



HAL
open science

Identification des végétaux où des structures intéressantes sont présentes

Paul Colonna, Agnès Kammoun, Xavier Montagne, Christian Sales,
Jean-Francois Morot-Gaudry, Monique Axelos, Marie-Elisabeth Borredon,
Lesya Baudoin, Thierry Chardot, Cournac L, et al.

► **To cite this version:**

Paul Colonna, Agnès Kammoun, Xavier Montagne, Christian Sales, Jean-Francois Morot-Gaudry, et al.. Identification des végétaux où des structures intéressantes sont présentes. Atelier de Réflexion Prospective VegA. 2013, 10 p. hal-04399422

HAL Id: hal-04399422

<https://hal.inrae.fr/hal-04399422>

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>Rhodoplantae</i>)	118
4.3.1.1.3. Algues vertes	120
4.3.1.2. Microalgues marines	123
4.3.1.2.1. Les algues vertes	126
4.3.1.2.2. Les haptophytes	128
4.3.1.3. Les dinoflagellés	129
4.3.1.4. Les diatomées	129
4.3.1.5. <i>Rhodoplantae</i>	131
4.3.1.6. Cyanobactéries	131
4.3.1.7. Phanérogames marines (plantes à fleurs)	133
4.3.2. Plantes	134
4.3.2.1. <i>Jatropha curcas</i> L.	135
4.3.2.2. Jojoba (<i>Simmondsia chinensis</i>)	139
4.3.2.3. Genre <i>Cuphea</i>	139
4.3.2.4. Crambe (<i>Crambe abyssinica</i>)	140
4.3.2.5. Le Miscanthus et le switchgrass (<i>Panicum virgatum</i>)	142
4.3.2.6. Remplacement de l'hévéa	146
4.3.3. Phytoremédiation : les phytotechnologies	148
4.3.3.1. Phytoremédiation des contaminants organiques	148
4.3.3.2. Phytoremédiation des contaminants métalliques : phytostabilisation et phytoextraction	149
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 **Chantereau** (CIRAD), Guillaume **Chantre** (FCBA), Angélique **D'Hont** (CIRAD), Gérard **Duc** (INRA), Jean-Louis **Durand** (INRA), Tristan **Durand-Gasselin** (CIRAD), Thierry **Fourcaud** (CIRAD), Pascal **Frey** (INRA), Georges **Freyssinet** (Limagrain), Lisa **Gauvrit** (INRA), Eric **Giraud** (IRD), Régis **Goebel** (CIRAD), Alain **Gojon** (INRA), Jean-Yves **Hoarau** (CIRAD), Marc **Lacape** (CIRAD), Gisèle **Laguerre** (INRA), Thierry **Langin** (Université Paris-Sud 11), Catherine **Lapierre** (AgroParisTech), Sylvain **Marsac** (Arvalis), Jean-François **Morot-Gaudry** (INRA), Nathalie **Munier-Jolain** (INRA), Laurent **Nussaume** (CEA), Loïc **Pagès** (INRA), Sylvain **Pellerin** (INRA), Gilles **Pilate** (INRA), Christophe **Plomion** (INRA), David **Pot** (CIRAD), Jean-François **Rami** (CIRAD), Michel **Renard** (INRA), Hervé **Rey** (CIRAD), Thierry **Tran** (CIRAD), James **Tregear** (IRD), Gilles **Trouche** (CIRAD), Patrick **Vincourt** (INRA)

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

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

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

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

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

Chapitre 9 : **Les bioraffineries**

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

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

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

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

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

Chapitre 12 : **Analyses socio-économiques**

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

Chapitre 13 : **Prospective**

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

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

4.1. Identification des végétaux où ces structures sont présentes

4.1.1. Considérations générales

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

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

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

Tableau 11 : classification biochimique des plantes

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

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

4.1.2. Spécificités qualitatives

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

4.1.2.1. Particularités des sources de lignocellulose

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

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

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

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

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

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

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

Un autre cas, qui représente une approche nouvelle, serait de produire des molécules de type lignines d'intérêt¹⁰². Celles-ci peuvent être :

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

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

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

4.1.2.2. Particularités des sources de lipides

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

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

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

Les usages des lipides sont dominés quantitativement par le marché du biodiesel. La technologie de trans-estérification pour le biodiesel s'effectue à partir d'huiles végétales possédant un indice de cétane acceptable, une bonne tenue au froid et une bonne stabilité à l'oxydation. Les huiles répondant à ces critères sont celles qui présentent un fort pourcentage en acide oléique. Les plantes de grande culture produisant ce type d'huile dans les régions tempérées sont le colza, le tournesol oléique et dans une moindre mesure le soja (22 % acide oléique)¹⁰³. Ces plantes étant cultivées principalement pour des besoins alimentaires, cela va entraîner une compétition au niveau de la disponibilité des surfaces cultivables dans les pays tempérés. Comme sources alternatives, le *Jatropha*, après sélection pour éliminer les phorbols (qui présentent un problème de toxicité) est un bon candidat, de par la forte teneur en huile de ses graines (entre 30 et 40 %) et sa résistance à un environnement difficile¹⁰⁴.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Pour les synthons, les acides gras recherchés (mono- et di-acides) doivent contenir des groupes fonctionnels réactifs : hydroxydes, époxydes, insaturations, etc.^{107,108}. On les trouve parmi certaines espèces domestiquées comme le ricin *Ricinus communis* (C18:1 -OH), le lin (C18:3), le colza *Brassica napus* avec l'acide érucique (C22:1) majoritaire, ou encore la coriandre *Coriandrum sativum* (C18:OH). Les graines de *Vernonia* et d'*Euphorbia lagascae* (60-75 %) sont des sources d'acide vernolique (C18-epoxy). Les acides furaniques sont présents dans des proportions intéressantes chez les graminées où ils peuvent représenter environ 240 µg/g de la matière sèche. Par ailleurs, la cutine et la subérine présentes chez la plupart des plantes sont des polyesters naturels. Cette biomasse potentielle pourrait constituer une source d'acides poly-hydroxylés et d'acides gras dicarboxyliques¹⁰⁹. Une source intéressante pour ces derniers pourrait être l'écorce de chêne liège qui contient des acides dicarboxyliques à longues chaînes (> C16).

4.1.2.3. Particularités des ressources algales

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

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

¹⁰⁷ Hou, C.T., T.M. Kuo, and A.C. Lanser. 2002. Value-added products through bioprocessing : next hydroxyl fatty acids. *Inform* 13:307-16.

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

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

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

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

Les **polysaccharides** des macroalgues sont composés de motifs de répétition dont la composition et la distribution vont varier d'une algue à une autre¹¹⁰. La variabilité structurale des polysaccharides est associée, comme pour les polysaccharides terrestres, à la diversité botanique. Alors que les polysaccharides terrestres sont généralement neutres (exceptions : pectines, GAG), les polysaccharides marins sont généralement anioniques (fonction uronique, sulfates). Sur la base des connaissances actuelles, la diversité chimique des polysaccharides algaux est illustrée par les structures de polysaccharides déjà identifiées. Par exemple, on rencontre chez les algues brunes les **alginates** mais également des **fucanes sulfatés** dont les structures sont très peu comprises. Chez les algues rouges, à l'exception des **agars** et des **carraghénanes**, peu d'études concernent les autres polysaccharides (xylanes, mannanes sulfatés ?). Les polysaccharides d'algues vertes ont des structures très complexes mais très peu étudiées¹¹¹.

Les enzymes de biosynthèse et de biodégradation de ces polysaccharides représentent en général de nouvelles familles d'enzymes qui n'ont pas d'équivalent dans les lignées végétales terrestres¹¹². Par conséquent, il existe un énorme potentiel d'activités enzymatiques encore inexploré. La découverte de telles fonctions supposera de mettre en place des outils de criblage et d'analyse sophistiqués. Ce constat pour les polysaccharides s'applique évidemment aux autres molécules d'intérêt.

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

Une récente publication¹¹³ relate la présence de **lignine** dans des algues rouges. Bien qu'en très faible quantité, cette lignine est composée des 3 types de précurseurs (H, G et G). Cette découverte est en opposition avec le dogme liant la spécificité de la lignine aux plantes supérieures terrestres. Toutefois, des composés phénoliques de faible masse moléculaire sont présents dans les algues. Le séquençage en cours de 2 algues (une brune : ***Ectocarpus siliculosus*** et une rouge : ***Chondrus crispus***) devrait

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

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

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

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

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

4.1.2.4. Identification des solutions végétales

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

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

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

4.2. Optimisation des espèces déjà exploitées

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

4.2.1. Considérations générales

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

Verrous et questions de recherche

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

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