient la tension superficielle entre deux surfaces. Ce sont des molécules amphiphiles, c'est-à-dire dotée d'une tête polaire, hydrophile (ou lipophobe), attirant l'eau, et d'une longue chaîne hydrocarbonée, apolaire, hydrophobe (ou lipophile). L'extrémité hydrophile est miscible à l'eau tandis que l'extrémité lipophile de la molécule est miscible au solvant apolaire. Les molécules tensioactives peuvent donc s'adsorber aux différentes interfaces entre l'eau et les autres corps, leur conférant les propriétés suivantes : pouvoir mouillant, émulsifiant, adoucissant, dispersant ou détergent, selon leur structure.

### **Territoire**

Terme polysémique dont l'acception retenue est : zone géographique homogène et cohérente de fonctionnement.

### **Tonne équivalent pétrole (TEP) (ton of oil equivalent, TOE)**

Unité d'énergie, correspondant à l'utilisation de 1 tonne de pétrole, souvent utilisée pour exprimer la production ou la consommation d'énergie d'un pays.

Une TEP correspond à une énergie de 41,85 milliards de joules, soit 11 626 kilowattheures ; c'est aussi l'énergie dégagée par 1,615 tonne de houille.