



Les bioraffineries

Paul Colonna, Agnès Kammoun, Xavier Montagne, Christian Sales,
Jean-Francois Morot-Gaudry, Thierry Chardot, Georges Pelletier, Joël
Abacassis, Violaine Athes-Dufour, Jean-Luc Baret, et al.

► To cite this version:

Paul Colonna, Agnès Kammoun, Xavier Montagne, Christian Sales, Jean-Francois Morot-Gaudry, et al.. Les bioraffineries. Atelier de Réflexion Prospective VegA. 2013, 47 p. hal-04399691

HAL Id: hal-04399691

<https://hal.inrae.fr/hal-04399691>

Submitted on 17 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

Introduction	9
Contributeurs	9
1. Résumé	12
2. Objectifs	13
3. Expression des besoins	19
3.1. Attentes et besoins en énergie, synthons et en matériaux biosourcés	19
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
3.2. Principales familles biochimiques répondant à ces besoins	42
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
3.3. Conclusions	81
4. Exploration de la diversité des solutions végétales	81
4.1. Identification des végétaux où ces structures sont présentes	82
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
4.2. Optimisation des espèces déjà exploitées	88
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
4.3. Utilisation d'espèces végétales encore inexploitées	112
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>Rhodophantae</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>Rhodophantae</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
4.4. Stratégies d'amélioration génétique	153
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
5. Conception, évaluation et mise en perspective de systèmes de production durables	178
5.1. Etat des lieux des systèmes considérés et des connaissances associées	179
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
5.2. Questions transversales	236
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
5.3. Pistes de recherche	240
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
5.4. La bioraffinerie	249

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
5.5. Analyses socio-économiques : des systèmes de production aux marchés internationaux	293
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
5.6. – Analyses de cycles de vie et de bilans environnementaux	326
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
5.7. Etude prospective sur les usages non alimentaires de la biomasse végétale : les scénarios d'évolution à 2050	351
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
6. Conclusions	397
7. Lexique	397

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 **Chantreau** (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 **Cadoret** (IFREMER), Claudine **Campa** (IRD), Michel **Chauvet** (Agropolis), Paul **Colonna** (INRA, coordinateur ARP VegA), Laurent **Cournac** (CEA), Alexandre **De Kochko** (IRD), Bruno **de Reviers** (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), **Benoît St-Pierre** (Université de Tours), **Jean Tayeb** (INRA), **Evelyne Téoulé** (INRA), **Brigitte Thomasset** (UTC), **Jean-François Trontin** (FCBA)

Chapitre 9 : **Les bioraffineries**

Joël Abacassis (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 Bouvart** (IFP), **Michel Cariolle** (ITB), **Claire Cornillier** (FCBA), **Fabien Ferchaud** (INRA), **Benoît 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)

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)

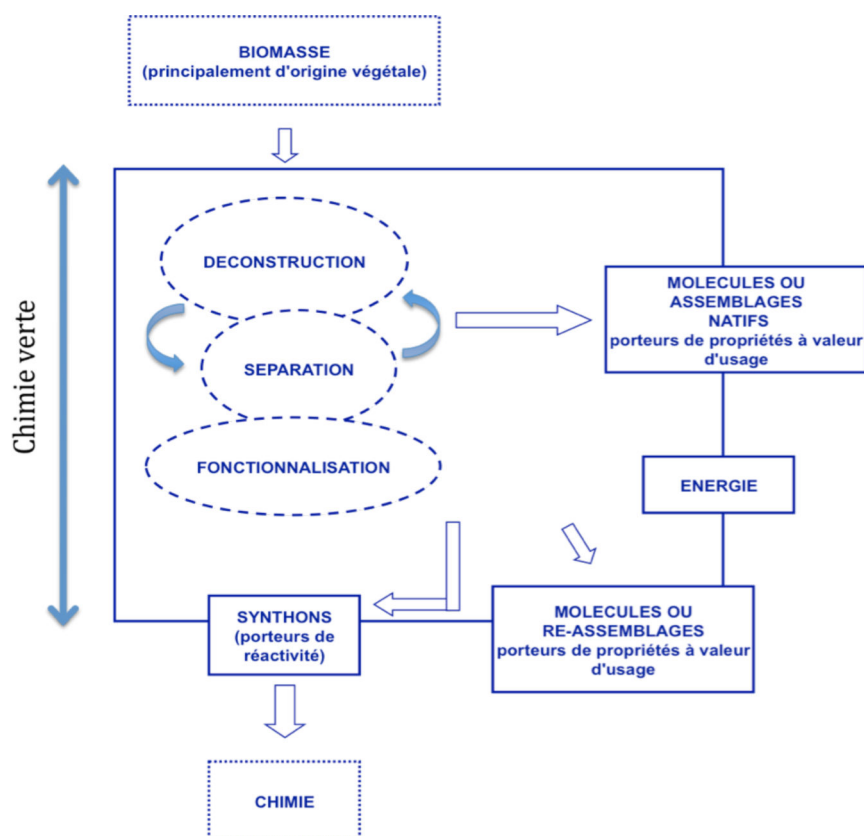


Figure 20 : Représentation schématique de la bioraffinerie

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 Warner⁵⁹⁴.

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,...	

⁵⁹⁴ 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.

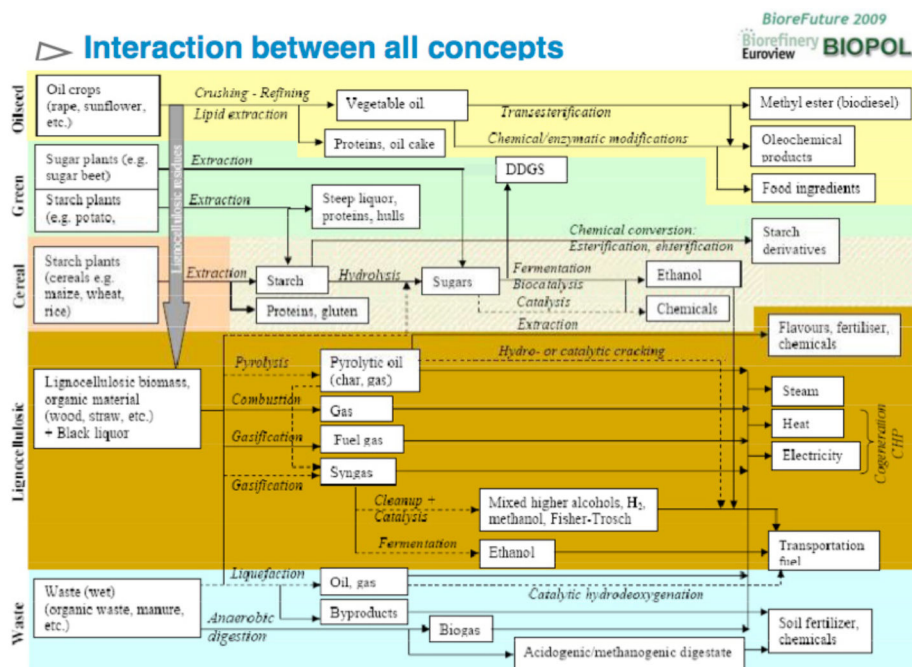


Figure 21 : Interactions entre les différents types de bioraffineries

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 Véga (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

[illegible]

253

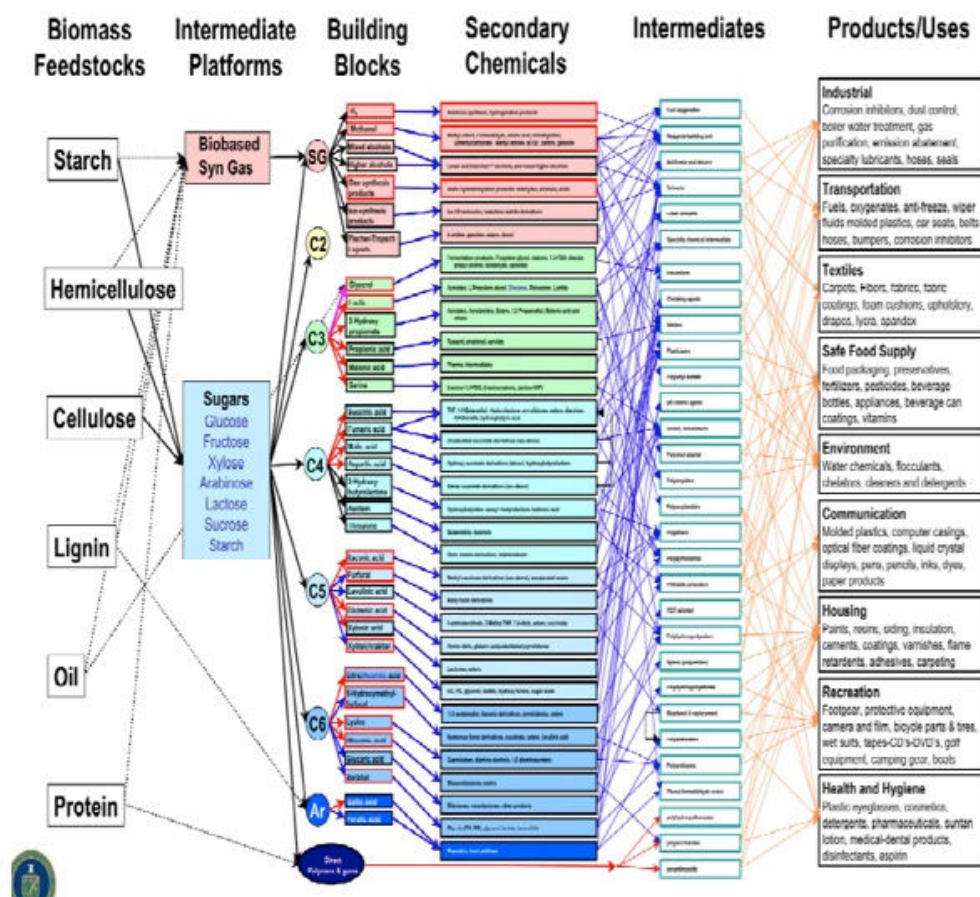


Figure 23 : Complexité des flux et interactions au sein d'une bioraffinerie

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 , alcoolise	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 gommés 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^{595,596,597}.

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,...)^{598,599}. 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^{600,601}. Ainsi on considère que la réduction granulométrique de la matière première consomme plus du tiers de l'énergie nécessaire à la conversion en bioéthanol⁶⁰¹. De même, pour l'obtention d'une granulométrie identique, la dépense énergétique est 70 % plus importante par broyage que par explosion à la vapeur⁶⁰². 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^{603,604} (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,...)^{599,601}. Les progrès réalisés dans

⁵⁹⁵ Schell D.J., Hardwood C. 1994. Milling of lignocellulosic biomass : results of pilot scale testing. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 45/46, 159-168.

⁵⁹⁶ 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.

⁵⁹⁷ 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

⁵⁹⁸ Sun Y., Cheng J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production : a review. *Bioresource Technology* 83, 1-11.

⁵⁹⁹ 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.

⁶⁰⁰ 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

⁶⁰¹ 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.

⁶⁰² 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.

⁶⁰³ 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

⁶⁰⁴ 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-fine⁶⁰⁵ 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^{606,607} 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 électrostatique⁶⁰⁸. 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^{608,609,610,611,612,613}. Taherzadeh et Karimi⁶¹⁴ 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

⁶⁰⁵ 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.

⁶⁰⁶ 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.

⁶⁰⁷ 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.

⁶⁰⁸ 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.

⁶⁰⁹ 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.

⁶¹⁰ Galbe, M. and G. Zacchi (2002). A review of the production of ethanol from softwood. *Applied Microbiology and Biotechnology* 59(6): 618-628.

⁶¹¹ Galbe, M. and G. Zacchi (2007). Pretreatment of lignocellulosic materials for efficient bioethanol production. *Biofuels*. Berlin, SPRINGER-VERLAG BERLIN. 108: 41-65.

⁶¹² Demirbas (2005). Bioethanol from cellulosic materials: A renewable motor fuel from biomass. *Energy Sources* 27(4): 327-337.

⁶¹³ Sun Y., Cheng J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production : a review. *Bioresource Technology* 83, 1-11.

⁶¹⁴ 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 lignocellulosique⁶¹⁵.

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 utilisés⁶¹⁶. 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 H₂SO₄ ou SO₂⁶¹⁷.

- 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^{618, 619}.

- 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^{620,621}. 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)^{622,623}. 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 prohibitif⁶²⁴.

- Les prétraitements alcalins, qui utilisent de la soude, de la chaux, de l'ammoniaque⁶²⁵. 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

⁶¹⁵ Carrère, H. 2008. Co-traitements physico-chimiques. Chapitre 11. In La méthanisation, R. Moletta (ed.), Editions Tec & Doc Lavoisier. 251-300.

⁶¹⁶ Varga, E.; Reczey, K.; Zacchi, G. 2004. Optimization of steam pretreatment of corn stover to enhance enzymatic digestibility. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 113, 509-523.

⁶¹⁷ 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.

⁶¹⁸ 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

⁶¹⁹ 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

⁶²⁰ 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.

⁶²¹ 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.

⁶²² Palmqvist E, Hahn-Hägerdal B (2000) Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: inhibitors and mechanisms of inhibition, *Bioresource Technology* 74:25-33

⁶²³ 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

⁶²⁴ Dideren 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.

⁶²⁵ 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 bois⁶²⁶. Les prétraitements utilisant la chaux sont particulièrement adaptés aux résidus agricoles (eg. la paille de blé ou les bois durs tels que le peuplier^{627,628}. L'ammoniaque (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)⁶²⁹. Le procédé AFEX (Ammonia fibre explosion) est opéré à pression élevée (> 3 MPa) et température modérée (< 100°C)^{630,631}. Les hémicelluloses sont dégradées en oligomères et sont déacétylées⁶³², 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^{633,634}.

- 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^{635,636}. L'absence de furfural ou d'hydroxyméthyl furfural a été soulignée par Saha et Cotta⁶³⁸.

- 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°C⁶³⁷. Le procédé est exothermique et devient autosuffisant du point de vue de la chaleur une fois la réaction amorcée⁶³⁸. Les hémicelluloses sont clivées en monomères, la lignine est clivée et oxydée et la cellulose est partiellement dégradée⁶³⁹.

- 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 lignocellulosiques⁶⁴⁰.

- L'explosion au CO₂ supercritique en présence d'eau a permis d'améliorer la digestibilité enzymatique de bois doux et durs^{641,642}. La délignification peut être améliorée par l'utilisation de cosolvants (éthanol-eau ou acide acétique-eau)⁶⁴³.

⁶²⁶ Galbe, M. and G. Zacchi (2007). Pretreatment of lignocellulosic materials for efficient bioethanol production. *Biofuels*. Berlin, Springer-Verlag Berlin 108: 41-65.

⁶²⁷ Sierra, R., Granda, C., Holtzapple, M.T. 2009. *Biotechnology Progress* 25(2):323-332.

⁶²⁸ Chang, V.S., Nagwani, M., Kim, C.H. et al. 2001. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 94(1) :1-26.

⁶²⁹ Lyer, P.V., Wu, Z.W., Kim, S.B. et al. 1996. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 57(8):121-132.

⁶³⁰ Holtzapple, M.T., Lundeen, J.E., Sturgis, R. et al. 1992. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 34(5):5-21.

⁶³¹ Teymouri, F., Laureano-Perea, L. Alizadeh, H. et al. *Bioresource Technology* 96(18):2014-2018.

⁶³² Gollapalli, L.E., Dale, B.E., Rivers, D.M. 2002. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 98:23-35.

⁶³³ Hsu, T.A., Himmel, M., Schell, D. et al. 2002. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 57(8):3-18.

⁶³⁴ Belkacemi, K. Turcotte, G., de Halleux, D. et al. 1998. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 70(2):441-462.

⁶³⁵ 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

⁶³⁶ 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

⁶³⁷ Varga, E.; Klinker, 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.

⁶³⁸ Schmidt, A.; Thomsen, A. 1998. Optimization of wet oxidation pretreatment of wheat straw. *Bioresource Technol.*, 64, 139-151.

⁶³⁹ 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

⁶⁴⁰ Vidal, P.F.; Molinier, J. 1988. Ozonolysis of Lignin – Improvement of in vitro digestibility of poplar sawdust. *Biomass*, 16, 1-17

⁶⁴¹ 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.

⁶⁴² Kim, K.H.; Hong, J. 2001, Supercritical CO₂ pretreatment of lignocellulose enhances enzymatic cellulose hydrolysis. *Bioresource Technol.* 77, 139-144

⁶⁴³ 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, esthers, cétones, glycols, acides organiques, phénols, éthers) et d'eau⁶⁴¹. 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 organique⁶⁴⁴.

- Des prétraitements par des liquides ioniques ont été récemment mentionnés pour solubiliser la lignine^{645, 646} ou pour améliorer la production de biohydrogène⁶⁴⁷.

- 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-peroxydases⁶⁴⁸. Ces enzymes sont produites par des champignons (brown-, soft- et white-rot fungi)^{650, 649, 650}. Le prétraitement par des white-rot fungi conduit à la dégradation sélective de la lignine et améliore l'hydrolyse enzymatique de la paille de riz⁶⁵¹. 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 lentes⁶⁵².

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'être⁶⁵³. 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

⁶⁴⁴ Pan, X.; Arato, C.; Gilkes, N.; Gregg, D.; Mabey, 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.

⁶⁴⁵ 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.

⁶⁴⁶ 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

⁶⁴⁷ 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.

⁶⁴⁸ Kirk, T.K. and Farrell, R.L., (1987). Enzymatic combustion: the microbial degradation of lignin. Ann. Rev. Microbiol. 41: 465-505.

⁶⁴⁹ 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.

⁶⁵⁰ 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.

⁶⁵¹ 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.

⁶⁵² 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

⁶⁵³ 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.

5.4.2.2.2 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 CO₂, CO, H₂ et CH₄). 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/m³, est en revanche plus élevée que celle du bois, 600 kg/m³ 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 CO₂ 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 molécules⁶⁵⁴. L'extraction sélective de molécules d'intérêt à partir de la biomasse s'envisage par l'utilisation par exemple de solvants alternatifs, comme le CO₂ supercritique ou l'eau subcritique, en sus de l'éthanol lui-même. Le CO₂ 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^{655,656}, et un des challenges pourrait être, dans le cas de la filière lignocellulosique, d'assister

⁶⁵⁴ Clark JH, Deswarte FEI, Farmer TJ (2009) The integration of green chemistry into future biorefineries. *Biofuels Bioproducts & Biorefining-BioFPR*, 3 (1) 72-90.

⁶⁵⁵ 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

⁶⁵⁶ 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^{657, 658}. 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 molécules⁶⁵⁹, 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 procédés⁶⁶⁰.

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 alcoolisé⁶⁶¹. 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 pervaporation⁶⁶² ou de la perméation de vapeur⁶⁶³, 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'éthanol⁶⁶⁴. L'impact de la nature de la

⁶⁵⁷ 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.

⁶⁵⁸ Myllymaki V and Aksela R (2005) Dissolution method for lignocellulosic material, WO Patent 2005/017001.

⁶⁵⁹ Clark JH, Deswarte FEI, Farmer TJ (2009) The integration of green chemistry into future biorefineries. *Biofuels Bioproducts & Biorefining-BioFPR*, 3 (1) 72-90.

⁶⁶⁰ Cardona C.A. and Sanchez O. J. (2007). Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology*, 98, 2415–2457.

⁶⁶¹ 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.

⁶⁶² Huang, R.Y.M. (1991) *Pervaporation Membrane Separation Processes*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

⁶⁶³ Ikeda S. and Watari M. (2005) Ethanol Dehydration by Nanoporous Zeolite Membrane-based Vapor Permeation, *Ethanol Producer Magazine*, April.

⁶⁶⁴ 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 (CO₂) 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 Peterson⁶⁶⁵ 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 années⁶⁶⁶.

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

⁶⁶⁵ 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.

⁶⁶⁶ 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 domaine 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 déterminants⁶⁶⁷. 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)⁶⁶⁸. 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 chimique⁶⁶⁹. 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 ».

⁶⁶⁷ Stewart D. 2008. Lignin as a base material for materials applications: chemistry, application and economics. *Ind. Crops Prod.* 27: 202-207.

⁶⁶⁸ Pouteau C., Dole P., Cathala B., Averous L., Boquillon N. 2003. Antioxidant properties of lignin in polypropylene. *Polym. Degrad. Stab.* 81: 9-18.

⁶⁶⁹ 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 CO₂ 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 gènes 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 bateau⁶⁷⁰. 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.

⁶⁷⁰ 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) utilisable 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. triticale immature 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 linéaire⁶⁷¹, qui permet d'identifier les enchaînements de procédés pertinents et d'intégrer les technologies les plus récentes ou en développement.

⁶⁷¹ 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.

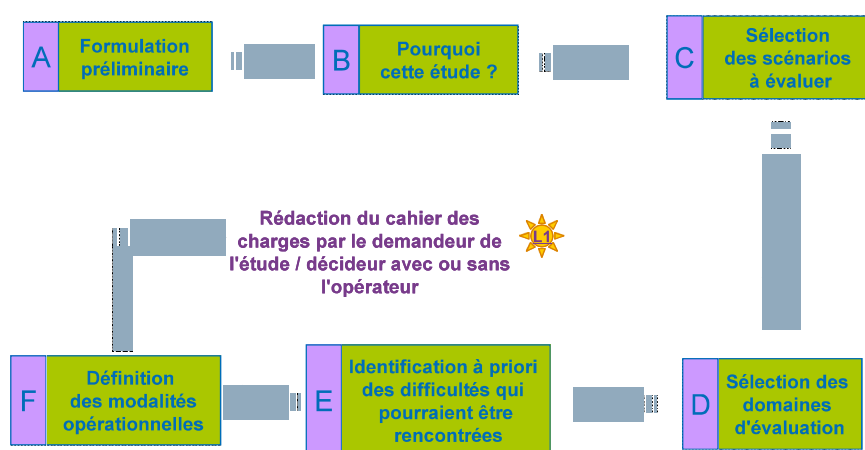


Figure 24: Formulation de la question et sélection des filières à évaluer

Tableau 53 : Domaines et critères d'évaluation

Domaines et critères d'évaluation									
	Environnemental		Technique		Économique		Social		Risques
	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						Acceptabilité sociale		Risques liés au transport routier
	Contribution à l'effet de serre				Externalités				
	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 jeux 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