



PANORAMA ET POTENTIEL DE DEVELOPPEMENT DES BIORAFFINERIES

- OVERVIEW AND POTENTIAL OF DEVELOPMENT OF BIOREFINERIES

Octobre 2010

Contrat n° 1001C0005

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par Hugues de CHERISEY, Consultant

Coordination technique : Hilaire BEWA, Département Bioressources
Direction Productions et Energies Durables – ADEME Angers

L'ADEME en bref :

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

<http://www.ademe.fr>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

SOMMAIRE

RESUME	5
Abréviations et sigles	6
I- INTRODUCTION ET OBJET DE L'ETUDE	8
I.1 – CADRE GENERAL DE L'ETUDE.....	8
I.2 - BIORAFFINERIE, BIORAFFINAGE ET CHIMIE DU VEGETAL	8
I.3 – PRINCIPALES CONCLUSIONS DE L'ETUDE MENEES EN 2005	11
I.4 – L'EVOLUTION DU CONTEXTE GENERAL DEPUIS 2005	12
II - ANALYSE PAR FILIERE	14
II.1 - LES FILIERES DE L'AMIDON.....	14
II.1.1 - ESPECES BOTANIQUES, ORIGINES ET VARIETES CULTIVEES	14
II.1.2 – COMPOSITION DES RECOLTES.....	16
II.1.3 – IMPORTANCE AGRICOLE ET PRINCIPAUX PAYS PRODUCTEURS.....	17
II.1.4 – DESCRIPTION DES FILIERES AMIDON	25
II.1.5 – LES PRINCIPAUX PRODUITS DES FILIERES AMIDON	32
II.1.6 - FORCES, FAIBLESSES, PERSPECTIVES DES FILIERES FRANÇAISES	47
II.1.7 - RECOMMANDATIONS	49
II.2 - LES FILIERES DU SUCRE.....	50
II.2.1 - ESPECES BOTANIQUES, ORIGINES ET VARIETES CULTIVEES	50
II.2.2 – COMPOSITION DES RECOLTES.....	50
II.2.3 – IMPORTANCE AGRICOLE ET PRINCIPAUX PAYS PRODUCTEURS.....	51
II.2.4 – DESCRIPTION DES FILIERES SUCRE	54
II.2.5 – LES PRINCIPAUX PRODUITS DES FILIERES SUCRE	62
II.2.6 - FORCES, FAIBLESSES, PERSPECTIVES DE LA FILIERE FRANÇAISE	67
II.2.7 - RECOMMANDATIONS	68
II.3 - LES FILIERES DES HUILES VEGETALES	69
II.3.1 - ESPECES BOTANIQUES, ORIGINES ET VARIETES CULTIVEES	69
II.3.2 – COMPOSITION DES RECOLTES.....	70
II.3.3 – IMPORTANCE AGRICOLE ET PRINCIPAUX PAYS PRODUCTEURS.....	73
II.3.4 – DESCRIPTION DES FILIERES HUILES VEGETALES	75
II.3.5 – LES PRINCIPAUX PRODUITS DES FILIERES HUILES VEGETALES	79
II.3.6 – FORCES, FAIBLESSES, PERSPECTIVES DE LA FILIERE FRANÇAISE	97
II.3.7 – RECOMMANDATIONS	98
II.4. - LES FILIERES LIGNOCELLULOSIQUES	99
II.4.1 - ESPECES BOTANIQUES, ORIGINES ET VARIETES CULTIVEES	99
II.4.2 – COMPOSITION DES RECOLTES.....	102
II.4.3 – IMPORTANCE AGRICOLE ET PRINCIPAUX PAYS PRODUCTEURS.....	105
II.4.4 – DESCRIPTION DES FILIERES LIGNO-CELLULOSIQUES	110
II.4.5 – PRINCIPAUX PRODUITS DES FILIERES LIGNO-CELLULOSIQUES.....	119

II.4.6 - FORCES, FAIBLESSES, PERSPECTIVES DE LA FILIERE FRANÇAISE	132
II.4.7 - RECOMMANDATIONS	134
III – QUELQUES BIOMOLECULES COMMUNES A PLUSIEURS FILIERES	135
III.1 - L'ETHANOL	135
III.1.1 – OBTENTION DU BIOETHANOL	135
III.1.2 – LA PRODUCTION DE BIOETHANOL DANS LE MONDE	136
III.1.3 – LES DERIVES DE L'ETHANOL	141
III.2 - L'ACIDE LACTIQUE	143
III.3 - LE 1,3 PROPANEDIOL (C3).....	146
III.4 – LES ISOPRENOIDES ISSUS DE FERMENTATION	148
III.4.1 - LA PRODUCTION D'ISOPRENE	148
III.4.2 – LA PRODUCTION DE TERPENES BIOCARBURANTS	149
III.5 - BUTANOL, ISOBUTANOL, ISOBUTENE	151
IV - ELEMENTS TRANSVERSAUX	155
IV.1 – LE DEVENIR DES TOP 10 BUILDING BLOCK CHEMICALS DE 2004	155
IV.2 - SUBSTITUTION AUX PRODUITS FOSSILES, HOMOLOGIE, ANALOGIE ...	159
IV.3 – L'IMPORTANCE DES PARTENARIATS INDUSTRIELS	160
IV.4 - BIOTECHNOLOGIES ET BIORAFFINERIES.....	163
IV.4.1 – LES OUTILS DES BIOTECHNOLOGIES BLANCHES	163
IV.4.2 –ROLE DES BIOTECHNOLOGIES DANS LES PROJETS EN COURS	171
IV.4.3 –LES BIOTECHNOLOGIES VERTES	173
IV.4.4 – CONCLUSIONS : BIOTECHNOLOGIES ET BIORAFFINERIES	177
IV.5 – BIOCARBURANTS ET CHIMIE DU VEGETAL.....	178
IV.6 – RISQUES ET BESOINS DE POLITIQUES PUBLIQUES	179
IV.7 – EUROPE, USA, BRESIL, ASIE.....	181
IV.8 – DEVELOPPEMENT ET FACTEURS CLES DE SUCCES DES BIORAFFINERIES.....	182
V – SYNTHESE ET CONCLUSIONS	187
V.1 - SYNTHESE GENERALE	187
V.II - RECOMMANDATIONS.....	190
ANNEXES	192
SCHEMAS DE FILIERE	192
DESCRIPTIF SUCCINT D'ENTREPRISES	198
ENTREPRISES DE L'AMONT DE LA FILIERE.....	199
AGRO-INDUSTRIE ET PREMIERS TRANSFORMATEURS DE BIOMASSE	201
INDUSTRIE CHIMIQUE ET PETROLIERE	207
ENTREPRISES DE BIOTECHNOLOGIES.....	214

RESUME

Le développement des bioraffineries et de la chimie du végétal s'est accéléré depuis la première version de cette étude, réalisée il y a cinq ans.

Les filières céréalières, betteravières et oléagineuses sont parfaitement structurées. Il en est de même de celles qui approvisionnent les usines de pâte à papier. Les autres filières d'approvisionnement en biomasse lignocellulosiques sont en revanche encore dans leur phase de développement.

Si l'amont de ces différentes filières reste bien identifié, chacune conservant toutes ses spécificités, les secondes transformations génèrent des molécules plateformes communes qui sont à l'origine des mêmes dérivés.

Les biotechnologies blanches connaissent un essor rapide, favorisé par le développement des outils de bioinformatique et de tri à haut débit. Les changements d'échelle restent cependant longs et coûteux et les réalisations industrielles sont encore en nombre limité, hormis dans le domaine du bioéthanol et du biodiesel de première génération.

Le développement de plusieurs molécules plateformes avait été anticipé par les experts. Certaines prévisions se sont révélées correctes (glycérol, sorbitol, acide succinique) mais d'autres molécules tardent à être produites avec des procédés innovants (3-HPA, acide levulinique, furanes). A l'inverse, on assiste à des développements "imprévus" de projets industriels de fabrication par fermentation de terpènes et de butanol ou de conversion chimique du bioéthanol en éthylène et dans ses dérivés.

Il est recommandé en conclusion de soutenir le développement de la chimie du végétal en s'appuyant sur les réalisations industrielles engagées, y compris celles associées aux biocarburants de première génération. Les filières françaises et européennes ont certains avantages concurrentiels qu'il convient de valoriser dans un petit nombre de projets d'ambition suffisante.

EXECUTIVE SUMMARY

The development of biorefineries and of plant chemistry has accelerated its development since the first version of this study, done in 2005.

The French cereal, sugarbeet and oilseeds production chains are remarkably organized as the ones which supply the pulp industry. The other production sectors of lignocellulosic biomass are still in the steps of development.

If each crop production sector is still well delimited with all its own specificities, the secondary processing steps generate identical building block molecules which in turn generate the same derivatives.

White biotechnologies show a rapid development at laboratory scale, enhanced by biocomputing and high throughput screening tools. Nevertheless, upscalings are still long and expensive. Therefore, industrial implementations are not so numerous with the exception of the ones of production of first generation biofuels.

The development of several building blocks molecules was anticipated by experts. The facts have shown that some of the predictions were correct (glycerol, sorbitol, succinic acid) but other molecules are still expecting innovative production process (3-HPA, levulinic acid, furans). On the contrary some unexpected projects take place of industrial production through fermentation process of terpens, butanol or chemical conversion of ethanol into ethylene and its derivatives.

As a conclusion, it is recommended to support the plant chemical development by sustaining industrial enterprises including the ones producing first generation biofuels. The french and theeuropean agricultural, forestry and industrial chains have some competitive advantadges to be appreciated trough a small number of ambitious projects.

Abréviations et sigles

ACDV : Association de la Chimie du Végétal (France),
ADN : acide désoxyribonucléique (molécule support du code génétique)
AGPM : Association Générale des Producteurs de Maïs
ASA : Alkenyl Succinyl Anhydride
BDO : 1,4 Butanediol
CA : chiffre d'affaires,
CE : Commission européenne,
CEDUS : Centre d'Etudes et de Documentation du Sucre
CEFIC : Conseil Européen de l'Industrie Chimique
CEPI : Confédération européenne des industries papetières (Confederation of European Paper Industries)
CETIOM : Centre d'Etudes Techniques des Oléagineux Métropolitains
CGB : Confédération Générale des planteurs de Betterave,
DHA : dihydroxyacétone
€ : euro(s),
FAO : Food and Agriculture Organisation – Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture
FCBA : Institut Technique Forêt Cellulose Bois Ameublement (France)
FDCA : acide 2,5-furan dicarboxylique
FEDIOL : Fédération européenne de l'industrie des huiles et tourteaux.
FOP : Fédération française des producteurs d'oléagineux et de protéagineux
HMF :
3 HPA : acide 3-hydroxypropionique (3-hydroxypropionic acid)
IFP : Institut Français du Pétrole
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique (France),
ha : hectare(s),
hl : hectolitre(s)
K : "kilo" = x 1000, K€ = x 1000 €, Kha = 1000 hectares, etc.
M : million(s), Mt = millions de tonnes, Mha = millions d'hectares, etc.
ms, m.s. = matière sèche
MPG : mono propylène glycol (= 1,2 propanediol)
OGM : organisme génétiquement modifié
ONF : Office National des Forêts
pdm : parts de marché
PDO : 1,3 propanediol
PHA : Polyhydroxyalcanoates
PLA : Poly Lactic Acid = polymère d'acide lactique
PME : Petites et Moyennes Entreprises
PNNL : Pacific Northwest National Laboratory (USA)
q, qx : quintal, quintaux,
SNPAA : Syndicat National des Producteurs d'Alcool Agricole (France)
t : tonne (s)

THF : tétrahydrofurane

UCFF : Union de la Coopération Forestière Française

\$ US : dollar(s) des Etats-Unis d'Amérique.

UE : Union européenne.

UIC : Union des Industries Chimiques (France).

USDA : United States Department of Agriculture (Ministère de l'Agriculture des Etats Unis)

US DOE : United States Department of Energy (Ministère de l'Energie des Etats Unis)

USIPA : Union des Syndicats des Industries des Produits Amylacés et de leurs dérivés (France)

I- INTRODUCTION ET OBJET DE L'ETUDE

I.1 – CADRE GENERAL DE L'ETUDE

Cette étude vient mettre à jour un travail similaire réalisé en 2005. L'objectif avait été de réaliser un panorama du secteur des bioraffineries en l'approchant par l'**analyse des filières végétales développées dans notre pays**. Celles-ci avaient été identifiées en 2005 de la façon suivante : blé et maïs, betterave, colza, tournesol, coproduits de la papeterie.

En 2010, l'exercice est répété, avec quelques modifications. Les filières sont désormais identifiées par leur composant d'intérêt majeur. Seront donc traitées les filières "**amidon**", "**sucre**", "**huiles végétales**" et "**matières lignocellulosiques**".

Comme on le verra, cette approche par matière première végétale présente l'avantage de permettre de bien identifier la ressource. Toutefois, de plus en plus, "l'étanchéité" entre les filières n'est plus respectée : certains intermédiaires de synthèse de la chimie peuvent être obtenus dans leur forme biosourcée aussi bien à partir du glucose issu des filières amidon que du saccharose des filières sucre et, demain, de la cellulose des filières lignocellulosiques. Dans certains cas, le glycérol issu des huiles végétales peut être un précurseur de molécules pouvant être aussi obtenues également par fermentation du glucose. On observe ainsi une évolution du concept de bioraffinerie. Originellement positionnées en aval d'une filière unique, elles deviennent et deviendront peu à peu des industries valorisant différentes sources de biocarbone disponibles localement au meilleur prix (et offrant les garanties d'être d'origine renouvelable).

L'approche par l'amont et par les filières végétales privilégie le regard des producteurs et des premiers transformateurs de biomasse au dépend de celui porté sur les marchés. Nous insistons à nouveau, comme en 2005, pour que le modèle d'étude présenté ici soit complété par des analyses précises des besoins des différents marchés actuels ou potentiels des bioproduits et de leur prospective d'évolution.

Le territoire de l'étude est avant tout la France en ce qui concerne la description de détail des filières, les conclusions et les recommandations formulées. Le regard a cependant cherché à être beaucoup plus large en matière d'investigations sur les projets industriels en cours. D'autres pays d'Europe, les Etats-Unis et le Brésil retiennent ainsi l'attention. Le cadre limité d'une telle étude ne permet guère de rechercher une information précise sur les développements en cours en Asie, où de nombreux projets sont à des stades parfois avancés.

I.2 - BIORAFFINERIE, BIORAFFINAGE ET CHIMIE DU VEGETAL

Le mot "**bioraffinerie**" a fait couler beaucoup d'encre et mobilisé les réflexions de nombreuses spécialistes avant que des définitions collectives puissent être proposées. De façon simplifiée, nous pouvons considérer que la bioraffinerie est **un ensemble industriel, localisé sur un même site, qui traite et raffine des produits issus de la biomasse**, en analogie avec les raffineries pétrolières qui traitent et raffinent les produits pétroliers.

La "chimie du végétal", est selon l'association de la chimie du végétal (ACDV) française, la "**chimie fondée sur l'utilisation de ressources végétales**", au sens de la valorisation et de la transformation par l'industrie chimique de matières premières végétales.

Le terme de "**bioraffinage**" est moins employé. Il peut se définir par la séquence d'étapes permettant d'obtenir des molécules ou des matériaux à partir d'une biomasse brute. Il comporte des opérations de prétraitement et de fragmentation de la biomasse, puis celles de conversions et transformations successives, par des **procédés biotechnologiques ou chimiques**.

Si la bioraffinerie est, dans son concept, concentrée sur un site, le bioraffinage peut nécessiter l'intervention de plusieurs ateliers pouvant être éloignés les uns des autres et appartenir à des entreprises et à des acteurs industriels différents.

La bioraffinerie, envisagée comme une même entité industrielle, prend toute sa pertinence économique quand sa gamme de produits comprend des commodités et que les économies d'échelles, comme l'optimisation de la logistique et des investissements permises par sa concentration, deviennent des facteurs clés de sa compétitivité. Cette optimisation économique peut s'accompagner d'une optimisation environnementale, incluant une minimisation des rejets ultimes et des consommations d'énergies et d'autres intrants. Cette dernière est d'autant plus nécessaire que bon nombre des bioraffineries actuelles bénéficient, directement ou indirectement, d'incitations publiques variées et se doivent en conséquence d'être exemplaires en matière d'environnement pour démontrer leur valeur de modèle.

La bioraffinerie est en concurrence avec la raffinerie pétrolière quand elle est capable de proposer au marché des molécules analogues dans leurs propriétés et dans leurs applications.

Selon certaines visions du concept de bioraffinerie, celle-ci doit être capable de valoriser un grand nombre de matières premières différentes et de fabriquer de nombreuses intermédiaires de synthèse. Elle pourrait ainsi optimiser son approvisionnement et ses productions en fonction des marchés, en amont et en aval de ses activités. Cette séduisante flexibilité est encore un objectif plus qu'une réalité et elle implique des coûts d'investissements en outil industriel et en développement qui peuvent être considérables, voire dans certains cas non rentables. On peut rappeler ici que les raffineries pétrolières transforment généralement une qualité précise de brut. L'industrie de l'alimentation animale est un autre modèle possible de comparaison car celle-ci valorise de multiples matières premières végétales dans de nombreuses formules d'aliments pour animaux. Ses procédés sont toutefois beaucoup plus homogènes que ceux d'une bioraffinerie, seules les formules des aliments (= des produits finis) étant modifiées. Il est intéressant de constater que l'industrie de l'alimentation du bétail a évolué d'un modèle d'usine servant tous les marchés de l'élevage vers une spécialisation des sites par cible d'espèce animale, mettant en brèche le modèle de l'usine "traitant toutes les matières premières possibles pour fabriquer tous les produits possibles".

On peut rappeler ici quelques unes des différentes définitions de la bioraffinerie :

- Celle de **Jens Borne** : *"A biorefinery is an integrated system of interdependent processes, which converts a set of renewable feedstock most effectively into the actually most profitable portfolio of value-added products with a minimal of external energy needs and practically no wastes and emissions"* que l'on peut s'essayer à traduire ainsi : "Une bioraffinerie est un système intégré de procédés interdépendants qui convertit un ensemble de matières premières renouvelables, de la façon plus efficace, en une gamme de produits à valeur ajoutée, avec un minimum de besoins énergétiques externes et pratiquement aucun déchet ni émission".

Nous discuterons plus loin de l'objectif annoncé de minimiser les besoins en énergie externe qui nous paraît parfois porteur d'une vision simpliste. Dans l'état des savoir faire actuels, il semble pertinent d'utiliser des bagasses de canne à sucre ou des liqueurs noires d'usine de pâte à papier pour produire de l'énergie. Faut-il également brûler des pulpes de betteraves, des tourteaux de colza ou des drèches de blé pour éviter à tout prix d'utiliser de l'énergie "extérieure" ou est-il plus pertinent de valoriser ces coproduits, tous très nutritifs, en alimentation animale ?

- La définition de **J. Sanders**, adoptée au sein du **projet européen Biopol** traite en réalité de bioraffinage et non de bioraffinerie: *"Biorefinery is the sustainable processing of biomass into spectrum of marketable products and energy"*. Elle peut s'exprimer comme "la transformation soutenable (ou "durable") de la biomasse en un ensemble de produits commercialisables et en énergie".

- Celle de **W. Soetaert**, qui nous paraît la plus satisfaisante, a été adoptée dans le **projet européen Euroview** : "*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*" : "des bio-industries intégrées, mettant en œuvre différentes technologies pour fabriquer des produits chimiques, des biocarburants, des produits alimentaires pour l'homme et les animaux, des biomatériaux (y compris des fibres) et de l'énergie à partir de matières premières de la biomasse".

De l'examen des autres définitions disponibles, nous retiendrons seulement quelquefois concepts complémentaires :

- Celui de "**cluster industriel**" autrement dit, la réunion sur un même site d'industries pouvant être de nature différente, selon les procédés qu'elles mettent en œuvre et les produits qu'elles fabriquent. On parlera parfois d'**écosystème industriel**, les diverses entreprises présentes sur le site se fournissant de l'une à l'autre en produits semi transformés ou en énergie et mettant en commun des moyens de traitement des effluents. Un exemple frappant en France est celui du site de Pomacle-Bazancourt.
- L'analyse particulière du groupe pétrolier Shell de 2007, qui considérait - à cette époque - la bioraffinerie comme la (simple) addition d'un atelier traitant la biomasse dans les raffineries de pétrole !

Les projets européens **Biopol**, **Biorefinery Euroview** et, plus récemment, **Star Colibri**, se sont attachés à lister, cartographier et classer les bioraffineries européennes et nord-américaines. Nous ne reconduirons pas ici l'exercice qui est très largement documenté. Une véritable taxonomie des bioraffineries a été développée, en fonction des matières premières qu'elles valorisent. On distingue ainsi :

- **La bioraffinerie de céréales** (*cereal biorefinery*) qui valorise les grains de céréales et donc principalement leur amidon. Elle pourra dans l'avenir utiliser éventuellement la plante entière, devenant pour certains une **bioraffinerie de la plante entière** (*whole crop biorefinery*).
- **La bioraffinerie des oléagineux** (*oilseed biorefinery*).
- **La bioraffinerie "verte"** (*green biorefinery*) qui valorise des matières premières riches en eau, de la betterave à la pomme de terre et au manioc mais aussi pour certains jusqu'aux plantes originellement "fourragères". Ce "taxon" ne semble pas faire l'unanimité. Si les prétraitements de matière humide sont effectivement particuliers, la pomme de terre et le manioc restent des cultures amidonnées et la betterave ou la canne à sucre des plantes sucrières.
- **La bioraffinerie de matières lignocellulosiques** (*lignocellulosic feedstock biorefinery*), en précisant si elle valorise des produits forestiers (*forest based*) ou également des pailles et des rafles de céréales, de récoltes de cultures énergétiques et des déchets riches en lignocellulose.
- **La bioraffinerie de gaz de synthèse** (syngas) est rattachée à un des taxons précédents, suivant les matières premières qu'elle utilise. Au-delà du procédé de Fischer Tropsch pour produire des hydrocarbures à partir de gaz de synthèse, nous verrons que quelques entreprises développent des productions de biocarburants ou d'intermédiaires chimiques par fermentation microbienne de ces mêmes gaz.

I.3 – PRINCIPALES CONCLUSIONS DE L'ETUDE MENEES EN 2005

A l'issue de l'étude précédente, des conclusions avaient été énoncées pour chaque filière. On peut en présenter ici une brève synthèse, assortie de quelques commentaires sur leur actualité, au risque de déflorer partiellement ce qui va suivre :

- La grande référence prospective en chimie du végétal était alors l'étude 2004 de l'US DOE qui avait listé 12 molécules plateformes d'avenir.

Un chapitre particulier (IV.1) sera consacré à commenter cette démarche prospective et celles qui lui ont succédé.

- Les grands projets industriels de chimie du végétal étaient, à l'époque, peu nombreux. On citait alors surtout celui de Cargill (sur le PLA) et celui de DuPont Tate and Lyle (sur le 1,3 propanediol) comme des aventures audacieuses. Les biocarburants de 1^{ère} génération étaient pour leur part en plein développement. On appréciait alors unanimement leurs vertus.

PLA et PDO biosourcé se sont effectivement développés et semble offrir un réel potentiel de croissance sur leurs marchés. La concurrence se met en place. Des filières industrielles solides de production de biocarburants de 1ère génération se sont construites et sont un des socles des autres générations de bioraffineries à venir.

- Les liens entre les grands chimistes français et l'agro-industrie étaient réduits.

Si le dialogue a beaucoup progressé avec la création de l'Association de la Chimie du Végétal, les projets communs restent limités. Plusieurs partenariats se sont mis en place entre notre agro-industrie et des industriels de la chimie d'autres nationalités.

- Nos filières céréalières étaient (et demeurent !) solides, il leur manquait alors des projets industriels autour de la production de molécules comme l'acide lactique, succinique ou levulinique.

Si l'acide lactique reste produit hors de France, notre pétrolier Total à investi sur ses dérivés en Belgique. Deux entreprises françaises abordent cette année les productions commerciales d'acide succinique. L'acide levulinique reste en revanche une molécule "gardant son avenir devant elle" mais sans encore rien de très visible, ni en France, ni ailleurs...

- La sucrochimie paraissait alors une science jeune, méritant d'être encouragée.

Les progrès des biotechnologies ont modifié le paysage et fait émerger de nouvelles molécules plateformes comme ... l'éthanol ! Le saccharose apparaît désormais plutôt comme un substrat pour des fermentations qu'une molécule pour les chimistes.

- Un grand nombre d'études avaient été réalisées sur la valorisation des pulpes de betterave qui restaient préférentiellement utilisées en alimentation animale.

La situation a peu évolué à ce jour.

- Le glycérol retenait l'attention, car la France allait en devenir un gros producteur. Il convenait d'amplifier les travaux sur la création de nouveaux débouchés.

La France est effectivement devenue un gros producteur de glycérol. Les débouchés émergents en 2010 ne sont pas toujours ceux qui étaient envisagés en 2005 mais le produit trouve ses marchés et ses dérivés.

- Le développement d'un biodiesel entièrement d'origine végétale, à base d'esters éthyliques, semblait conceptuellement séduisant mais n'était en 2005 guère à l'ordre du jour.

Le défi technologique reste important mais un projet mobilisant toute la filière est engagé.

- La filière papetière française offre de grandes ressources en savoir faire industriel mais souffre de la concurrence d'autres continents. Le développement de la chimie de la cellulose paraissait porteur d'avenir.

Notre filière papetière souffre toujours. Elle est majoritairement propriété de groupes étrangers dont la recherche est le plus souvent localisée loin de France. Différents projets ont été toutefois lancés dans notre pays sur la valorisation de la biomasse lignocellulosique. Les marchés des dérivés terpéniques se développent mais la ressource française est insuffisante et doit être complétée.

I.4 – L'EVOLUTION DU CONTEXTE GENERAL DEPUIS 2005

En cinq ans, beaucoup d'évènements ont bouleversé le paysage dans lequel s'inscrit le développement des bioraffineries et de la chimie du végétal.

Les politiques publiques en faveur de la **lutte contre le changement climatique** se renforcent bien qu'elles n'aient pas encore trouvé un consensus international formel. La contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre est devenue une base de promotion de tout projet industriel dans la chimie du végétal.

Les cours de toutes les matières premières ont montré ces dernières années des volatilités extrêmes, y compris en ce qui concerne les denrées agricoles.

L'évolution chaotique des cours du pétrole a relancé l'éternel débat sur le "peak oil" sans encore permettre de le localiser précisément. Au delà des difficultés à produire des prévisions précises, la tendance lourde à la hausse des cours se maintient.

Les émeutes de la faim ont été générées par la hausse brutale de matières alimentaires, le plus souvent d'importation. Les conclusions qui ont suivi sont parfois simplistes. Toute parcelle agricole du Nord emblavée d'une culture non alimentaire contribuerait ainsi à affamer les populations du Sud qu'il faudrait continuellement approvisionner en blé et maïs, européen ou nord américain, et en riz thaïlandais. Les biocarburants de 1^{ère} génération, précédemment encensés, ont été alors accusés d'être les seuls coupables de la hausse des cours du maïs et du blé. L'intérêt s'est alors déplacé sur ce qui n'existe pas encore et qu'il donc est aisé de parer donc de toutes les vertus : **les biocarburants de seconde et même de troisième génération !**

L'Europe reste toujours aussi fermée au développement des OGM végétaux alors que les surfaces ensemencées en plantes génétiquement modifiées dans le monde dépassent 7 fois la surface agricole de la France ! **Les biotechnologies blanches pour leur part connaissent des développements spectaculaires**, sans susciter d'appréhension particulière.

La crise économique actuelle a des conséquences multiples : des entreprises souffrent et diffèrent ou annulent des projets de développement, y compris dans le domaine de la chimie du végétal. A l'inverse, les subsides publics se sont – jusqu'à maintenant – massivement déversés sur les projets à connotation "verte", incluant largement le développement de biocarburants de

nouvelle génération. **Des budgets de soutien colossaux ont ainsi été mobilisés** aux Etats-Unis.

La nature et l'abondance des informations disponibles ont fortement évolué. La floraison des newsletters, des blogs et des documents mis en ligne à la suite de conférences a entraîné une multiplication considérable des documents accessibles en ligne, leur qualité et leur fiabilité restant inégales.

En 2005, les projets étaient encore majoritairement dans leur étape conceptuelle. Les entreprises livraient volontiers leur vision générale des pistes à suivre. Aujourd'hui, les investissements sont engagés, la concurrence est aux aguets et les industriels n'aiment guère donner de détails sur leurs travaux en cours. Les interviews peuvent être ainsi frustrantes mais souvent suivies par l'identification en accès libre de plusieurs présentations des mêmes interlocuteurs à des congrès, des séminaires ou des sessions de formation d'étudiants. Leur contenu peut se révéler plus riche et plus précis que ce qu'ils avaient accepté d'expliquer lors d'entretiens en face à face ou au téléphone. Tout cela n'est en réalité que peu étonnant : il est plus facile de définir la part de l'information que l'on accepte de diffuser et celle restant sous silence quand on prépare et relit un PowerPoint, que lorsque l'on répond, "à chaud" à des questions pouvant devenir indiscrettes.

Si l'**information qualitative** disponible sur Internet est toujours plus abondante, l'**information quantifiée fiable** est en revanche devenue systématiquement payante, à des tarifs prohibitifs pour les besoins ponctuels d'une étude comme celle-ci. Cette dernière comporte donc moins de données quantitatives sur les marchés et sur les prix que celle de 2005. Quand les sources des informations concernant les prix et volumes ne sont pas indiquées, c'est que ces dernières sont le fruit d'un travail de recoupement et qu'elles sont assumées comme des estimations par l'auteur de cette étude.

II - ANALYSE PAR FILIERE

Nous étudierons successivement :

- Les filières de l'**amidon**, autrement dit celles issues du blé, du maïs et des autres plantes amylacées.
- Celles du **sucre** et donc de la betterave et de la canne à sucre.
- Celles des **huiles végétales** issues des plantes oléagineuses.
- Les filières **lignocellulosiques** en y incluant les **coproduits de l'industrie de la pâte à papier**.

II.1 - LES FILIERES DE L'AMIDON

L'amidon est un polymère de glucose. Il est présent dans les organes de réserve de nombreuses plantes, que ce soit dans leurs graines (céréales, mais aussi protéagineux) ou leurs organes souterrains, qu'ils aient un statut de tige (tubercules de pomme de terre) ou de racine (manioc, taro, patate douce, etc.).

L'amidon exploité par l'industrie amidonnière provient principalement du maïs, du blé, de la pomme de terre en France et dans les régions tempérées. Le riz et le manioc sont les sources importantes dans les régions tropicales.

II.1.1 - ESPECES BOTANIQUES, ORIGINES ET VARIETES CULTIVEES

Les espèces végétales concernées présentes en Europe sont donc principalement le blé, le maïs et la pomme de terre. Le pois a une moindre importance.

Le blé tendre (*Triticum aestivum* ; soft wheat en anglais) est une graminée hexaploïde, au métabolisme photosynthétique en C3 qui a été domestiquée au Proche Orient. Céréale autogame, les variétés de blé sont généralement des lignées pures. Des blés hybrides ont été développés mais leur utilisation ne progresse que lentement. Signalons que le blé dur, utilisé pour la production de pâtes ou de semoule, est une autre espèce (*Triticum durum* ; hard wheat) au génome tétraploïde.

Le blé existe sous forme de variétés d'hiver qui sont semées à l'automne et moissonnées l'été suivant et des variétés de printemps, semées à cette même saison et récoltées quelques mois après. En France, les variétés de printemps, beaucoup moins productives, sont tout à fait marginales mais elles peuvent dominer dans des pays à l'hiver rigoureux comme le Canada où aussi dans certaines régions subtropicales, sans hiver suffisamment marquée.

Il existe en France plusieurs centaines de variétés inscrites au catalogue. Des 244 variétés de blé tendre en multiplication en France en 2009, une dizaine représente près de 50 % des surfaces cultivées. En dépit d'une sélection active et performante qui permet aux variétés récentes de dominer le marché, la durée de vie de certaines variétés peut être très longue. En 2009, la variété Apache, inscrite en 1998 était ainsi la plus cultivée alors que Soissons, inscrite en 1988, gardait encore une place significative. Les semenciers leaders du marché français sont les groupes Limagrain, RAGT, CC. Benoist, Florimond Desprez... Le taux de renouvellement des semences de blé tendre n'aurait pas dépassé 49 % pour la campagne 2009-2010, plus de 50 % des semis étant donc réalisé à partir des semences reproduites sur la ferme (dans les années 2000, le taux de renouvellement était d'environ 60 %).

Le maïs, *Zea mays* (corn ou maize, en anglais) est une graminée diploïde au métabolisme photosynthétique en C4, domestiquée au Mexique à partir de la téosinte. C'est une espèce monoïque (= à fleurs mâles et femelles séparées sur la même plante), à pollinisation

anérophile. Le maïs est cultivé sous forme de variétés hybrides. C'est une plante annuelle, semée au printemps et récoltée à l'automne. Il existe de nombreuses classes de précocité de maïs permettant leur culture dans des conditions climatiques variées.

Le marché des semences de maïs est servi en France par le groupe Limagrain (marques LG et Advanta), 19 % de parts de marché en 2008-2009 ; Pioneer Semences (filiale de DuPont), 15.5 % pdm ; Semences Dekalb (groupe Monsanto) 13.5 % pdm ; RAGT, 10.4 % pdm, Caussade, 9.8 % pdm et une dizaine d'autres sociétés. L'offre est segmentée et dynamique : 960 variétés françaises et européennes sont inscrites au catalogue dans notre pays, classées en 7 groupes de précocité ! Plusieurs variétés waxy (= à l'amidon très riche en amylopectine) sont proposées à la culture en France ainsi que des variétés "vuir" (= à usage industriel spécifique, qui ne sont pas commercialisées mais réservées à des productions contractuelles). Le maïs est une espèce qui a fait l'objet de nombreuses modifications génétiques (85 % des maïs cultivés aux USA sont OGM !).

La pomme de terre, *Solanum tuberosum* (potato en anglais) appartient à la famille des solanacées, comme la tomate et l'aubergine. Elle a été domestiquée en Amérique andine. C'est une plante tétraploïde au métabolisme photosynthétique en C3 dont les tubercules permettent la multiplication végétative. Les variétés commerciales sont des clones.

Ce sont les variétés dites féculières qui sont utilisées pour la production d'amidon. Elles sont 17 commercialisées en France en 2009, principalement cultivées dans le Nord et l'Est de notre pays. La transgénèse a permis de développer des variétés résistantes aux herbicides et aux maladies et, plus important dans le cadre de cette étude, de modifier la composition de l'amidon (cf. II.1.2).

Le pois, *Pisum sativum*, (Pea en anglais) est une fabacée, diploïde et autogame, probablement domestiquée au Proche Orient et multipliée par graines. Le pois est un protéagineux et le contenu de sa graine est riche en amidon mais aussi en protéines (23 % de la matière sèche). Les variétés sont des lignées.

Les surfaces en Pois françaises ont atteint 700 000 ha en 1993, à la suite d'une politique de soutien active de la culture, dans le cadre de la PAC, pour diminuer la dépendance européenne en tourteaux de soja d'importation pour l'alimentation du bétail. Elles ont fortement baissé depuis, faute du maintien d'incitations suffisantes mais aussi en raison de problèmes récurrents avec un champignon phytopathogène des racines.

Métabolisme photosynthétique en C3 et C4

Pour chaque espèce botanique brièvement décrite, son métabolisme photosynthétique est précisé. Le code C3 ou C4 désigne le nombre de carbones du tout premier produit de la fixation du CO₂ mais, au-delà de ce détail biochimique, il indique une performance de photosynthèse et donc de croissance particulière.

La majorité des plantes à fleurs ont un métabolisme de photosynthèse dit en C3. La molécule de CO₂ atmosphérique réagit avec un sucre en C5 pour former deux molécules en C3 (3-P-Glycérate) qui seront par la suite transformées en fructose (C6). Les tissus photosynthétiques et les chloroplastes des feuilles des plantes en C3 sont homogènes.

Dans les plantes dites en C4, la fixation du CO₂ atmosphérique se réalise dans les cellules périphériques des feuilles et produit de l'oxaloacétate en C4. Transformé en malate, celui-ci migre vers les cellules plus internes à la feuille où il est converti en pyruvate et en CO₂ qui alimente alors le cycle en C3 classique. L'étape supplémentaire du métabolisme en C4 permet une plus grande performance d'ensemble de la photosynthèse par la compartimentation des réactions et la diminution associée de la réaction inverse qu'est la photorespiration. En conditions favorables, les plantes en C4 ont des croissances plus rapides. Le métabolisme C4 n'est pas associé à un groupe botanique particulier mais on le retrouve chez plusieurs plantes cultivées (maïs, sorgho, canne à sucre, chanvre, Miscanthus...) ou chez des mauvaises herbes particulièrement envahissantes (sétaires, panics, digitales, amarantes...).

A noter également que la fixation de l'isotope de carbone C¹³ n'est pas identique chez les plantes en C3 ou C4, ce dont il faut tenir compte pour le suivi du carbone biosourcé dans les produits des filières correspondantes. Le sucre de canne contient ainsi plus de C¹³ que celui de betterave.

Les espèces tropicales utilisées pour la production d'amidon sont – hormis le maïs - principalement le riz et le manioc.

Le riz, *Oryza sativa* (rice en anglais), est une graminée diploïde à métabolisme photosynthétique en C3, qui a été domestiquée en Extrême Orient. Il est cultivé dans toutes les régions tropicales et une partie des régions tempérées. Le riz est autogame. Les variétés sont généralement des lignées pures mais plusieurs semenciers ont développé des variétés hybrides F1, obtenues en valorisant un système de stérilité mâle cytoplasmique.

Le génie génétique est opérationnel sur le riz depuis la fin des années 1980 mais avec des applications à grande échelle encore limitées. Le riz constitue une filière mineure en France mais la société Semences de Provence y commercialise 8 variétés.

Le **manioc**, *Manihot esculenta*, (cassava en anglais) est une euphorbiacée qui a été domestiquée au Brésil. Ce sont les racines tubérisées qui sont riches en amidon. Le manioc est multiplié par voie végétative. Il a été introduit en Afrique dès le 16^{ème} siècle. Il s'est également répandu en Asie et constitue une des bases de l'alimentation traditionnelle dans de nombreuses régions de la ceinture tropicale. La farine de manioc, riche en amidon, est appelée tapioca.

II.1.2 – COMPOSITION DES RECOLTES

Chez le maïs, le blé et le riz, l'organe de conservation est le grain. Celui-ci comprend un très petit germe riche en huile et en activités enzymatiques, des enveloppes à fort taux de cellulose et de protéines et un tissu de réserve, l'albumen, constitué majoritairement d'amidon.

L'amidon des variétés classiques de blé ou de maïs est composé à 75 % d'amylopectine et à 25 % d'amylose. Des blés "waxy" à 100 % d'amylopectine ont été développés par les sélectionneurs mais restent d'une utilisation marginale. Les protéines de l'albumen de blé, gliadines et gluténines, ont des propriétés d'élasticité qui permettent aux pâtes de blé tendre de lever lors de la panification.

Il existe des maïs waxy régulièrement cultivés en France. Les sélectionneurs ont également développé des maïs riches en amylose (avec 60 % d'amylose). Signalons également les maïs riches en huile (8 % de la matière sèche) qui n'ont jamais connu de réel succès commercial.

Composition du blé, du maïs et de quelques sous-produits

Teneurs en % du brut	Blé tendre	maïs	Son de blé	Drèches de distillerie de blé		"Corn gluten feed"	Gluten de maïs	Drèches & solubles de distillerie de maïs
				< 7% amidon	> 7% amidon			
Humidité	13.2	13.6	12.9	10	8.6	12.0	10.5	11.8
Protéines brutes	10.5	8.1	14.8	33.8	28.9	19.3	60.6	24.6
Cellulose brute	2.2	2.2	9.2	9.2	5.6	7.5	1.1	7.3
NDF*	12.4	10.4	39.6	37.9	25.3	33.8	2.3	31.4
Matières grasses	1.5	3.7	3.4	6.5	5.1	2.7	2.5	3.9
Cendres brutes	1.6	1.2	5	3.6	4.7	6.1	1.8	6.0
Amidon	60.5	64.1	19.8	3.8	12.6	18.0	17.2	11.5

Source : tables INRA de composition et de valeur nutritive des matières premières

*: le NDF (Neutral Detergent Fiber) est un paramètre classique de mesure du taux de fibres (lignine + cellulose + hémicelluloses + une partie des pectines)

Les tubercules de **pommes de terre de variétés féculières** ont un contenu de 16 à 27 % de matière sèche (dont 75 à 80 % est de l'amidon).

Les racines de manioc ont typiquement la composition suivante : 70 % d'eau, 22 % d'amidon, 5 % de sucres, 1 % de protéines, 1 % de fibres. Les variations sont toutefois nombreuses suivant les variétés et les conditions de culture.

II.1.3 – IMPORTANCE AGRICOLE ET PRINCIPAUX PAYS PRODUCTEURS

II.1.3.1 - LE CLASSEMENT DES PAYS PRODUCTEURS

Plante à rendement élevé, pouvant être cultivé dans les régions tropicales comme tempérées, le maïs est la céréale dont la production mondiale est la plus élevée (820 Mt en 2008). Les Etats-Unis totalisent plus d'un tiers des récoltes, la Chine un cinquième, suivie de loin par l'Union européenne et le Brésil. Le blé et le riz suivent, quasiment à égalité de tonnages. L'Union européenne est le premier producteur mondial de blé, devant la Chine et l'Inde. Le riz reste une plante très majoritairement cultivée en Asie, la Chine et l'Inde étant les principaux producteurs.

**Production de blé (tendre et dur), de maïs grain et de riz en 2005 et 2008
(Millions de tonnes)**

	Blé		Maïs		Riz	
	2005	2008	2005	2008	2005	2008
UE 27	135.4	150.3	63.2	62.5	2.7	2.6
Chine	97.4	112.5	139.4	166.0	180.6	191.9
Inde	68.6	78.6	14.7	19.3	137.7	148.3
USA	57.3	68.0	282.3	307.4	10.1	9.2
Russie	47.7	63.8	3.2	6.7	0.6	0.7
Canada	25.7	28.6	9.3	10.6	-	-
Ukraine	18.7	26.0	7.2	11.5	0.1	0.1
Australie	25.2	21.4	0.4	0.4	0.3	0
Pakistan	21.6	21.0	3.1	4.0	8.3	10.4
Turquie	21.5	17.8	4.2	4.3	0.6	0.8
Kazakhstan	11.2	12.5	0.4	0.4	0.3	0.3
Argentine	12.7	8.3	20.5	22.0	1.0	1.2
Egypte	8.1	8.0	7.1	6.5	6.1	7.3
Brésil	4.7	5.9	35.1	59.0	13.2	12.1
Thaïlande	0	0	3.9	3.8	30.3	30.5
Indonésie	-	-	12.5	16.3	54.2	60.3
Bengladesh	1.0	0.8	0.4	1.3	39.8	46.9
Vietnam	-	-	3.8	4.5	30.3	30.5
Monde	626.9	690.0	713.9	822.8	634.5	685.0
<i>France</i>	36.9	39.0	13.7	15.8	0.1	0.09
<i>RFA</i>	23.7	26.0	4.1	5.1	-	-
<i>Italie</i>	7.7	8.9	10.4	9.5	1.4	1.4
<i>UK</i>	14.9	17.2	-	-	-	-

Source : FAO - les pays sont classés suivant l'importance décroissante de leur production de blé de 2008.

La France est le premier producteur de blé et de maïs de l'Union européenne. Elle est suivie par l'Allemagne pour le blé et par l'Italie en ce qui concerne le maïs.

Blé, maïs grain et riz dans quelques grands pays producteurs en 2008

	Surfaces (millions d'ha)			Production (millions t)			Rendement (qx/ha)		
	blé	maïs	riz	blé	maïs	riz	blé	maïs	riz
France	5.5	1.7	0	39.0	15.8	0.1	71.0	92.9	54.3
Italie	2.3	1.1	0.2	8.9	9.5	1.4	38.7	90.1	62.4
RFA	3.2	0.5	-	26.0	5.1	-	80.9	98.1	-
UK	2.1	-	-	17.2	-	-	82.8	-	-
Espagne		0.4	0.1	6.7	3.6	0.7		99.0	69.2
Hongrie	1.1	1.2	0	5.7	9.0	0.0	50.2	74.7	43.5
Pologne	2.3	0.3	-	9.3	1.8	-	40.7	58.1	-
Roumanie	2.1	2.4	0	7.2	7.8	0.0	34.2	32.3	49.3
UE	26.5	8.9	0.4	150.0	62.5	1.8	40.3	70.8	
Chine	23.6	29.9	29.5	112.5	165.5	193.3	47.6	55.6	65.6
Inde	28.0	8.3	44.0	78.4	19.3	148.3	28.0	23.2	33.7
USA	22.5	31.8		68.0	307.4	9.3	30.2	96.6	
Russie	26.1	1.7	0.2	63.8	6.7	0.8	24.5	38.6	46.0
Canada	10.0	1.2	-	28.6	10.6	-	28.5	90.6	-
Ukraine	7.1	2.4	0	25.9	11.4	0.1	36.7	46.9	Ns
Australie	13.6	0.0	0.0	21.4	0.6	-	15.8	56.9	Ns
Pakistan	8.5	1.1	3.0	21.8	3.2	12.1	24.5	36.1	35.2
Turquie	7.6	0.6		17.8	4.3	0.8	23.5	72.0	75.7
Kazakhstan	12.9	0.1	0.1	12.5	-	0.2	9.7	55.5	33.7
Argentine	4.3	3.4	0.2	8.3	22.0	1.3	19.7	64.5	68.2
Egypte	1.2	0.8	0.8	8.0	6.5	7.3	65.0	79.8	97.3
Brésil	2.4	14.4	2.9	5.9	59.0	8.1	24.8	40.9	42.3
Mexique	0.8	7.4	0	4.0	24.3	0.2	50.1	33.1	44.6
Afrique du Sud	0.8	2.8	0.1	2.3	11.6	0.0	30.6	41.4	22.9
Thaïlande	-	1.0	10.2	0	3.8	30.5	10.0	39.3	29.8
Indonésie	-	4.0	12.3	-	16.3	60.3	-	40.8	49.0
Monde	223.6	161.0	159.0	690.0	822.8	685.0	30.9	51.1	43.0

Source : FAO Hors UE, les pays sont classés suivant l'importance décroissante de leur production en blé. Ces données peuvent différer de statistiques nationales plus précises car elles réunissent les différentes espèces et types variétaux de blé (blé tendre, blé dur, d'hiver, de printemps).

Pomme de terre

La récolte mondiale de pomme de terre a été de **314 millions de tonnes** sur 18 millions d'hectares en 2008 (325 Mt en 2005). L'Union Européenne est le plus gros producteur (61.6 Mt), suivie par la Chine (57 Mt), l'Inde (34.5 Mt), la Russie (29 Mt), l'Ukraine (19.5 Mt) et les USA (18.7 Mt). En Europe, l'Allemagne (11.4 Mt) devance la Pologne (10.5 Mt), les Pays Bas (6.9 Mt) et la France (6.8 Mt).

Le rendement moyen mondial est de 17.3 t/ha, de 13 t/ha en Chine et de 28.9 t/ha pour l'Union Européenne avec des valeurs plus élevées pour des pays comme l'Allemagne et la France (44 t/ha).

Ces données de production ne doivent pas être comparées avec celles des céréales présentées précédemment : la teneur en matière sèche des pommes de terre varie en effet de 16 à 27 % en France alors qu'elle est de l'ordre de 86-87 % pour une céréale bien récoltée.

Les surfaces de pomme de terre en France sont d'environ 150 000 ha et plutôt stables. En revanche, celles spécifiquement cultivées avec des variétés féculières sont en baisse (27 000 ha en 2005, 22 000 ha en 2009). Les rendements de ces dernières restent bons à 44 t par ha en moyenne. 251 000 tonnes de fécule ont été fabriquées en 2009. La crise des secteurs du papier et de la colle, utilisateurs d'amidon de pomme de terre mais aussi la concurrence entre les amidons de blé et de pomme de terre ont une incidence directe sur les surfaces contractualisées pour la production de variétés féculières.

Manioc

Les principaux pays producteurs de manioc sont le Nigeria (45 Mt), la Thaïlande (28 Mt), le Brésil (27 Mt), l'Indonésie (22 Mt) et la République démocratique du Congo (15 Mt), suivies par le Ghana, le Vietnam, l'Inde, l'Angola, etc. La production mondiale a été en 2008 d'environ **230 millions de tonnes** selon la FAO (pour une surface totale de 18.7 millions d'hectares). Les rendements moyens sont de 23.3 t brut/ha pour la Thaïlande, 17 t/ha pour le Vietnam, 14 t/ha pour le Brésil et seulement 11.8 t/ha pour le Nigeria et 8 t/ha pour la RDC, avec une moyenne mondiale de 12.5 t/ha. Ces derniers chiffres sont peu significatifs car ils rassemblent les performances de petites cultures vivrières et celles d'exploitations organisées pour alimenter les industries de transformation.

Peu des pays producteurs de manioc se sont dotés d'une filière et d'une industrie amidonnière performante. L'industrie d'extraction de l'amidon est quasiment inexistante en Afrique, en dehors du Nigeria et de l'Afrique du Sud. En Amérique latine, l'extraction d'amidon représente une part minimale de la production totale de manioc (alors que la production d'amidon de maïs y est importante). En revanche, dès 2006, la Thaïlande utilisait 50 % de sa production annuelle de racines de manioc pour en extraire quelque 2 millions de tonnes d'amidon dont la moitié était exporté vers le Japon et Taiwan. Les chiffres ont augmenté depuis.

Les récoltes des différentes cultures présentées ont des teneurs en matière sèche et en amidon très différentes. Pour mieux apprécier les gisements potentiels d'amidon que représentent chacune des cultures présentées, on peut se livrer au calcul simple présenté dans les deux tableaux ci-dessous (qui ne tiennent pas compte des rendements d'extraction) :

Calcul théorique de la production végétale d'amidon suivant les espèces

	% Amidon sur brut	Récolte Monde 2008 Mt	Equivalent amidon Mt	Récolte France 2008 Mt	Equivalent amidon Mt
Blé	55-60	690	380-417	39	21.5-23.6
Maïs	62-64	823	510-527	15.8	9.8-10.1
Riz	76	685	521	0.09	0.1
Pomme de terre	18	314	57	6.8	1.2
Manioc	22	230	51	0	0

Calcul théorique de la production moyenne d'amidon à l'hectare

	% Amidon sur brut	Rendement brut t moyen/ha - monde	t amidon / ha	Rendement t brut/ha France*	t amidon / ha
Blé	55-60	3.1	1.7-1.9	7.5	4.1-4.5
Maïs	62-64	5.1	3.2-3.3	9	5.6-5.8
Riz	76	4.3	3.3	6	4.6
Pomme de terre	18	17.3	3.1	4.4	7.9
Manioc	22	12.5	2.8	-	-

* : données France dans des scénarii de rendements plutôt favorables.

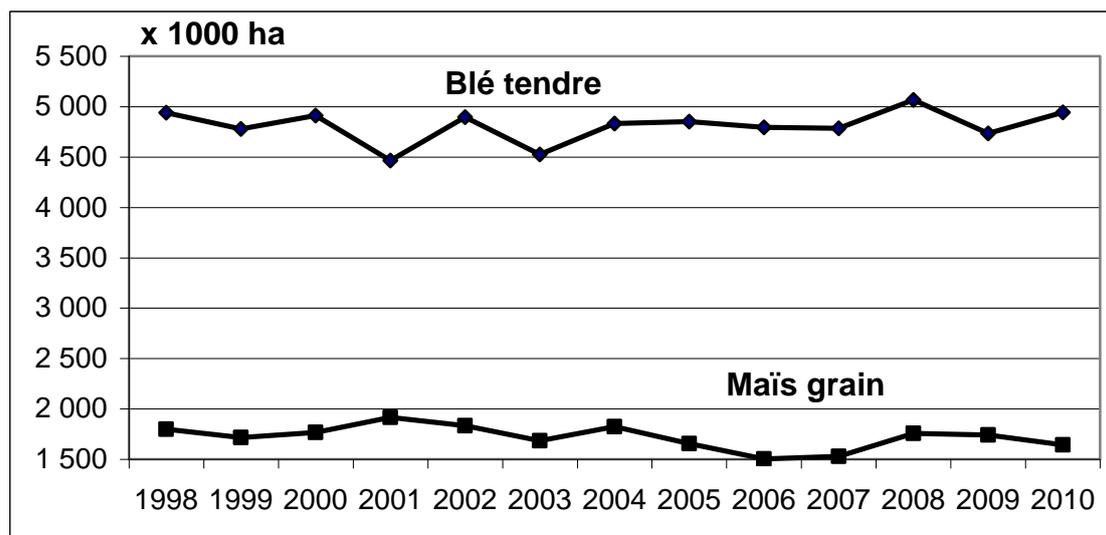
Ces résultats sont indicatifs et il faut se garder d'en tirer des conclusions hâtives car ils sont les moyennes de données disparates. Ils montrent toutefois que le gisement global est du même ordre de grandeur pour les trois grandes céréales et très inférieur pour le manioc ou la pomme de terre.

Avec un rendement de 20 t/ha, une récolte de manioc "contient" 4.4 tonnes d'amidon. La pomme de terre et le manioc offrent donc des bons potentiels à l'hectare mais la récolte, très riche en eau, ne peut guère voyager et se conserve mal. Elle doit donc être traitée à proximité immédiate des zones de culture.

II.1.3.2 - L'EVOLUTION DE LA CULTURE DU BLE ET DU MAÏS SUR LE TERRITOIRE FRANÇAIS

Les surfaces de blé et de maïs grain ne montrent guère d'évolution ces dernières années en France. Celles de blé varient entre 4.5 et 5 millions d'hectares alors que celles de maïs grain se positionnent entre 1.3 à 1.4 millions d'hectares, le total des surfaces en maïs atteignant entre 2.85 et 3.2 millions d'hectares lorsque l'on y inclut les surfaces de maïs fourrage.

Evolution récente des surfaces de blé tendre et de maïs grain en France

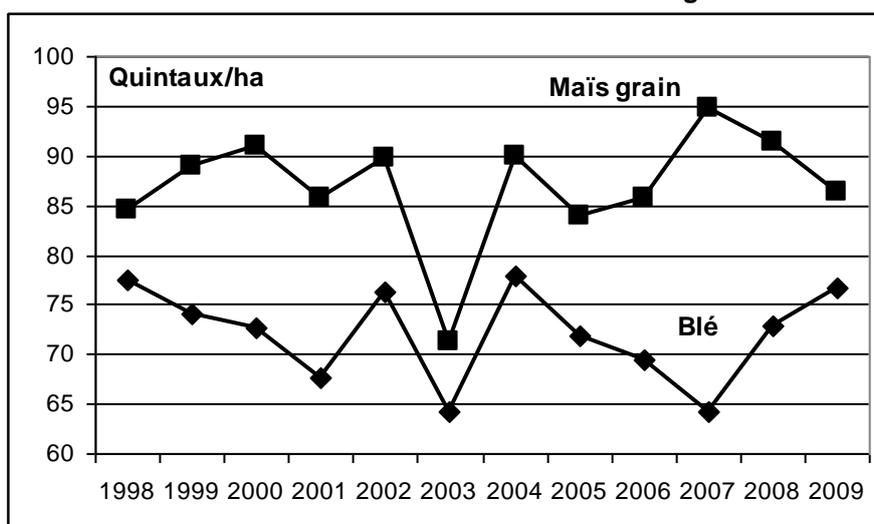


Source : Agreste – Semences et Progrès

Les rendements moyens du maïs oscillent entre 85 et 95 quintaux par hectare, hors accident climatique (année 2003). En 2009, le rendement du blé a été de 77 quintaux par hectare. Les disparités régionales restent très importantes (des maxima de 120 quintaux par hectare ont été atteints dans le Bassin Parisien, alors que la récolte a été décevante dans le Sud Ouest, entre 45 et 70 quintaux par hectare).

Les rendements de ces deux cultures ne montrent plus d'évolution récente marquée alors qu'ils avaient régulièrement progressé pendant de très longues années. On considérerait même que toutes les grandes cultures avaient, en tendance lourde, des progressions linéaires de rendement dans notre pays.

Evolution récente des rendements de blé et de maïs grain en France



Source : Agreste – Semences et Progrès

Des analyses récentes de l'évolution du rendement des grandes cultures en France (présentations à l'académie d'agriculture du 5 mai 2010) apportent les conclusions suivantes :

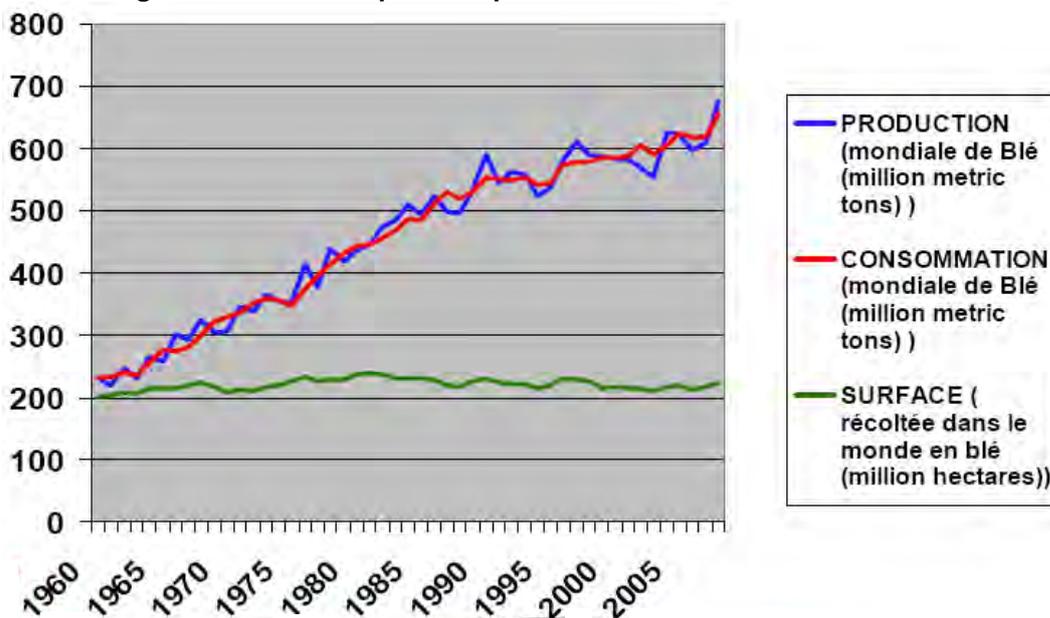
- La progression à moyen terme du rendement du maïs se poursuit normalement selon les chercheurs, en dépit de résultats annuels en dents de scie, fonction des conditions climatiques.
- Le rendement moyen du blé progresse en revanche moins vite que "prévu". Les rendements actuels "devraient" être de 14 q/ha plus élevés que ceux observés. Le progrès génétique se poursuit toutefois mais on observe une baisse régulière depuis 20 ans des rendements des témoins qui semble liée principalement à deux paramètres :
 - L'évolution des itinéraires techniques, sous la pression de la PAC, avec la réduction des intrants (fumure azotée, pesticides) et l'utilisation plus importantes de semences de ferme.
 - Le réchauffement des températures, défavorable aux cultures d'hiver alors qu'il permettrait des améliorations de rendement des cultures de printemps. Le blé d'hiver serait donc une "victime" du réchauffement climatique.



II.1.3.3 – LES PERSPECTIVES D'EVOLUTION FUTURE DES PRODUCTIONS ET RENDEMENTS DU BLE ET DU MAÏS

A une échelle plus globale, il est intéressant d'examiner les évolutions de la production de blé et de maïs.

L'augmentation historique de la production mondiale de blé avec la demande

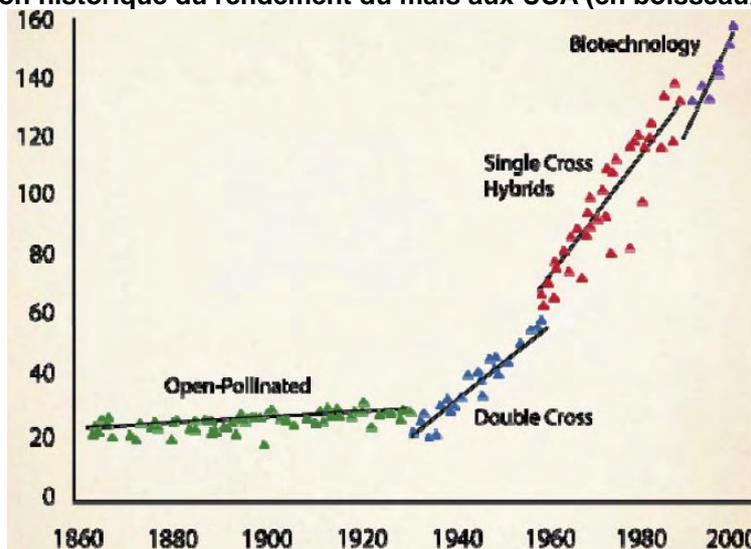


Source : Tereos – Exposé B. Chaud Colloque Panorama IFP 2010 – D'après Merryl Linch, USDA

La production mondiale de blé poursuit sa progression alors que les surfaces emblavées sont stables. C'est l'intensification de la culture qui permet cette croissance forte des rendements.

Les prospectives réalisées par les nord-américains à propos du maïs permettent de poser un autre regard sur l'avenir. Au delà des progrès des pratiques agricoles et de la sélection semencière classique, des ruptures technologiques peuvent-elles être attendues qui repousseront le fameux "potentiel agronomique" d'une espèce ?

Evolution historique du rendement du maïs aux USA (en boisseaux par ha)

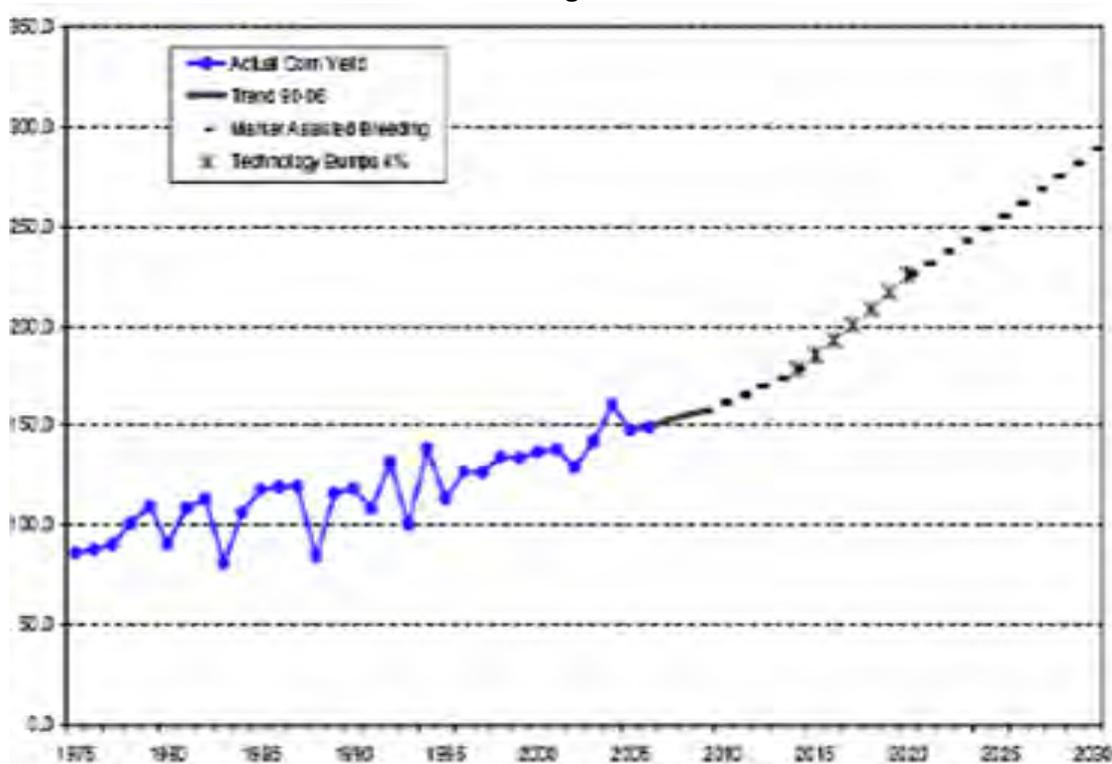


Source : Tereos – Exposé B. Chaud au Colloque Panorama IFP 2010 – D'après Accenture.

Les nord-américains répondent sans hésitation à cette question : il y aura poursuite des progrès et les ruptures technologiques viendront du génie génétique végétal. Les premiers maïs OGM étaient porteurs de résistances aux herbicides. Celles-ci ne permettent pas d'amélioration directe des rendements mais facilitent les pratiques culturales. Les résistances aux insectes ont suivi. Il est dès maintenant, difficile de commercialiser une semence de maïs aux Etats-Unis sans qu'elle soit porteuse de 2 ou 3 événements de transformation (un de résistance à un herbicide, un ou deux de résistance aux insectes). Ceci n'est encore que l'émergence d'une technologie qui pourra peu à peu permettre de remodeler significativement le métabolisme des plantes cultivées pour améliorer notamment leur utilisation de l'eau et de l'azote.

En France et dans une partie de l'Europe, nous restons absents de ces développements technologiques et condamnons ainsi à moyen terme la compétitivité de notre agriculture par rapport à celle des autres continents.

Et les perspectives de progression que lui voit encore l'USDA avec le développement des biotechnologies :



Source : USDA.

Notre agriculture vit une étape où elle se rationalise tant d'un point de vue environnemental qu'économique. Cela est nécessaire mais il faut se garder de sombrer dans l'excès, en diabolisant la productivité (recherchée dans tout secteur d'activité), rebaptisée pour se faire "productivisme".

Il est en revanche très risqué de pas explorer les pistes biotechnologiques qui permettront une nouvelle croissance des rendements, tout particulièrement dans un contexte de changement climatique, pour faire produire plus à des terres agricoles plus rares (leurs surfaces diminuent très significativement chaque année dans notre pays, pour construire des bâtiments, des routes et des parkings).

II.1.4 – DESCRIPTION DES FILIERES AMIDON

II.1.4.1 - SCHEMA GENERAL (voir schéma en annexe)

Le schéma général, focalisant sur les filières blé et maïs, est présenté en annexe 1. Les filières blé, maïs ou pomme de terre non alimentaires sont historiquement des filières amidon, à partir desquelles on peut obtenir du glucose et tous ses dérivés. La production de bioéthanol de céréales se positionne à part mais reste le plus souvent développée par des amidonniers.

Les molécules produites ou pouvant être produites à partir de l'amidon sont extrêmement nombreuses. Le schéma présenté est donc forcément simplifié et réducteur.

II.1.4.2 – EXTRACTION DE L'AMIDON

Chaque espèce végétale est traitée selon des procédés différents dont on peut rapporter ici quelques éléments :

- Les grains de **blé** sont tout d'abord nettoyés puis réduits en farine, comme dans les procédés de meunerie. Les coproduits de cette première étape sont les sons et les germes, ainsi séparés à sec. La farine est humidifiée et la pâte obtenue est lavée pour en extraire le gluten - riche en protéines - et les solubles de blé.
- Le **maïs**, en revanche, est traité par voie humide. Les grains nettoyés sont mis à tremper dans de l'eau chaude contenant de l'anhydride sulfureux pour être ramollis. Les eaux de trempage, riches en substances solubles (jusqu'à 60 g/l) sont récupérées et destinées soit à la fermentation (on parle de "corn steep"), soit à enrichir les drêches destinées à l'alimentation animale.

Au trempage, succèdent un premier broyage grossier et le dégermage. Survient alors un broyage fin, suivi d'un tamisage (séparation des drêches) et d'une centrifugation qui permet d'obtenir le lait d'amidon d'une part, les protéines sous forme de gluten d'autre part.

Germes de blé et de maïs sont riches en huiles de qualité, valorisées dans l'agroalimentaire. Les tourteaux associés à l'extraction de l'huile sont utilisés en alimentation animale.

- **La fécule de pomme de terre.** Les tubercules réceptionnés et stockés sont lavés, râpés et broyés dans de l'eau en présence d'anhydride sulfureux. Une décantation permet d'extraire les solubles et les protéines. La purée d'amidon est alors tamisée, ce qui permet de séparer les pulpes. Le raffinage permet d'obtenir un lait de fécule à partir duquel sont produites puis séchées des fécules natives ou modifiées.

II.1.4.3 – LES GRANDS PRODUITS DES FILIERES AMIDON

On peut ordonner les principaux produits de la façon suivante :

- **Les coproduits de l'obtention de l'amidon**, issus des organes et tissus de la plante et du grain ne contenant pas d'amidon.

Ce sont, pour le blé :

- les pailles du blé, riches en lignocellulose,
- les sons, concentrés en fibres et en protéines,
- les glutens de blés, riches en protéines.

Pour le maïs, les coproduits sont :

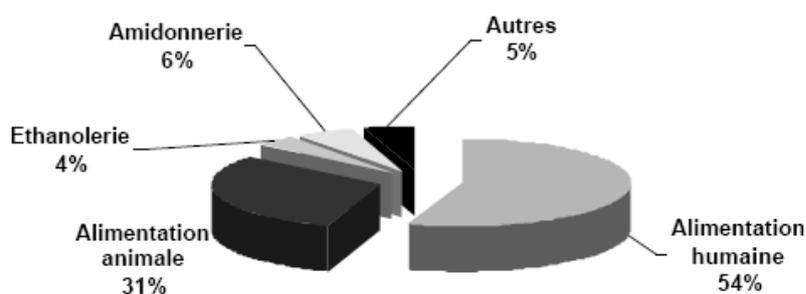
- les pailles et rafles de maïs,
- les drèches = corn gluten feed (coproduit déshydraté de l'extraction de l'amidon par voie humide),
- le gluten de maïs (corn gluten meal).

Pour la pomme de terre, les coproduits (80 000 t/an en France) sont :

- des pulpes humides, surpressées ou déshydratées,
- des concentrés protéiques de pomme de terre, pouvant titrer 78 % de protéines.

- **Le bioéthanol.** Il est obtenu par une fermentation suivie d'une distillation dans des unités industrielles spécifiques. Cette filière, indépendante mais souvent mise en œuvre par des amidonniers, fournit les marchés de masse des carburants. Les coproduits de la production de bioéthanol sont les drèches de distillerie. Pour le maïs, on parlera de corn distillers, de solubles de maïs ou de drèches et solubles de distillerie de maïs. Il s'agit des grains épuisés auxquels sont ajoutés des solubles en quantités variables.
- **Les amidons.** Natifs ou modifiés chimiquement, ils ont de nombreuses applications industrielles.
- **Les dérivés du glucose.** Ils peuvent être obtenus en une ou plusieurs étapes, selon des transformations chimiques ou par fermentation. Dans cette famille de produits, l'origine de l'amidon hydrolysé en glucose (blé, maïs ou pomme de terre) n'a plus aucune conséquence.

Débouchés mondiaux des cultures amylicées



Source : Syral

II.1.4.4 – INDUSTRIES CONCERNEES

La transformation ou du maïs du blé en molécules d'intérêt pour l'industrie non alimentaire est effectuée par différentes industries :

Les amidonniers ont une activité ancienne de "bio raffinerie". Ils savent extraire l'amidon du blé, du maïs ou de la pomme de terre et valoriser ses coproduits. La grande majorité des amidonniers associe une glucoiserie à l'amidonnerie. Certains industriels ne transforment pas le glucose tandis que d'autres lui font subir des conversions par réactions chimiques ou biologiques pour obtenir une gamme de molécules plus ou moins diversifiées.

En France, les sociétés suivantes exploitent des **amidonniers ou des féculeries** :

- **Cargill** (Haubourdin, Nord – maïs), groupe nord-américain et 1^{er} amidonnier européen.

- **Chamtor** (Bazancourt, Marne – blé).
- **Féculerie Haussimont** (Haussimont, Marne - pomme de terre) détenue majoritairement par le groupe d'emballages familial français Sphère.
- **Roquette Frères** (Beinheim, Bas Rhin – blé, maïs ; Lestrem, Pas de Calais - blé, maïs ; Vécquemont, Somme – pomme de terre ; Vic-sur-Aisne, Aisne - pois). Roquette est le 2^{ème} amidonnier européen derrière Cargill.
- **Syral - groupe Tereos** (Marckolsheim, Bas-Rhin - blé, maïs ; Nesle, Somme - blé). Syral est le 3^{ème} amidonnier européen.

Parmi les grands mondiaux du secteur, on retrouve également :

ADM = Archer-Daniels-Midland Company (USA et international), **AVEBE** (groupe hollandais, spécialisés dans l'amidon de pomme de terre), **BENEO-Remy NV** (Belgique – spécialiste du riz et filiale de l'Allemand **Südzucker**), **Chemstar Products Company** (USA), **China Essence Group Ltd.** (Chine), **China Sun Bio-Chem Technology Group Co Ltd** (Chine), **Grain Processing Corporation** (USA), **National Starch** (USA ,mais filiale du chimiste néerlandais **Akzo Nobel**), **Penford Corporation**, **Riddhi Siddhi Gluco Biols Ltd.** = RSGB (leader en Inde, avec 25 % du marché national – Roquette a acquis 15 % de son capital) et **Tate and Lyle Plc.**(UK).

Les producteurs d'éthanol. Le développement de l'éthanol biocarburant a permis de faire croître une industrie spécifique, qui se retrouve rattachée à des groupes sucriers mais aussi à des amidonniers. Les producteurs d'alcool ou d'éthanol de blé et de maïs sont en France :

- **Abengoa Bioenergy France** qui rassemble l'espagnol Abengoa, des organismes collecteurs et la filière maïs (site de Lacq (64) - 120 000 t d'agrèments – production de 200 000 t d'éthanol dont 160 000 tonnes à partir de 500 000 t de maïs, les 40 000 t restantes étant d'origine vinique. Coproduit : 150 000 t de drèches).
- **Brie Champagne Ethanol** (Provins), une unité ancienne encore en fonctionnement.
- **Cristal Union**, dans une unité mixte céréales-betteraves à Bazancourt, d'une capacité de 280 000 t (167 500 t d'agrèments).
- **Roquette** (Site de Beinheim – 95 Kt d'agrèments pour 160 Kt de capacité de production).
- **Tereos** (Site de Lillebonne - agrèments de 160 000 tonnes en 2010, pour une capacité de production de 240 Kt ; site de Nesle).

Les principales sociétés fabriquant des produits de fermentation issus de la transformation chimique du glucose seront citées lors de l'examen des molécules concernées. Il en sera de même des sociétés fabriquant des bioplastiques à base d'amidon,

II.1.4.5 – ECONOMIE DE LA FILIERE

II.1.4.5.1 – Les paramètres de conversion standard

Production d'amidon :

1 t de blé → 550 kg d'amidon + 200-230 kg d'issues + 100 kg des solubles + 80 kg de gluten

1ha de blé → 75 qx de grain → 4.125 t d'amidon

1 t de maïs → 620-630 kg d'amidon + 40-50 kg de gluten de maïs (gluten meal) + 60-70 kg de germes + 190-200 kg de drèches "corn gluten feed".

1 ha de maïs → 90 qx de grain → 5.625 t d'amidon

Production d'éthanol : 1 t = 12.65 hl 1 hl = 79.05 kg

1 t de blé → 355 l = 280 kg d'éthanol

Pour le rendement moyen français de 75 qx/ha :

1 ha de blé = 26.5 hl = 2.1 t d'éthanol + 1.3 t de drêches

Pour un rendement de 100 qx/ha : 1 ha de blé = 35.5 hl = 2.8 t d'éthanol + 1.7 t de drêches

1 t de maïs → 370 l = 290 kg d'éthanol

Pour le rendement moyen français de 90 qx/ha :

1 ha de maïs = 33 hl = 2.65 t d'éthanol + 2.75 t de drêches

Pour un rendement de 100 qx/ha : 1 ha de maïs → 37 hl = 2.9 t d'éthanol

II.1.4.5.2 – Le marché des céréales**Le devenir des récoltes françaises**

La France est un important exportateur de blé et de maïs, sur des marchés où la concurrence est forte. Parmi les consommations intérieures, l'alimentation animale reste le premier débouché, particulièrement pour le maïs.

Bilan simplifié du marché français du blé tendre 2008-2009 et prévisions 2009-2010

Usages	2008-2009		2009-2010	
	Mt	%	Mt	%
Export grains	16,5	44	15,5	43
dont export grains vers pays tiers	9,6	26	8,5	24
dont Export grains vers UE	6,8	18	6,9	19
Export farine	1,0	3	0,9	3
Alimentation animale	5,2	14	5,4	15
Panification	3,0	8	2,9	8
Amidonnerie	2,6	7	2,8	8
Biscuiterie	1,1	3	1,1	3
Bio carburant	0,8	2	1,2	3
Malterie-pâtisserie	0,9	2	0,9	2
Divers et reports	6,2	17	5,4	15
Total production	37,1	100	36,1	100

Source : FranceAgriMer, janvier 2010

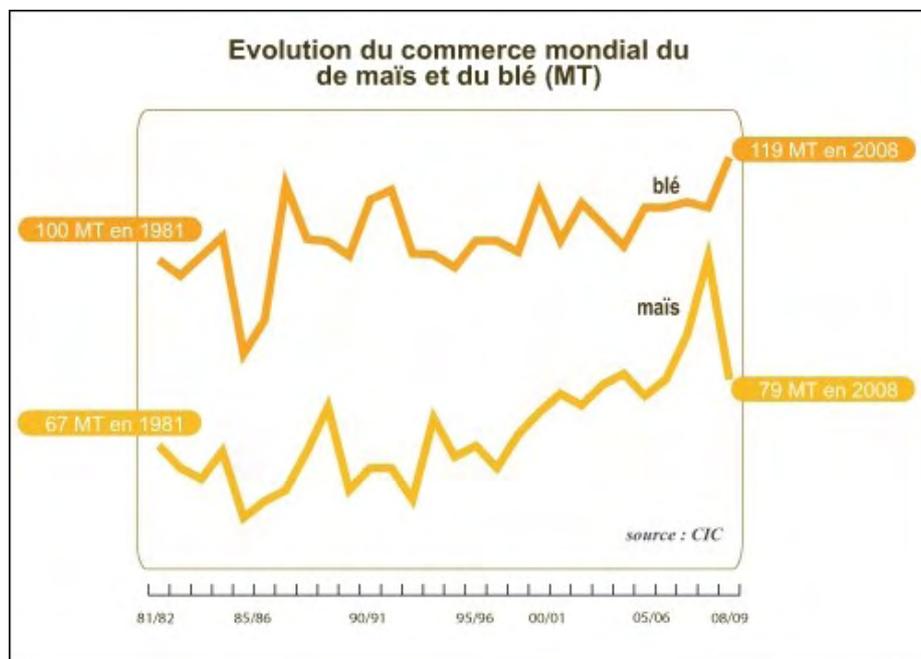
La part de l'amidonnerie et du bioéthanol dans **les débouchés du blé français** est passée de 9 % en 2008-2009 (3.4 millions de tonnes) à 11 % (4 millions de tonnes) en 2009-2010.

Des 13 à 16 millions de tonnes de **maïs grain** récoltées en France chaque année, 2 millions environ sont utilisées par l'amidonnerie et 500 000 t pour la production de bioéthanol.

Commerce mondial des céréales

Il s'échange environ 220 à 230 millions de tonnes de céréales sur les marchés internationaux monde dont 110 à 140 millions de tonnes de blé (tous types confondus).

En 2008-2009, les échanges mondiaux de blé tendre ont atteint 117.7 millions de tonnes, les USA restant le premier exportateur (24.5 Mt), suivis par la Russie (19 Mt), l'Union Européenne (18 Mt), le Canada (17.2 Mt), l'Australie (13.5 Mt) et l'Ukraine (8.2 Mt). Les échanges de maïs traditionnellement moins importants, se sont rapprochés de ceux du blé en 2007 (101 millions de tonnes) avant de régresser en 2008 à 84 millions de tonnes. On attend entre 85 et 90 millions de tonnes cette année. Les principaux exportateurs sont les USA (45 à 60 Mt selon les années), l'Argentine (12 à 15 Mt) et le Brésil (7 à 11 Mt).

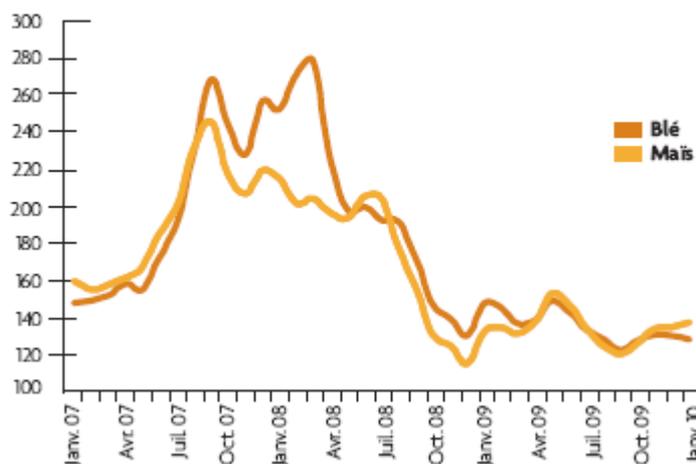


Source : AGPM

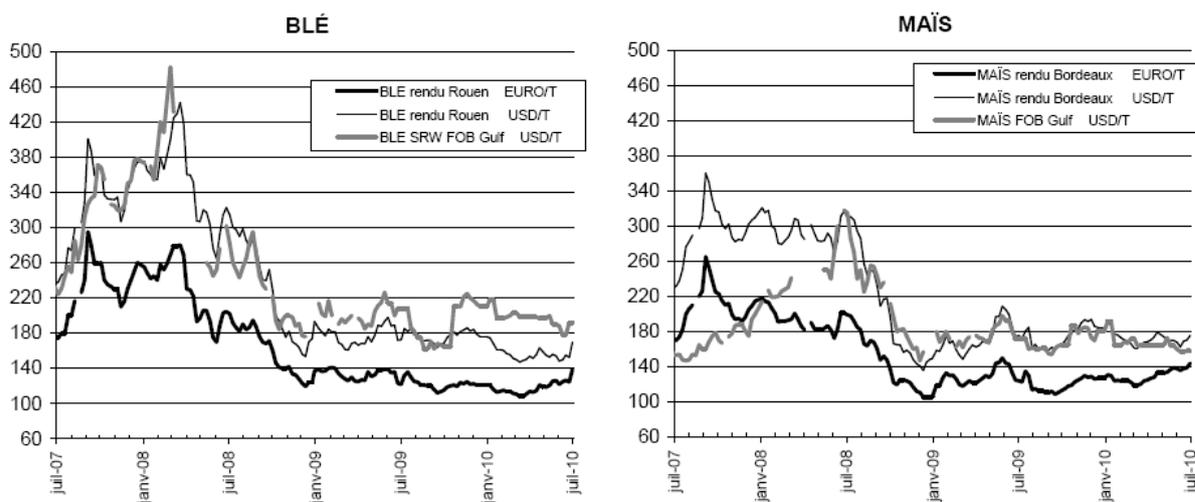
Les prix du blé et du maïs ont connu des fortes variations ces dernières années avec un pic entre les étés 2007 et 2008. On est revenu, depuis fin 2008, dans des intervalles de variations de prix plus habituels, entre 100 et 140 €/t pour des récoltes rendues à des ports français.

Evolution du prix des céréales en Europe

PRIX DES CÉRÉALES DANS L'UNION EUROPÉENNE (€/t)



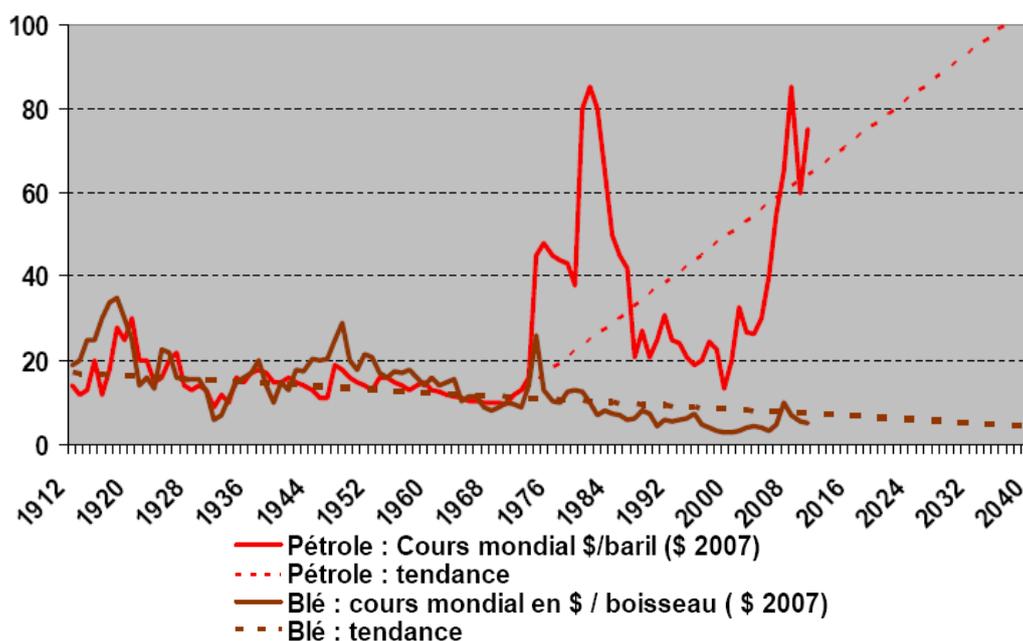
Source : Tereos – rapport annuel 2008-2009



Source : FOP

En dépit des hausses brutales de ces dernières années, le prix du blé (hors inflation) resterait structurellement à la baisse, à l'inverse de celui du pétrole, ce qui est essentiel à considérer pour les applications dans la chimie des matières premières végétales. Il convient cependant de rester prudent en ce qui concerne l'avenir, la hausse de la consommation en céréales des grands pays en développement et le développement massif d'usages non alimentaires pouvant modifier les équilibres établis.

Evolution comparée des prix du pétrole et du prix du blé



Source : Tereos – Exposé B. Chaud aux journées IFP 2010 – D'après Morgan Stanley

II.1.4.5.3 – Les données spécifiques au secteur amidonnier

La production mondiale d'amidon ou d'équivalent amidon (pour les produits directement transformés dans les amidonneries) a été de 70 millions de tonnes en 2008, dont 75 % issu de maïs. Les Etats-Unis dominent encore le marché mais c'est en Asie que les croissances de l'offre et de la demande sont les plus fortes.

Production mondiale d'équivalent amidon natif en millions de tonnes

	2000	2008
Etats-Unis	25	25
Chine	Inclue dans "autres"	14
Union Européenne	8.2	9.5
Japon	Inclue dans "autres"	3
Autres (Asie, Amérique latine, etc.)	15.5	18
Total	48.5	70

Source : USIPA

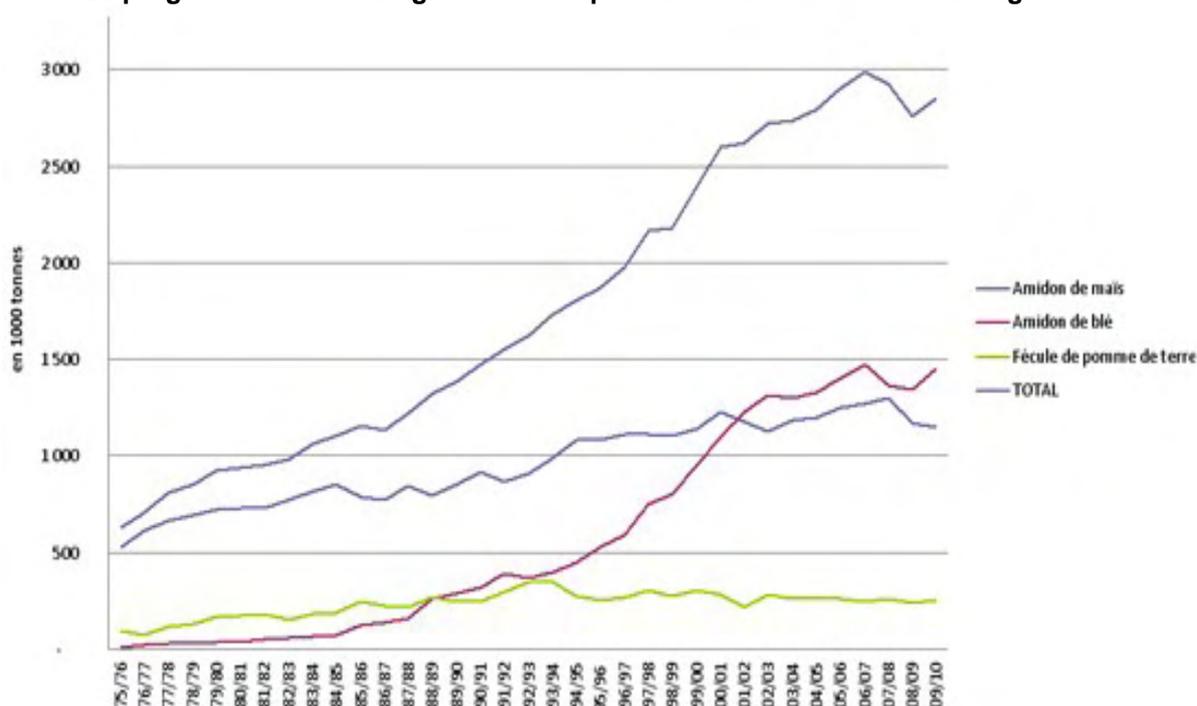
Dans l'Union européenne, la part de l'amidon de maïs est certes la plus importante mais le blé (surtout en France) et la pomme de terre (surtout dans l'Est de l'Europe) tiennent des places significatives. La production d'amidon de blé est s'est fortement développée en France.

Production d'équivalent amidon natif en Europe et en France en 2008

		Maïs	Blé	Pomme de terre	Total
Production x Kt	UE	4660 (47 %)	3670 (37 %)	1590 (16 %)	9920 (100 %)
	France	1155 (42 %)	1350 (49 %)	250 (9 %)	2755 (100 %)
Surfaces agricoles dédiées x 1000 ha	UE	950 (42 %)	1050 (47 %)	250 (11 %)	2250 (100 %)
	France	210 (35 %)	360 (60 %)	30 (5 %)	600 (100 %)

Source : USIPA

La progression des tonnages d'amidon produits en France selon leur origine



Source : USIPA

Le marché de la fécula

La production d'amidon de pomme de terre est organisée et contingentée au niveau européen. Le contingent (quota) français est actuellement de 265 000 tonnes, soit 13,6% du total européen. 252 000 tonnes devraient être produites cette année à partir des récoltes de près de 1500 producteurs, cultivant 23 000 ha. La production de fécula française mobilisera un peu plus d'1 million de tonnes de pommes de terre. En France, **2 usines** transforment la pomme de terre en fécula : **Vecquemont (groupe Roquette)** et **Haussimont (groupe Sphere)**.

II.1.5 – LES PRINCIPAUX PRODUITS DES FILIERES AMIDON

II.1.5.1 - LES PRODUITS DE L'AMONT DE LA FILIERE

Les pailles de blé, les rafles de maïs et les pailles de riz sont des matières premières lignocellulosiques.

Les pailles de céréales sont traditionnellement utilisées comme litière pour le bétail. Une part importante doit être restituée au sol, directement ou sous forme de fumier, pour préserver sa teneur en humus et en matières organiques.

Les pailles peuvent être valorisées comme combustible, directement ou sous forme de granulés ("agropellets") mais elles présentent l'inconvénient de générer des fumées acides et du mâchefer. Des technologies récentes, comme celles développées en France par **RAGT Energie** (groupe RAGT) permettent de supprimer ces deux inconvénients en formulant les granulés de paille avec des additifs minéraux neutralisant les molécules en cause. D'autres composés, comme des grains déclassés et impropres à la consommation, peuvent être incorporés aux granulés.

Les pailles peuvent être utilisées dans le secteur du bâtiment pour fabriquer des panneaux offrant une très bonne isolation phonique et thermique. La société française **Stramontec** est active sur ces innovations.

Les pailles et rafles feront partie des matières premières pour les bioraffineries de seconde génération qui transformeront en biocarburants et intermédiaires de synthèse valoriseront leur cellulose et leurs hémicelluloses, et, à terme, leurs lignines.

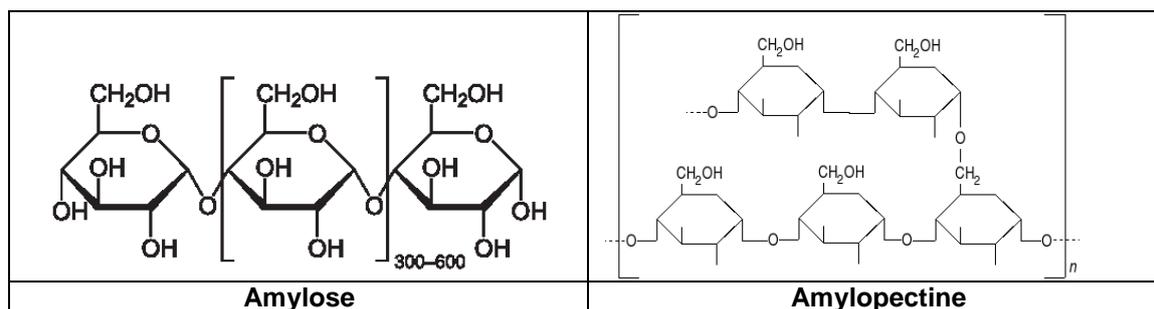
On peut dès maintenant anticiper des concurrences d'usages, les ressources en pailles qui peuvent être exportées des exploitations agricoles étant limitées.

La plante entière de maïs, broyée et additionnée d'amidon et de glycérol, est utilisée pour la production d'un **biomatériau composite** biodégradable le "Vegemat", par la société **Vegeplast** (Haute Garonne). La fabrication repose sur un procédé thermomécanique. Les applications du produit sont très diversifiées (couverts jetables, tees de golf, crochets de vigne, liens de pépinières, article à mordiller pour chiens, liens de parachutes pour l'armée et, plus récemment, des dosettes de café).

Les sons de blé, riches en fibres et en protéines, sont traditionnellement destinés à l'alimentation humaine ou animale. Dans des procédés de seconde génération, la fraction fibreuse des sons pourra être fragmentée en sucres en C6 et C5 ou directement fermentée. Les travaux de **Tereos** et **Deinove** dans le projet Deinol consistent notamment à pouvoir intégrer les sons dans les procédés de production d'éthanol de blé.

Les protéines de blé peuvent avoir des applications diverses. Elles sont utilisées depuis des années en cosmétique par la société **Silab** (Brive, 19) pour leurs propriétés de tenseurs en soin de la peau. Le gluten de blé est filmogène, thermoplastique et biodégradable. **Syral** (groupe **Tereos**) travaille sur des plastiques incorporant des protéines de blé.

II.1.5.2 –L'AMIDON



L'amidon est un polymère de D-glucose, présent chez les végétaux sous deux formes :

- **L'amylose**, linéaire ou peu ramifiée, formée d'enchaînements de quelques centaines de glucoses liés entre eux en α (1-4).
- **L'amylopectine**, molécule plus importante de plusieurs milliers d'unités de glucose, ramifiée en α (1-6) toutes les 24 à 30 unités. Le phytoglycogène est un analogue de l'amylopectine, ramifié tous les 10 à 15 glucoses.

Les grains d'amidon sont d'une taille propre à chaque espèce végétale : petits chez le riz (2 μ m) et beaucoup plus gros chez la pomme de terre (jusqu'à 100 μ m). Le grain d'amidon se présente sous forme de granules semi cristallins : l'amylopectine est organisée en feuillets et forme la partie cristalline, tandis que l'amylose constitue une zone amorphe entre les différents feuillets.

La plupart des amidons végétaux sont composés à 20-30 % d'amylose et de 70-80 % d'amylopectine. Il existe cependant pour plusieurs espèces des variétés de composition particulière, d'origine naturelle ou obtenues par génie génétique.

Dans les applications industrielles de l'amidon, l'amylose ou l'amylopectine peuvent être préférées. Comme leur séparation est difficile, les variétés spécialisées sont appréciées.

Composition typique d'amidons de différentes espèces végétales

Espèce	Taille des granules	% amylose	% amylopectine
Blé	3-35	26-28	72-74
Blé "full waxy"	?	0	100
Manioc	3-30	17	83
Maïs	5-25	25-28	72-75
Maïs "waxy"	?	0	100
Maïs riche en amylose	4-20	70	30
Pois	?	17	83
Pomme de terre	10-100	20-22	78-80
Pomme de terre OGM Prevalent	?	0-2	98
Riz	2-15	17	83
Riz "waxy"	2-15	0	100

Les amidons donnent naissance à 3 grandes classes de produits : les amidons natifs, les amidons modifiés et les produits dérivés. A l'échelle globale, le segment des amidons modifiés connaît une croissance rapide.

Ventilation de la production française d'amidon par famille de produits en 2008

	Amidons natifs	Amidons modifiés	Sucres et autres	Totaux
Kt équiv. natifs	635	580	1540	2755
%	23 %	21 %	56 %	100 %

Source : USIPA

Premier producteur, les USA restaient aussi le premier consommateur d'amidon en 2009, cumulant 51 % de la demande. La consommation (comme la production) des pays asiatiques (Chine, Inde) est en croissance très rapide.

Les applications non alimentaires de l'amidon sont importantes. On les retrouve dans :

- L'industrie des papiers et cartons (56 % des usages non alimentaires en France).
- La pharmacie.
- Les textiles.
- Des plastiques biodégradables.

Les propriétés générales des amidons sont celles de liants / agglomérants, d'épaississants / texturants, de floculants / agents de rétention, d'humectants, de plastifiants, de dispersants et d'agents filmogènes.

Les amidons modifiés sont des amidons qui ont été soumis à des transformations variées, par traitement thermique (qui brise les chaînes d'amidon en éléments plus courts comme les dextrines) ou chimique (éthérification, estérification).

Le secteur des papiers et cartons ondulés est la plus grosse industrie consommatrice d'amidon.

Dans la fabrication du papier, l'amidon est utilisé le plus souvent sous forme modifiée (éthers cationiques) pour ses propriétés liantes, adhésives, plastifiantes, floculantes et filmogènes. Il a trois applications :

- Il peut être incorporé dans la masse du papier entre 2 et 4 %. Il renforce sa résistance car il assure sa cohésion interne en formant des liaisons cellulose-amidon-cellulose. L'incorporation croissante de papiers recyclés, dont les fibres sont dégradées, rend nécessaire l'utilisation de quantités croissantes d'amidon.
- Il est utilisé à la presse encolleuse pour éviter le peluchage des feuilles.
- Il est employé dans les produits de couchage, en "revêtement" du papier.

Des plastiques biodégradables sont produits directement à base d'amidon. Celui-ci peut être plastifié en présence d'une faible quantité d'eau, à l'aide d'un plastifiant qui peut être le glycérol. Le produit obtenu est peu coûteux à produire et parfaitement biodégradable mais il est long à se stabiliser lors du process, sa résistance mécanique est limitée et il est sensible à l'eau. La réalisation de mélanges d'amidon et de polyesters biodégradables permet d'améliorer les propriétés de l'ensemble. Des produits multicouches sont également fabriqués dans lesquelles un polyester plus hydrophobe protège un cœur d'amidon.

Parmi les entreprises productrices de plastiques à base d'amidon, on peut citer :

- **Biotec (RFA), devenue filiale du groupe français d'emballage SPhere**, produit du Bioplast[®], plastique biodégradable à base d'amidon.
- **Limagrain Cereal Ingredient** fabrique des films plastiques à base d'amidon de blé et d'un polyester dégradé, commercialisés sous la marque Biolice[®].
- **Novamont**, entreprise italienne, est un des pionniers du secteur. Elle fabrique des thermoplastiques biodégradables (Mater-Bi[®]) à partir d'amidon de maïs.
- **Solanyl[®] / Rodenburg** (Pays Bas et Canada), produit à base d'amidon de pomme de terre..
- **Plantic** (Australie), avec une gamme nommée Eco plast[®].

Les autres applications des amidons se retrouvent dans la pharmacie (enrobage des comprimés, agents dispersants, dentifrices), la cosmétique (dans les produits de maquillage et les crèmes de beauté), le textile (apprêts de tissus, stabilisant des colorants), les colles (adhésifs thermo fusibles, timbres, reliures, enveloppes, étiquettes), la métallurgie, la construction (liants pour blocs de béton), l'exploitation minière (agent de flottation et de sédimentation des minerais, agglomérant de poussières)...

Les cyclodextrines sont des polyglucoses cycliques de 6, 7 ou 8 motifs de glucose, obtenus par hydrolyse enzymatique de l'amidon. Les cyclodextrines ont des capacités à former des complexes d'inclusion avec un très grand nombre d'entités chimiques, "capturant" ou "protégeant" leurs molécules. Elles sont donc utilisées pour protéger des arômes, des matières actives pharmaceutiques etc.... ou pour piéger des composés volatils à odeur désagréable. Les cyclodextrines ont retenu l'attention pendant de nombreuses années mais leurs marchés restent modestes. **Cargill, Roquette** et **Wacker** sont à citer parmi les producteurs.

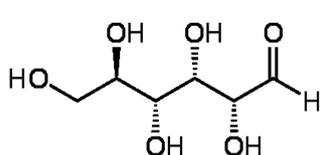
II.1.5.3 – MOLECULES DERIVEES DU GLUCOSE

La fragmentation de l'amidon en glucose est réalisée par hydrolyse enzymatique et sera détaillée dans le chapitre consacré aux biotechnologies blanches (IV.4).

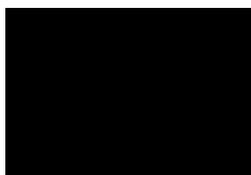
Le glucose est un sucre en C6, porteur sous forme linéaire de 5 fonctions alcools et d'un groupement aldéhyde, par lequel il se cyclise.

Le glucose est un des premiers produits issu du métabolisme photosynthétique.

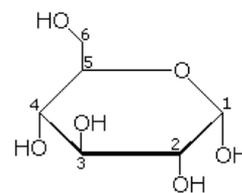
Trois représentations du glucose, sous forme linéaire ou cyclique



Représentation linéaire



Représentation en "bateau"



β D glucopyranose

II.1.5.3.1 - LES DERIVES DU GLUCOSE OBTENUS PAR CONVERSION CHIMIQUE

LE SORBITOL

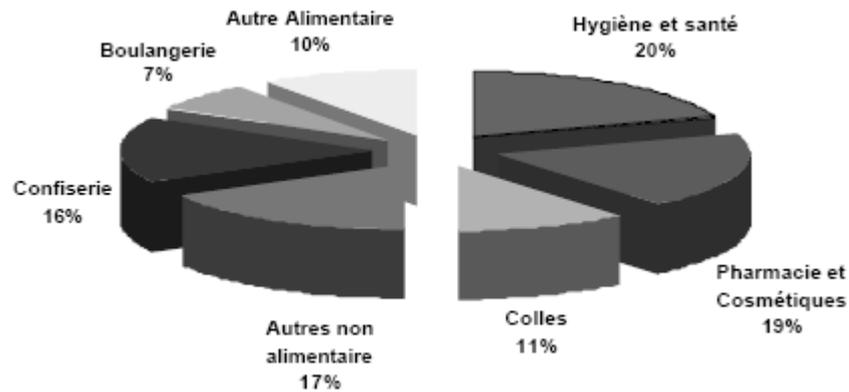
Le sorbitol est un polyol à 6 groupes alcools. Il dérive du glucose par hydrogénation catalytique, avec d'excellents rendements. Il est fabriqué par la plupart des grands amidonniers. Sa production annuelle à partir de glucose atteindrait 500 000 tonnes.

Cette molécule a d'importantes applications comme polyol sur lesquelles elle peut se retrouver en concurrence tant avec les polyols d'origine pétrochimique que le glycérol, issu des filières oléagineuses et biodiesel. Le sorbitol est cependant solide à température ambiante alors que le glycérol est liquide ce qui distingue plusieurs de leurs applications.

Le sorbitol a des usages directs comme excipient pharmaceutique, en cosmétique (pâtes dentifrices) et dans les industries agroalimentaires.

Le sorbitol est également utilisé pour la production de polyéthers polyols, eux-mêmes composants de la fabrication de polyuréthanes, et pour la production de tensioactifs non ioniques (esters de sorbitane) et de vitamine C.

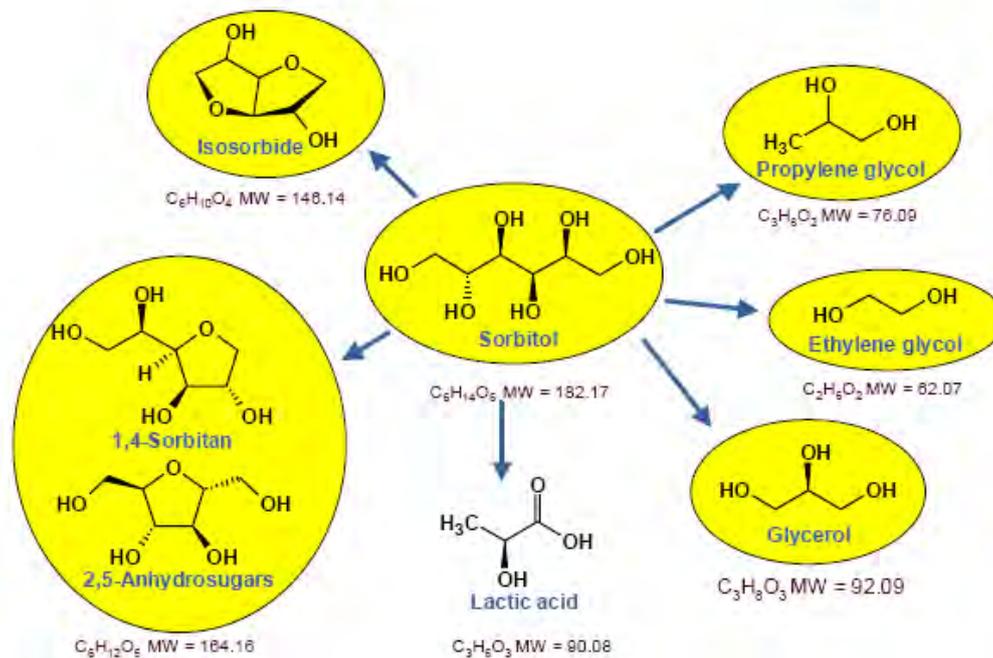
Le marché européen du sorbitol liquide



Source : Syral

Le sorbitol est considéré, de façon constante comme une importante molécule plateforme, depuis l'étude du US DOE-NREL de 2004, jusqu'à sa mise à jour récente de fin 2009.

Les dérivés potentiels du sorbitol, selon l'étude US DOE de 2004



Parmi les dérivés présentés ci-dessus, certains peuvent être obtenus directement par fermentation de glucose ou de sucre (acide lactique, propylène glycol). Le glycérol, quant à lui, est devenue une matière première largement disponible et il n'est pas pertinent – du moins dans les équilibres actuels - de le produire à partir de sorbitol. Notons que le glycérol peut être lui-même transformé en propylène glycol.

La déshydratation du sorbitol en **1,4 sorbitan**, suivie de l'estérification de ce dernier avec des acides gras permet la production d'**esters de sorbitan** dont les applications comme tensioactifs non ioniques sont nombreuses dans les secteurs de la cosmétique et de la pharmacie (le marché représenterait 50 000 tonnes).

La production d'**acide ascorbique** ou vitamine C à partir de sorbitol se développe. Elle implique en réalité une combinaison de procédés chimiques et biotechnologiques et un intermédiaire de synthèse qui est l'acide 2-cétoglonique. La production mondiale d'acide ascorbique est d'environ 80 000 tonnes.

Le sorbitol peut être polymérisé en **polyéthers polyols** qui peuvent être utilisés dans la synthèse de polyuréthanes.

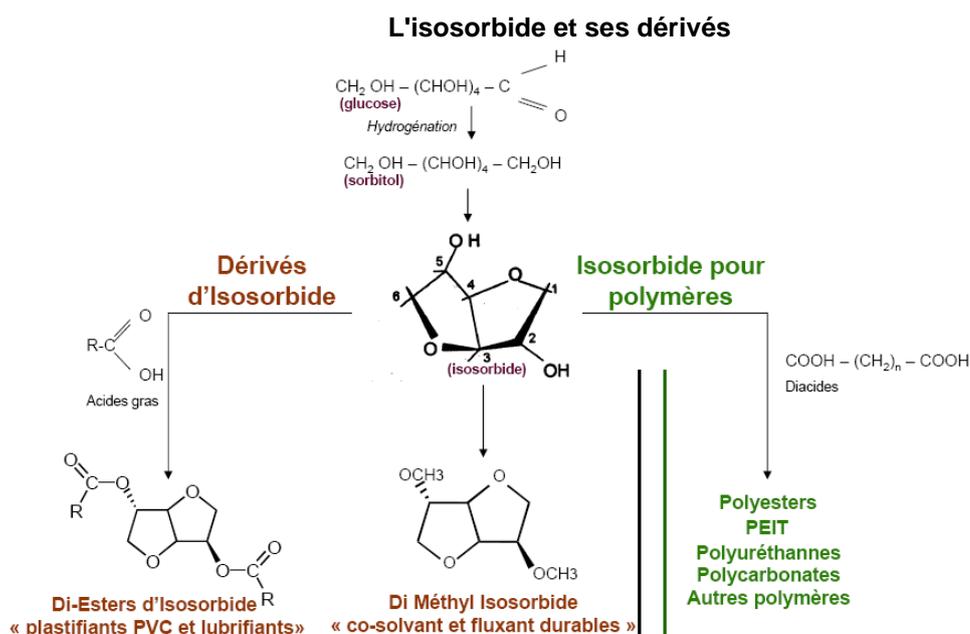
L'SOSORBIDE ET SES DERIVES

Ils font l'objet de travaux de développement particuliers dans le cadre du programme Biohub[®], conduit par l'entreprise **Roquette Frères** et ses partenaires.

L'**isosorbide** est obtenu par déshydratation du sorbitol. C'est une molécule cyclique, ce qui lui confère des propriétés particulières que l'on retrouve peu fréquemment dans les grands produits issus de la biomasse, hormis la lignine. Son dérivé, le **nitrate d'isosorbide** est valorisé en pharmacie pour ses propriétés vasodilatatrices. En outre, l'isosorbide est un intermédiaire de synthèse pour le **Di-Méthyl-isosorbide** qui est un bio-fluxant et un co-solvant "vert".

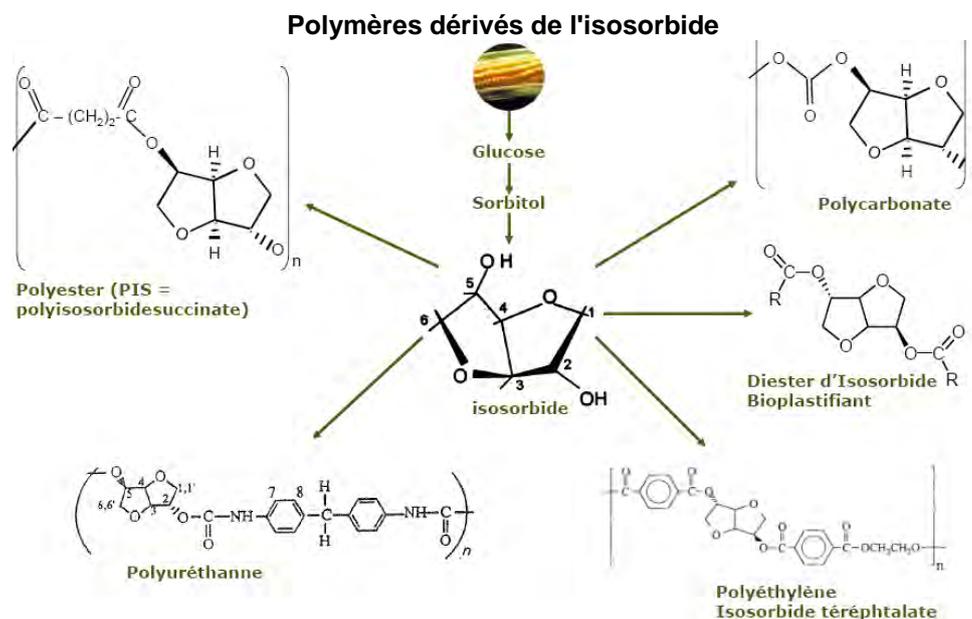
Les **diesters d'isosorbide** et d'acides gras végétaux ont des propriétés de lubrifiants et de plastifiants non toxiques mais analogues à ceux des phtalates, utilisés dans la production de PVC.

L'isosorbide a des applications potentielles importantes dans la production de polymères. L'isosorbide pourrait par exemple être utilisé comme **copolymère du polyester PET**, (polyéthylène terephtalate) afin d'augmenter la résistance à la température de celui-ci. Il viendrait en complément ou en substitution de l'éthylène glycol. Un isosorbide de grande pureté est nécessaire pour de telles applications



Source : Roquette

Plusieurs autres polymères peuvent être obtenus à partir d'isosorbide :



Parmi les autres dérivés par voie chimique du glucose, on peut citer :

- **L'acide 2,5-furane dicarboxylique (FDCA) et l'hydroxyméthylfurfural (HMF) qui font partie du groupe des furanes.** Ces deux molécules en C6 peuvent être obtenues par déshydratation oxydative des hexoses (glucose pour le FCDA, fructose pour le HMF qui peut lui-même être converti en FCDA). Les dérivés du FCDA pourraient potentiellement concurrencer l'acide téréphtalique, utilisé dans des polyesters comme le polyéthylène téréphtalate (PET) et le polybutylène téréphtalate (PBT). Par réaction avec des diamines, le FCDA pourrait être à l'origine de nouveaux nylons. Le FDCA a fait partie de la liste des "top 10" de l'étude du DOE de 2004 et a été "reconfirmé" dans la mise à jour de en 2009. La société **Avantium**, aux Pays Bas, disposerait d'une technologie de catalyse à haut rendement pour obtenir des furanes à partir de sucres. Avantium collabore avec **NatureWorks/Cargill** sur le développement de polyesters de furanes. Avantium explore également le potentiel du dérivé qu'est l'éthoxyméthylfurfural (EMF) comme additif de carburant diesel.



Hydroxyméthylfurfural (HMF)



2,5 FDCA

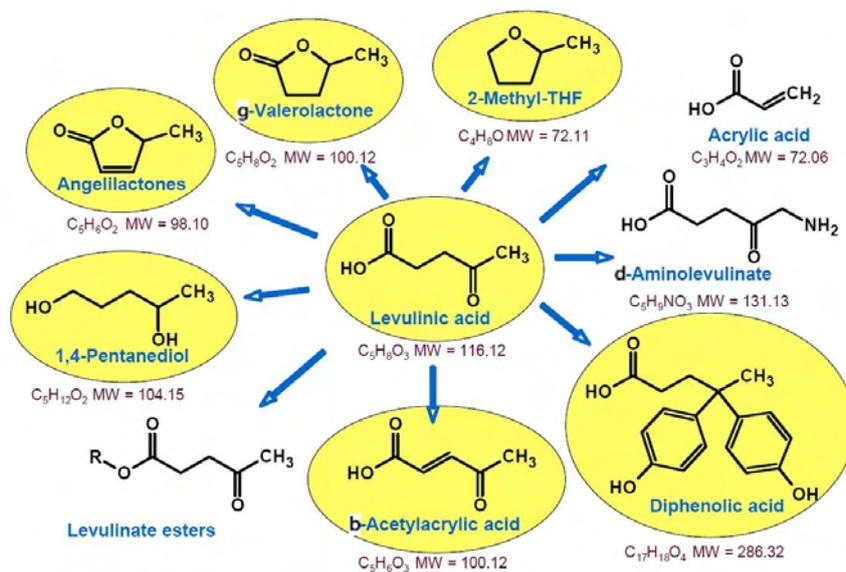
Le FCDA et l'HMF, tous deux en C6, ne doivent pas être confondus avec le furfural en C5, également de la famille des furanes mais qui est obtenu par conversion chimique à partir du xylose. Le furfural sera abordé dans le chapitre sur les filières lignocellulosiques.

- **L'acide levulinique.** Molécule en C5, obtenue aujourd'hui par déshydratation acide catalysée du glucose, c'est une autre plateforme "confirmée" parmi les hydrates de carbone. Ses dérivés potentiels représentent des volumes considérables :
 - le **2-méthyl-tétrahydrofurane (MTHF)**, additif donneur d'oxygène pour les carburants pouvant se substituer au MTBE (Méthyl tert-butyl éther).

- le **delta-aminolevulinat (DALA)**, herbicide biodégradable, DALA et MTHF pourraient permettre de développer le marché de l'acide levulinique à des valeurs situées entre 100 et 250 Kt/an.
- le **tétrahydrofurane (THF)** qui a de nombreuses applications de solvant et le **1,4 butanediol (BDO)** qui a des usages également comme solvant mais aussi dans les plastiques et polyuréthanes. Ces deux dernières molécules peuvent être également obtenues à partir de l'acide succinique – décrit ci-après – dont les productions commerciales par fermentation sont en phase de démarrage.



Les dérivés potentiels de l'acide levulinique selon l'étude US DOE de 2004



L'acide levulinique est un autre "top 10" dont on ne voit pas encore apparaître de productions industrielles innovantes et à compétitivité améliorée. Il pourrait faire partie des molécules produites à partir de matières premières lignocellulosiques (cellulose mais aussi hémicelluloses) dans les bioraffineries de seconde génération. A la fin des années 1990, l'entreprise nord-américaine **Biofine** faisait la promotion d'une technologie de production à partir de cellulose, qu'elle aurait développée en utilisant une licence du Pacific Northwest National Laboratory. Il convient désormais de suivre avec attention ce que développe l'entreprise nord-américaine **Segetis** qui fabrique des dérivés de l'acide levulinique (d'origine chinoise ?) et envisage la production de ce dernier à partir de biomasse lignocellulosique.

- **L'acide glucarique (ou saccharique)**, en C6, est fabriqué par oxydation de glucose ou d'amidon à l'acide nitrique. Ses dérivés sont des polymères (polyhydroxypolyamides) pouvant concurrencer les nylons sur leurs marchés de masse.

Acide glucarique



*L'acide glucarique avait fait partie aussi des "top 10" de l'US DOE en 2004 mais n'a pas été retenu dans les études ultérieures. La start up nord-américaine **Rivertop Renewables** déclare disposer d'un procédé à haut rendement de production d'acide glucarique à partir de glucose.*

- **Les alkylpolyglucosides (APG)** constituent un point de rencontre entre les filières amidon et oléagineuses. Préparés à partir d'alcools gras (le plus souvent à chaînes courtes, donc non métropolitaines) et de courtes chaînes de glucose, ils ont des propriétés tensioactives valorisées dans les détergents ménagers, les shampoings, les démaquillants. **Cognis** (racheté par BASF) serait le leader mondial de ces produits dont le marché mondial atteindrait 200 Kt. **Seppic** (filiale d'Air Liquide) et **Uniqema-Croda** sont également des producteurs d'APG.

Alkylpolyglucosides – Formule générale



II.1.5.3.2 - LES DERIVES DU GLUCOSE OBTENUS PAR FERMENTATION

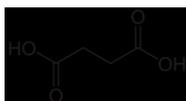
La liste des dérivés du glucose obtenus par fermentation est longue. Nous n'examinerons pas ici des molécules comme l'éthanol, l'acide lactique, le 1,3 propanediol, le butanol ni l'isobutanol qui font l'objet de chapitres à part (cf. III), dans la mesure où elles peuvent être issues de plusieurs filières.

L'ACIDE SUCCINIQUE ET LE 1,4 BUTANEDIOL

L'acide succinique est une molécule naturellement produite par le métabolisme de base des êtres vivants, dans ce que l'on appelle le cycle de Krebs, qui succède à la glycolyse dans les voies de dégradation du glucose pour générer l'énergie nécessaire au métabolisme cellulaire.

L'acide succinique avait été identifié comme molécule plateforme potentielle "top 10" dans l'étude du US DOE de 2004 et a été confirmée dans cette position dans les études plus récentes.

La molécule d'acide succinique comprend 4 carbones et peut être comparée à celle de l'anhydride maléique issue de la pétrochimie. C'est par hydrogénation catalytique de cette molécule ou de l'acide maléique (issus tous deux du butane ou encore parfois du benzène) que la synthèse de l'acide succinique "pétrochimique" a lieu. Ses deux fonctions carboxyliques en position symétrique lui confèrent des propriétés spécifiques. Le marché actuel est encore restreint (30 à 50 000 tonnes), à des prix d'environ 2 à 2.5 € du kg.



Acide succinique



Anhydride maléique



Acide maléique*

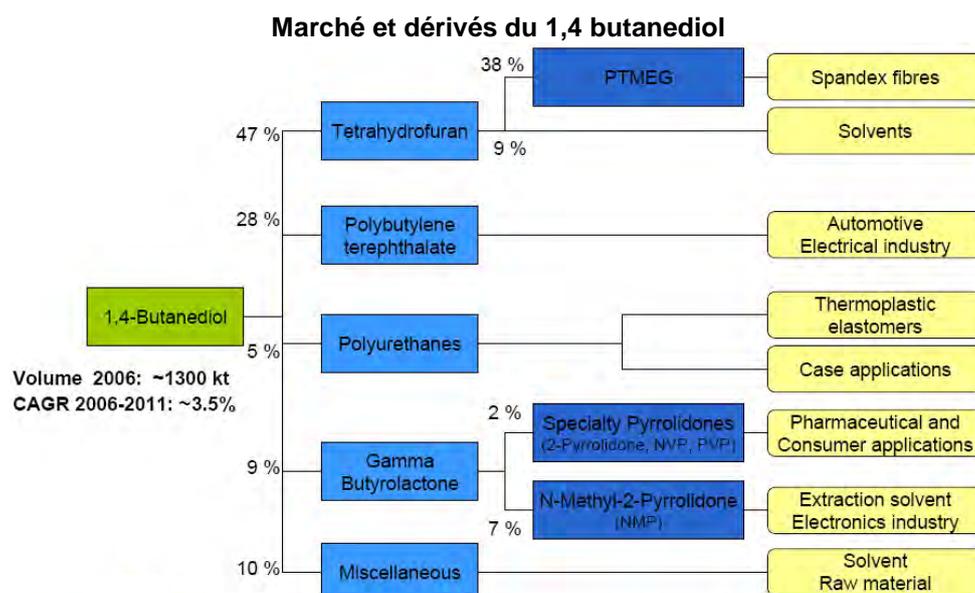
* : à ne pas confondre avec l'acide malique.

Le défi d'une production par fermentation est non seulement d'obtenir un produit biosourcé mais également d'atteindre une efficacité de procédé permettant d'abaisser significativement le coût de revient du produit (en dessous de 2 €/kg) pour lui ouvrir un champ d'applications beaucoup

plus large. Ce sont des souches spécifiques d'*Escherichia coli* qui sont mises en œuvre dans les procédés actuels.

Les dérivés potentiels de l'acide succinique sont nombreux, dans le domaine des solvants ou surtout des polymères thermoplastiques. Ils entrent directement en compétition avec les dérivés de l'acide ou de l'anhydride maléique d'origine pétrochimique (notons que le prix de ce dernier a évolué entre 0.75 et 1.45 \$/kg ces deux dernières années). Lors de sa production, l'acide succinique (comme l'acide lactique) est préalablement isolé sous forme de sel, de calcium ou de potassium. Ce dernier a des applications dégivrantes intéressantes dans les aéroports.

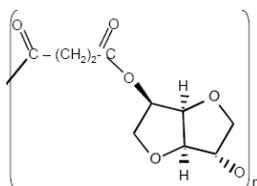
- L'acide succinique peut être utilisé comme monomère du polyester **PBS (polybutylène succinate)**, un polymère biodégradable au marché encore étroit (moins de 10 000 t) mais dont les applications pourraient être largement développées. Les producteurs actuels de PBS sont notamment **Showa, Mistubishi, Ire chemical**. L'autre monomère du PBS est le **1,4 butanediol (BDO)**, aujourd'hui produit à partir du butane et qui pourrait être à terme issu lui-même d'acide succinique biosourcé (sous réserve de coûts de procédés encore plus bas). Le marché du BDO est important (1.3 millions de tonnes). Son prix a évolué ces dernières années entre 1.5 et 1.9 € / kg. **BASF** est un gros producteur de BDO. Créée par des chercheurs de l'Université de San Diego, l'entreprise californienne **Genomatica**, partenaire de plusieurs sociétés dont **DSM et Braskem**, a lancé mi 2010 la production pilote de BDO par fermentation de sucres (glucose) et travaillerait sur l'obtention de BDO à partir de sucre de canne).



Source : Roquette

- Le **polyisosorbide succinate (PIS)** est un autre polymère de concept plus récent, mettant en œuvre deux molécules de la filière amidon : l'isosorbide et l'acide succinique. **Roquette** et son partenaire DSM sont engagés dans son développement.

Polyisosorbide succinate



- L'acide succinique peut être également converti en :
 - **Tétrahydrofurane (THF)**, qui a des applications directes comme solvant,
 - **Gamma butyrolactone (GBL)**, également utilisé pour ses propriétés de solvant.

THF, BDO et GBL sont des précurseurs des monomères de polyesters que sont le Polybutylène téréphtalate (PBT) et le glycol d'éther de polytétraméthylène (PTEMG), actuellement obtenus à partir d'anhydride maléique.



- Le **2 Pyrrolidone**, utilisé comme solvant, plastifiant et agent coalescent pour les enduits d'émulsion de polymère et comme précurseur du **PVP (Pyrrolidone de Polyvinyle)** qui a de nombreuses applications dans la pharmacie, la parfumerie, le papier, l'agroalimentaire et les détergents, comme liant ou humectant. Sa production mondiale reste toutefois encore limitée.
- Les acides **fumarique et maléique** peuvent être obtenus selon des procédés très proches et sont facilement convertibles de l'un à l'autre. Ils offrent les mêmes dérivés potentiels. **L'acide aspartique**, acide aminé à la base de l'aspartame, est aujourd'hui produit à partir de l'acide fumarique, par voie enzymatique. Les applications potentielles de ses dérivés sont nombreuses dans le domaine des solvants et des polymères.

2 Pyrrolidone	PVP	Acide fumarique	Acide maléique

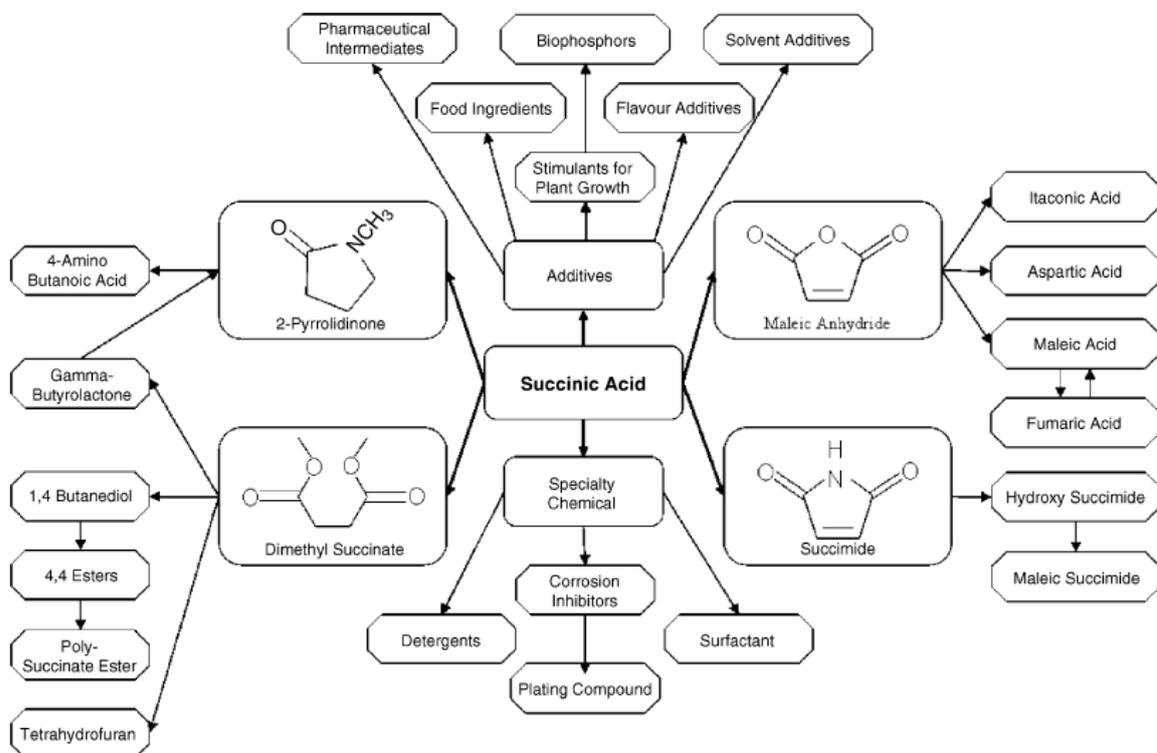
L'acide succinique fait l'objet de plusieurs projets de production par fermentation dans le monde dont deux en France (**Bio Amber**, filiale de l'américain **DNP Green Technology** et du français **ARD ; Roquette**, en partenariat avec le chimiste **DSM**) et un en Espagne (le néerlandais **Purac**, avec l'appui technologique de **BASF**). Aux Etats-Unis, **Myriant technologies** (issu de BioEnergy International LLC) développe son propre projet, à partir de sorgho. Comme l'acide lactique (cf. III.2), l'acide succinique doit être neutralisé sous forme de sel lors de la production pour ne pas inhiber les bactéries qui le synthétisent. Il faut par la suite traiter ce sel avec un acide.

Bioamber, créé en mars 2008, dispose dès maintenant d'une première unité d'une capacité de 2000 t annuelles, sur le site de la bioraffinerie de Pomacle-Bazancourt du groupe Champagne-Céréales qui peut l'approvisionner en matières premières. La technologie de production met en œuvre une souche spécifique d'*Escherichia coli* et des éléments de procédé apportés par DNP Green Technology. Cette entreprise nord-américaine, à capitaux principalement japonais, valorise un savoir-faire développé et breveté par l'US DOE (Ministère de l'Energie des Etats-Unis). Bioamber sera le fournisseur exclusif d'acide succinique de la société **Sinoven Biopolymers** qui produit déjà du PBS en partie biosourcé sur des sites chinois.

Pour la production d'acide succinique, **Roquette** utilise une technologie également développée aux Etats-Unis, (Université de Rice) et s'est associé avec le chimiste **DSM**, ce qui lui assure une connexion étroite avec les besoins du marché. La fabrication de polymères innovants, comme le polyisobutyl succinate, pourrait permettre à Roquette de valoriser dans un même produit plusieurs molécules issues de ses activités de bioraffinerie.

Mitsubishi Chemical Corporation (MCC-Japan) avait annoncé à l'automne 2009 le projet d'étudier avec l'entreprise publique thaïlandaise PTT Public Company Limited (PTT-Thaïlande) la possibilité de produire de l'acide succinique et du PBS. Une joint-venture devrait être créée courant 2010.

Diversité des molécules pouvant dériver de l'acide succinique



Source : Hong & Lee.

L'ACIDE GLYCOLIQUE

L'acide glycolique (ou acide hydroxyacétique) a des propriétés exfoliantes en cosmétique.

L'acide glycolique peut être utilisé pour fabriquer du **PGA (poly acide glycolique ou polyglycolide)**, un polyester thermoplastique biodégradable. Il a dès maintenant des applications en chirurgie et présente des propriétés de barrière contre l'O₂ et le CO₂. Des usages potentiels plus larges sont envisageables avec un produit compétitif, dans la production de bouteilles plastiques de sodas et de jus de fruits.



Acide glycolique



Poly acide glycolique

L'acide glycolique est classiquement produit par réaction d'acide chloroacétique avec de la soude.

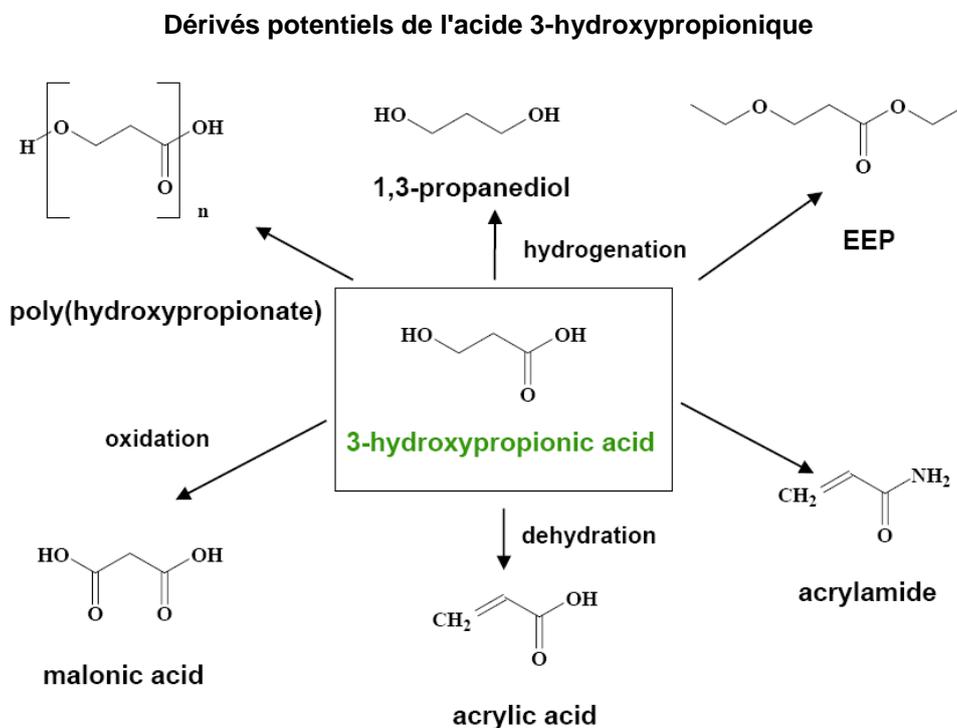
Le PGA peut être obtenu par la polymérisation du glycolide, le diester cyclique de l'acide glycolique (la polymérisation directe d'acide glycolique ne produit que des oligomères). Le PGA peut être également fabriqué par polycondensation d'halogénoacétates ou à partir de formaldéhyde et de monoxyde de carbone, par catalyse en milieu acide.

Dans le cadre du programme BioHub[®], **Roquette** développe un procédé compétitif de production d'acide glycolique biosourcé, en valorisant en exclusivité une souche microbienne mise au point par **Metabolic Explorer**.

L'ACIDE 3-HYDROXYPROPIONIQUE (3-HPA).

Le 3 HPA est encore une molécule (en C3) confirmée dans son statut de "top 10" et qui tarde à émerger sur le plan industriel. Il n'y a pas de production de 3-HPA à partir de ressources fossiles. **Cargill** travaille depuis plusieurs années (2002 ?) sur la production par fermentation de cette molécule à partir du glucose (*illustrations au § IV-4.1.2*) et a engagé un partenariat sur ce thème avec **Novozymes**. Une baisse importante des coûts est encore nécessaire pour assurer la compétitivité de dérivés acryliques (actuellement d'origine pétrochimique). Le 3-HPA pourrait également être produit à partir de glycérol.

*On peut noter que des procédés de production directe d'acide acrylique par fermentation sont en développement (OPX technologies, aux USA). La production commerciale directe de 1,3 propanediol à partir de glucose est, pour sa part, déjà effectuée par **Du Pont –Tate & Lyle** sur une technologie de **Genencor**. **Metabolic Explorer** a développé pour sa part un bioprocédé de production de 1,3 PDO à partir de glycérol (cf. III.3).*



L'ACIDE ITACONIQUE

Cet acide en C5 a été élu dans les tops 10 de 2004 avant de disparaître des listes des molécules plateformes potentielles importantes. L'acide itaconique peut être obtenu à partir de glucose mais aussi d'acide succinique ou de xylose. Il est utilisé comme additif dans les mélanges de fibres polymères pour leur donner de la résistance aux substances abrasives. Les marchés restent aujourd'hui limités et l'offre serait excessive par rapport aux besoins.

Acide itaconique



L'acide polyitaconique est un super absorbant et un agent dispersant, avec des applications dans les détergents, le traitement des eaux, etc.

Les dérivés potentiels de l'acide itaconique devraient pouvoir se positionner comme concurrents de ceux de l'acide et de l'anhydride maléique.

L'entreprise nord-américaine **Itaconix** produit de l'acide itaconique et de l'acide polyitaconique. Elle considère que des marchés importants déplaçant ceux de l'acide polyacrylique pourront être développés si des prix de marché suffisamment bas sont atteints (1.5 \$/kg pour l'acide itaconique à et 3 \$/kg pour l'acide polyitaconique).

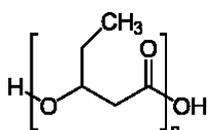
LES PHA (POLYHYDROXYALCANOATES) : LES PHB (POLYHYDROXYBUTYRATE)

Les polyhydroxyalcanoates sont un groupe de polyesters linéaires biodégradables, naturellement produits et stockés à l'intérieur des cellules de certaines bactéries à partir de sucres ou de lipides. On dénombre plus de 150 monomères pouvant être à l'origine de matériaux très divers, thermoplastiques ou élastomères, de points de fusion très variés, entre 40 et 180°C. Certains produits présentent de bonnes propriétés de résistance à l'eau et de stabilité thermique, avec une mise en œuvre aisée.

Deux PHA ont fait l'objet de travaux particuliers : l'homopolymère PHB (polyhydroxybutyrate) et le copolymère PHBV (poly-3-hydroxybutyrate-co-hydroxyvalérate) qui ont des propriétés comparables à celles du polypropylène pour de nombreuses applications.



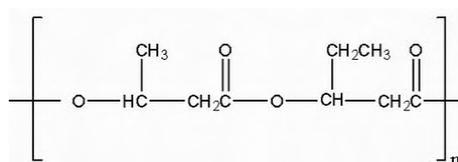
Poly 3
hydroxybutyrate



PHV



Poly 4
hydroxybutyrate



PHBV

Plusieurs entreprises produisent du PHB/PHBV : le brésilien **Biocycle Copersucar** (à partir de sucre de canne ?), l'allemand **Biomer**, l'italien **Bio-On** (marque Minerv-Pha™), le chinois **Ecomann**, le chinois **Tianan Biologics** (marque Enmat), l'américain **Telles** (Joint venture **Metabolix/ADM** (marque Mirel™) à partir de glucose de maïs, **Procter & Gamble** s'était engagé dans la production d'une large gamme de copolymères de PHB mais a cédé l'activité il y a déjà plusieurs années.

Monsanto avait travaillé sur la production de PHB bactérien par des plantes génétiquement modifiées avant de céder la technologie (et la marque Biopol[®]) à **Metabolix** en 2001. En 2008, Metabolix a pu faire produire du PHA à du switchgrass, une graminée cultivée pour produire de la biomasse cellulosique. Metabolix dispose déjà de tabacs dont la biomasse contient 3 à 5 % de PHA et travaille également sur la canne à sucre et les oléagineux. Son objectif est d'extraire le PHA de ces plantes et que les résidus soient utilisés pour la production d'énergie ou de biocarburants.

II.1.6 - FORCES, FAIBLESSES, PERSPECTIVES DES FILIERES FRANÇAISES

Le tableau suivant résume les principaux éléments de conclusion sur les filières amidon françaises.

On retiendra que :

- **La matière première est disponible en France, en abondance.** Si la vocation principale de nos cultures céréalières est l'alimentation humaine et animale, nos filières se heurtent à des fortes concurrences sur les marchés mondiaux correspondants et ont un besoin stratégique d'autres débouchés industriels consolidés. De plus, les coproduits de l'amidon et de l'éthanol, riches en fibres et en protéines, ont des valorisations importantes dans l'alimentation du bétail et contribuent à réduire notre dépendance protéique vis-à-vis du continent américain.
- **La filière française céréalière et amidonnière rassemble des grands acteurs comme Champagne Céréales, Roquette et Tereos qui développent chacun des stratégies fortes et originales dans la chimie du végétal. Soufflet met au point une technologie particulière de fermentation.** Tous ces groupes disposent d'activités internationales et sont en mesure d'analyser et de participer à ce qui est en cours sur d'autres continents. Leurs partenariats industriels avec des entreprises de biotechnologies françaises (**Deinove, Metabolic Explorer**) ou nord américaines (**Amyris, DNP Green Technology**) leur permettent d'accéder à des procédés innovants. Leurs collaborations en aval avec des industriels de la chimie (**DSM, etc.**) garantissent la solidité de leur connexion au marché.
- **Les frontières entre les filières amidon et sucre s'estompent.** Les productions de molécules par fermentation peuvent bien souvent utiliser indifféremment du saccharose ou du glucose (non purifiés) comme substrat. A moyen terme, le développement de bioraffineries de seconde génération, capables de fragmenter la lignocellulose, élargira encore la liste des matières premières utilisables. Celles-ci pourront alors provenir également de la forêt mais aussi de cultures celluloseuses ou de certains déchets.
- **Des programmes fédérateurs de développement industriel, coordonnés par des entreprises, ont été engagés et semblent tout à fait fructueux, tant en termes de résultats que de modèles : BioHub®, porté par Roquette, Osyris, autour de Soufflet.** Le développement de plateformes de R&D et d'enseignement que développe **ARD** avec ses partenaires sur le site industriel de Pomacle Bazancourt est également à souligner.
- **Les liens entre ces leaders de ce secteur céréalière et amidonnier et nos grands chimistes français sont encore trop lâches** et ne génèrent pas de programmes de développement communs importants. Il reste pourtant nécessaire de créer des filières solides produisant de la valeur ajoutée pour compenser les coûts amont de matières premières structurellement plus élevés en Europe que dans différents pays tropicaux.
- **Le refus français des OGM végétaux** ne constitue pas encore un handicap grave en termes de compétitivité mais le deviendra rapidement. Les rendements en blé et en maïs conservent un bon niveau dans l'Hexagone mais ne progressent plus suffisamment. La France est absente des développements actifs des biotechnologies végétales qui assureront d'ici quelques années les futurs gains de productivité de ces espèces sur les continents américains et asiatiques. A moyen terme, ce refus des OGM risque de peser lourd sur le niveau des performances de l'agriculture française, en comparaison de celles de ses concurrents.

Analyse des forces – faiblesses / opportunités – menaces de la filière française

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> - Le blé et le maïs sont les deux plus importantes cultures françaises. Les filières sont parfaitement structurées. - Des surfaces agricoles importantes peuvent être mobilisées pour des productions non alimentaires destinées à l'industrie. - La filière amidonnière française comprend des leaders mondiaux reconnus, engagés dans des projets de chimie du végétal. - Des projet de développement industriels disposant de soutiens publics substantiels démontrent leur pertinence et produisent de premiers résultats. - Quelques entreprises de biotechnologies blanches actives et innovantes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Partenariats encore limités entre l'industrie chimique française et les filières céréalières. - La production de masse de polymères matériaux issu des filières céréalières n'est encore qu'une perspective en France alors qu'elle est déjà avancée aux USA. - Le nombre des innovations nationales disponibles en biotechnologies blanches reste encore limité. L'importation de savoir faire nord-américain reste nécessaire dans plusieurs cas. - Pas de développement actif des biotechnologies végétales, porteuse des gains de productivité agricole de demain.

Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> - Prix élevés et volatils du pétrole permettant d'améliorer l'attractivité des produits de la biomasse. - Richesse de la chimie du glucose et de ses dérivés. - Potentiel des outils de bioconversion (fermentation, enzymatique). Acceptation des biotechnologies blanches par le citoyen européen. - Politique mise en œuvre de soutien aux biocarburants de première génération (elle a permis l'émergence de filières industrielles de nouvelles valorisations des céréales). - Le développement de débouchés non alimentaires européens est nécessaire (l'alimentation animale, très gros consommateur de blé et de maïs est en crise structurelle en France ; les exportations de céréales françaises sont soumises à une concurrence importante). 	<ul style="list-style-type: none"> - Coûts structurels des matières premiers agricoles restant plus élevés en Europe que dans de nombreux pays du Sud. - Faible croissance des marchés locaux de l'industrie chimique européenne en comparaison de ceux de l'Asie ou d'autres régions en développement. - Compréhension insuffisante dans notre pays du rôle structurant et précurseur des filières de production de biocarburants de première génération. - Refus des biotechnologies vertes en France et dans une partie de l'Europe de l'Ouest. - Politique de soutien à la recherche et au développement industriel de bioraffineries beaucoup plus active aux USA qu'en Europe.

II.1.7 - RECOMMANDATIONS

- **Poursuivre une politique de soutien significatif à une courte sélection de projets industriels d'excellence**

Analyser en détail avec les parties prenantes et **Oseo** les premiers résultats et les leçons à tirer des projets **BioHub** et **Osyris** pour définir comment répliquer (et éventuellement améliorer) ce modèle de projets à moyen terme, conduits par des industriels et disposant de budgets significatifs.

- **Stimuler notre recherche en biotechnologies blanches**, sur les dérivés de l'amidon et du glucose, en sélectionnant fortement les quelques équipes et projets porteurs d'avenir et évitant ainsi tout saupoudrage de moyens.
- **Stimuler la définition de projets communs entre les filières céréalières et amidonnières et l'industrie chimique française.** Quelle(s) peuvent être la - ou les molécule(s) - biosourcée(s) dérivée du glucose pouvant intéresser nos grands chimistes et pouvant être produites à un coût attractif en France ? Comment construire une vision partagée des filières françaises et mettre en œuvre les projets pour parvenir à des procédés et à des produits compétitifs ?
- **Poursuivre le soutien aux biocarburants de première génération en stimulant l'amélioration des procédés et des bilans environnementaux.** Communiquer sur leur rôle dans le développement de filières agroindustrielles durables, productrices de carburants et d'intermédiaires pour la chimie.
- Mettre en place une démarche pérenne et concertée de pédagogie et de promotion du rôle présent et à venir des **biotechnologies vertes**. Ce sera le préalable à la relance d'une recherche universitaire et industrielle active dans ce domaine stratégique pour notre compétitivité agricole à moyen terme.

II.2 - LES FILIERES DU SUCRE

Le sucre ou saccharose est principalement issu de la betterave à sucre dans nos régions tempérées et de la canne à sucre dans les pays tropicaux.

Le saccharose associe une molécule de glucose et une de fructose. Son hydrolyse produit ces deux oses en C6 et la filière "sucre" rejoint alors dans ses dérivés celle de l'amidon et du glucose.

II.2.1 - ESPECES BOTANIQUES, ORIGINES ET VARIETES CULTIVEES

Nous évoquerons ici deux espèces, la betterave, cultivée dans nos régions tempérées et la canne à sucre, strictement tropicale.

La betterave, *Beta vulgaris* (beet) est une chénopodiacée (comme l'épinard et la bette) qui a été domestiquée dans l'Est du bassin méditerranéen. Il existe des formes sauvages de la betterave (sous-espèce *maritima*) sur les rivages d'Europe. La betterave à sucre (*Beta vulgaris* subsp. *Vulgaris*, cultivar *Altissima*) est cultivée pour la production de sucre seulement depuis la fin du 18^{ème} siècle, à l'issue du blocus des importations de sucre des Antilles. C'est une espèce bisannuelle, au métabolisme photosynthétique en C3 dont la racine sert d'organe de réserve et se charge de sucre (saccharose). Semée au printemps, la betterave à sucre est récoltée dès le premier automne.

Le marché français des semences de betterave se répartit entre peu d'acteurs dans un secteur qui a connu différents mouvements de concentration et d'alliances. Florimont Desprez domine en 2009, avec 45 % de parts de marché et ses marques SES Vanderhave et Florimond Desprez, suivi par KWS (33 % de pdm), sous sa propre marque ou celle de sa filiale américaine Betaseed. Parmi les 55 variétés commercialisées en France, 6 totalisent 54 % des semences vendues. Si aucune variété génétiquement modifiée n'est actuellement cultivée en France, 95 % des semences de betteraves étaient OGM aux USA et au Canada en 2009 (résistance au glyphosate).

La canne à sucre, *Saccharum officinarum* (sugarcane en anglais) est une graminée diploïde vivace, au port de roseau et cultivée uniquement dans les régions chaudes. Elle aurait été domestiquée en Nouvelle Guinée. Son métabolisme photosynthétique en C4 lui confère des performances de croissance remarquables. Les fleurs sont hermaphrodites et la pollinisation est anémophile mais les variétés cultivées ont de faibles aptitudes à fleurir, la multiplication s'effectuant par boutures de tiges. Les variétés sont des clones.

Le développement de variétés OGM, plus riches en sucre, résistantes aux herbicides, à la sécheresse et aux insectes est avancé. Bien qu'il n'y ait pas encore de production commerciale OGM au Brésil, BASF, Bayer, Allelyx-Monsanto et le CTC = centre technique de la canne à sucre brésilien mènent des développements et des essais de plein champ. D'autres expérimentations de canne à sucre OGM ont lieu en Inde et en Australie. Des impacts forts des technologies OGM sur les rendements sont espérés dans le futur, ce qui pourrait encore augmenter la compétitivité de cette culture par rapport à celle de la betterave.

II.2.2 – COMPOSITION DES RECOLTES

La racine de la betterave sucrière est naturellement riche en eau. Les variétés modernes contiennent 15 à 18 % de sucre. La tige de canne, qui n'a de fonction d'organe de réserve qu'à sa base, contient pour sa part de 12 à 16 % de saccharose.

Composition typique de betterave à sucre à la récolte (g pour 100g)

Composés	% brut
Marc (pectines, cellulose, protéines, minéraux)	4.2 (4-5 %)
Jus	95.8
Eau	77.3
Saccharose	16.5 (15-18 %)
Autres sucres	0.1
Sels minéraux	0.5
Substances azotés (protéines, acides aminés, bêtaïne)	0.9
Matières organiques non azotées (pectines, acides organiques)	0.5

Source : IRIS (Institut de Recherches des Industries Sucrières)

Composition typique de la canne à sucre

Composés	% brut
Eau	70
Saccharose	14 (11-16 %)
Fibres	14
Divers, sels minéraux, protéines	2

II.2.3 – IMPORTANCE AGRICOLE ET PRINCIPAUX PAYS PRODUCTEURS**II.2.3.1 - LE CLASSEMENT DES PAYS PRODUCTEURS**

La betterave sucrière est une culture des régions tempérées, d'une importance relativement modeste tant à l'échelle française que mondiale, en comparaison des cultures céréalières et oléagineuses (en France, 350 à 370 000 ha, à comparer aux 7.4 millions d'ha de céréales à paille et 7.6 millions d'ha d'oléagineux et protéagineux).

Principaux pays producteurs de betterave à sucre

Pays	Production Mt		Surfaces x 1000 ha		Rendement t/ha	
	2003	2008	2003	2008	2003	2008
France	29.4	30.3	400	349	73.3	86.8
Russie	19.4	29.0	853	800	22.7	36.2
USA	27.7	26.8	545	407	50.9	66.0
RFA	23.8	23.0	446	349	53.3	62.3
Turquie	12.6	15.5	315	321	40.0	48.2
Ukraine	13.4	13.4	666	377	20.1	35.6
Chine	6.2	10.0	248	232	24.9	43.2
Pologne	11.8	8.7	286	187	41.0	46.5
UK	9.2	7.5	162	120	56.6	62.7
UE	122.1	101.5	2299	1545	53.1	65.7
Monde	229.7	227.6	5691	4386	40.4	51.9

Source : FAO. Les rendements sont exprimés en brut et non avec une référence de taux de sucre comme dans d'autres statistiques françaises et européennes.

En 2009, la **France** a produit 35 millions de tonnes de betteraves à 16°S sur 371 000 ha. Elle **demeure le premier pays producteur de betteraves à sucre (et le premier producteur mondial de sucre de betteraves)**, avec un mode de culture intensif et de bien meilleurs rendements que des pays comme la Russie dont la récolte d'ensemble est moindre alors les surfaces ensemencées sont deux fois plus importante. La production mondiale de betterave tend à diminuer en dépit d'une hausse moyenne des rendements.

Principaux pays producteurs de canne à sucre

Pays	Production Mt		Surfaces x millions ha		Rendement t/ha	
	2003	2008	2003	2008	2003	2008
Brésil	396	649	5.4	8.1	73.7	79.7
Inde	287	348	4.5	5.1	63.6	68.9
Chine	90	124	1.4	1.7	64.0	73.8
Thaïlande	74	74	1.1	1.1	65.1	67.1
Pakistan	52	64	1.1	1.2	47.3	51.5
Mexique	47	51	0.64	0.67	73.7	76.4
Colombie	39	39	0.40	0.39	97.9	100.4
Australie	37	34	0.45	0.39	82.6	87.1
Monde	1376	1743	20.8	24.4	66.2	71.5

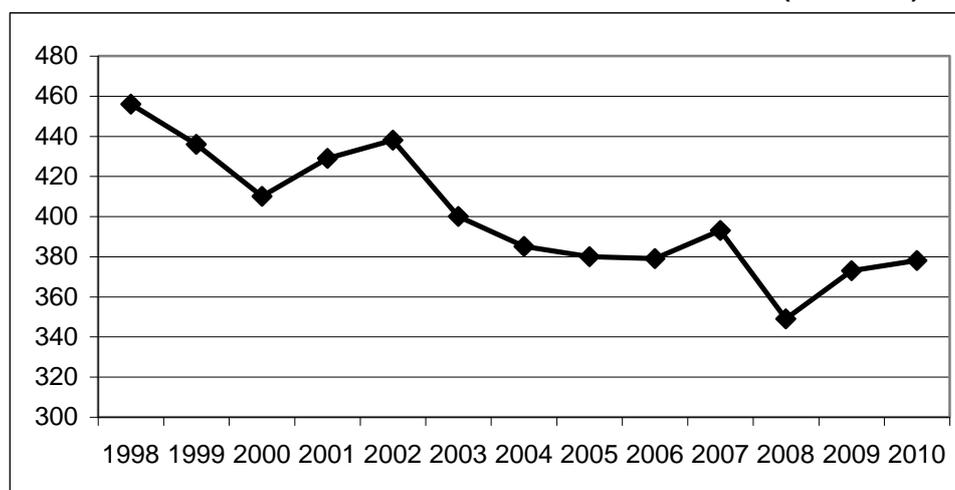
La canne à sucre est une plante cultivée entre 37° de latitude Nord et 30° de latitude Sud. Le Brésil est de loin le premier producteur, devant l'Inde et la Chine. En 2008, la production mondiale brute de canne a été 7.7 fois celle de la betterave. Les tonnages, surfaces et rendements de canne à sucre sont en progression dans les principaux pays producteurs.

II.2.3.2 - LES EVOLUTIONS DE LA CULTURE DE BETTERAVE EN FRANCE

La culture de la betterave est principalement localisée dans la moitié Nord de la France (12 départements y concentrent 90 % de la production – 29 départements au total sont concernés). Les cultures de betterave sont généralement groupées dans la zone d'approvisionnement d'une sucrerie (en moyenne 30 km) avec laquelle les planteurs sont liés par contrat.

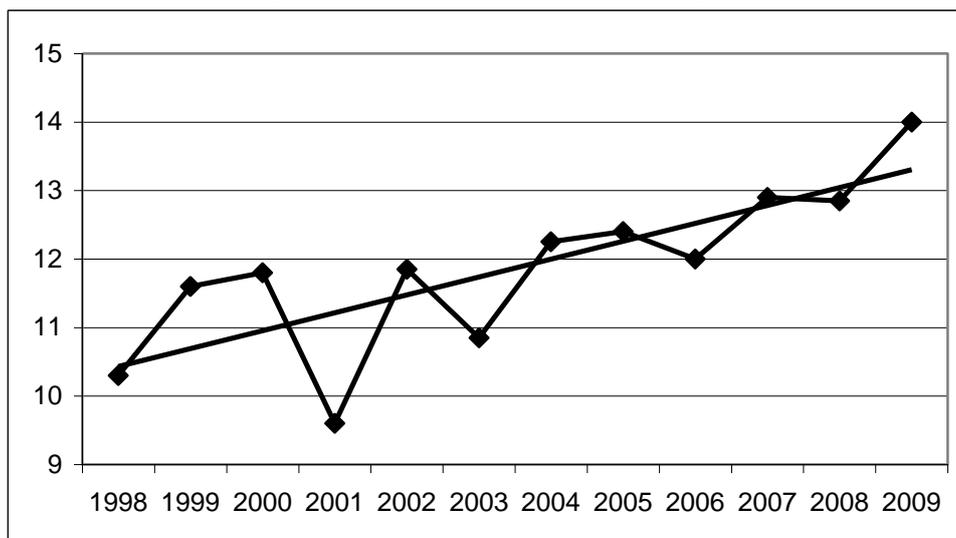
Les surfaces cultivées en betterave sont en baisse régulière depuis le début des années 80, lors desquelles elles avaient atteint 650 000 ha, près du double de celles d'aujourd'hui. Ces baisses de surface sont compensées par une hausse des rendements, également régulière. De 50 t-55/ha à 16° de sucre au tout début des années 80, ils sont estimés à 94.5 t/ha (16°S) en 2009-2010, ce qui représente une production record de 14.5 t de sucre blanc à l'hectare, contre 8 t/ha à la fin des années 70 (*en réalité, la récolte moyenne 2009 a été de 74.8 t/ha mais avec un taux de sucre exceptionnel de 19.5 %*). La progression moyenne des rendements est de + 180 kg de sucre par hectare et par an depuis 20 ans. Si l'amélioration variétale a une contribution essentielle à cette évolution, l'augmentation des températures moyennes au printemps serait également un facteur de progression significatif des rendements. La betterave, à l'inverse du blé, bénéficierait ainsi en France du réchauffement climatique.

Evolution des surfaces cultivées en betterave en France (x 1000 ha)



Source : Agreste – Semences et Progrès

Evolution du rendement moyen des betteraves en France, exprimé en t/ha de sucre blanc

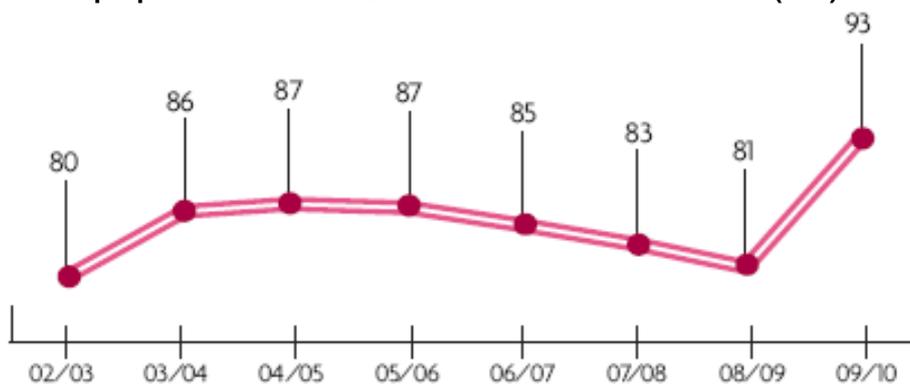


Source : Agreste – Semences et Progrès

II.2.3.3 – LA CANNE A SUCRE AU BRESIL

Le rendement de la canne à sucre dépend du stade de la culture à la récolte. Au Brésil, on peut compter 90 t/ha pour une canne de 12 mois et 110 t/ha pour une culture de 18 mois. Le rendement en sucre peut dépasser 10 t/ha, ce qui reste inférieur aux rendements français récents en betterave. Selon leurs promoteurs, les développements en cours de cannes génétiquement modifiées permettront à terme d'accélérer fortement les augmentations de rendement déjà observées. La compétition entre les deux cultures en termes de production de sucre à l'hectare va donc se poursuivre.

Exemple d'évolution de rendements de canne à sucre au Brésil : celui des cultures en propriété de la filiale Guarani de Tereos International (t/ha)



Source : Tereos – Rapport annuel 2008-2009

II.2.4 – DESCRIPTION DES FILIERES SUCRE

II.2.4.1 - SCHEMA GENERAL

Le schéma en annexe concerne la betterave. Les spécificités de la filière canne à sucre seront évoquées dans les paragraphes suivants.

La filière betterave, est définie autour de la production de saccharose, de ses dérivés et du bio éthanol. Ses grands produits sont ainsi d'amont en aval :

- **les pulpes de betteraves** qui restent principalement consommées par l'alimentation animale mais qui disposent d'un potentiel de plusieurs autres applications.

Le coproduit analogue de la canne à sucre est la bagasse, riche en cellulose. Celle-ci est généralement brûlée pour produire l'énergie nécessaire au fonctionnement de la sucrerie. Les usages en alimentation animale (ruminants) sont peu fréquents. La bagasse, ou la canne entière, pourraient devenir à terme la matière première de bioraffineries de deuxième génération.

- Grand produit alimentaire, **le saccharose** a de nombreuses applications industrielles dans des filières variées.
- Le **bioéthanol**, destiné à la production de biocarburant, côtoie "l'alcool", réservé aux autres applications alimentaires ou industrielles mais est obtenu selon les mêmes technologies. Il est produit par fermentation, à partir de sucre, de mélasse, ou de jus de betterave.
- **Les mélasses** sont des coproduits importants. Elles servent de substrat de fermentation pour la production de produits variés (y compris du bioéthanol) et on en extrait différentes molécules.

II.2.4.2 – LES ACTEURS CONCERNEES

Les semenciers de la filière betterave en France. On retrouve, Florimond Desprez et principalement sa filiale SES VanderHave, KWS, Deleplanque, Hilleshög, Ringot Maribo, Betaseed et Momont.

Parmi les organisations de sélection de la canne à sucre, on peut citer au Brésil : le CTC Centro de Tecnologia Canavieiri, Canavialis, etc..

Les producteurs de betterave sont actuellement au nombre de 26 000 en France.

Les entreprises sucrières : elles étaient 7 en France métropolitaine en 2009, avec un total de 25 sucreries (30 en 2005), toutes présentes dans la partie Nord de la France :

- Groupe Tereos (9 sucreries)
- Saint Louis Sucre (4 sucreries)
- Cristal Union (5 sucreries)
- Groupe Vermandoise (4 sucreries)
- Autres sociétés (3 sucreries)

5 sucreries produisent du sucre de canne dans les DOM français (La Réunion, Guadeloupe, Martinique).

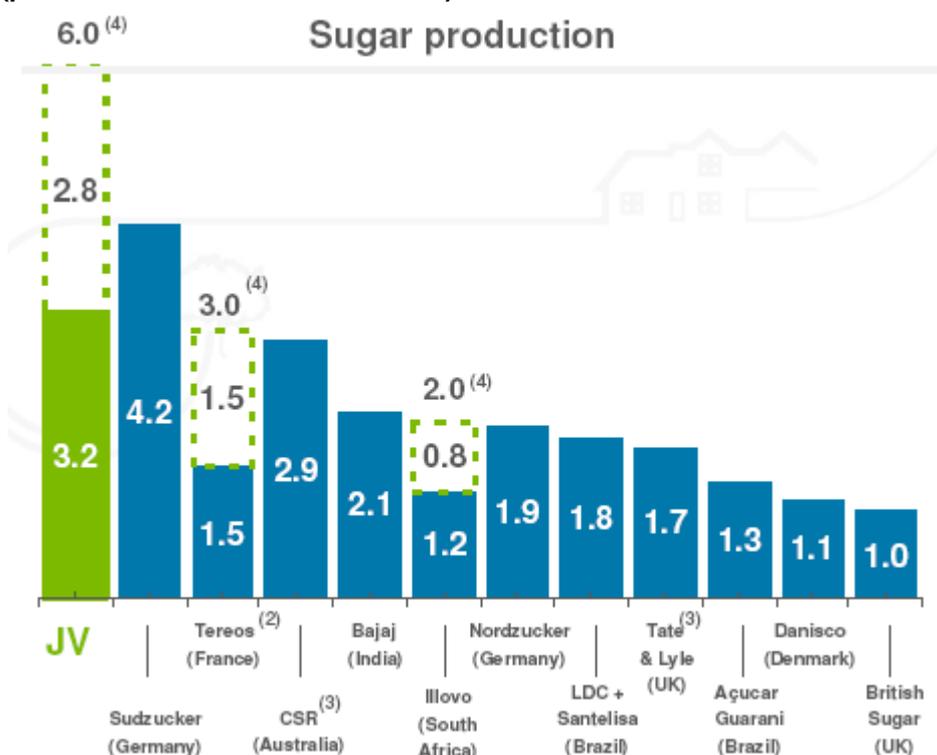
Les principales entreprises sucrières européennes sont présentées dans le tableau de la page suivante. Les concentrations se poursuivent dans le secteur.

Au Brésil, les principaux producteurs de sucre (de canne) sont **Cosan, le groupe familial français Dreyfus et le groupe coopératif français Tereos**. **Bajaj Hindusthan Ltd** est le premier sucrier et éthanoliériste indien alors que **Mitr Phol** est le premier sucrier thaïlandais. En Australie, **Sucrogen (ex CSR sugar)** domine la production nationale.

Les 10 premières sociétés sucrières européennes selon leur quota 2009-2010 (% du total)

Sociétés	Pays	Quota
Südzucker + Raffinerie Tirllemontoise + Saint Louis Sucre + Agrana	Allemagne / Belgique / France / Pologne / Autriche / République Tchèque / Slovaquie / Hongrie et Roumanie	25,1
Nordzucker + Danisco	Allemagne / Pologne / Slovaquie / Danemark / Finlande / Suède / Lituanie	15,6
British Sugar PLC	Royaume-Uni / Espagne	11,1
Tereos	France / République Tchèque	10,9
Pfeifer & Langen	Allemagne / Pologne / Roumanie	8,0
Royal Cosun	Pays-Bas / Allemagne	7,1
Cristal Union	France	4,5
Polski Cukier	Pologne	4,3
Groupe Vermandoise	France	3,2
Italia Zuccheri / Co.Pro.B	Italie	2,2
	Total 10 premiers groupes	92,1
	Autres	7,9
	Total	100

Les principaux producteurs de sucre au monde en 2007-2008 selon le groupe brésilien Cosan (productions en millions de tonnes). Des concentrations se sont réalisées depuis.



En pointilles, le graphique mentionne l'équivalent sucre en bioéthanol produit par certaines entreprises. La barre "JV" correspond aux capacités de la joint-venture créée avec Shell et Cosan fin 2009. LDC + Santelisa est, pour sa part, devenue filiale du groupe français Louis Dreyfus.

Source : Cosan

Principaux producteurs de sucre au Brésil en 2008-2009

Société	Nombre de sucreries	Mt canne traitées	Production de sucre Mt	Production d'éthanol M hl	Commentaires Evénements postérieurs
Cosan	22	44.2	3.3	17.2	
Santesila Vale	6	17.6	1.0	0.8	Racheté par L. Dreyfus.
Guarani (Tereos)	6	13.8	1.1	0.5	Croissance externe.
Santa-Terezinha	8	13.8	1.1	0.48	
Moema	7	12.7	0.7	0.65	
Carlos Lyra	7	12.2	0.9	0.42	
Sao Martinho	4	12.0	0.6	0.68	Partenaire d'Amyris pour son site pilote.

En matière de **commercialisation des pulpes de betterave**, plusieurs acteurs français du marché ont concentré leurs efforts dans la société **Desialis**, au capital de laquelle on retrouve les grands sucriers et les luzerniers.

La production de bioéthanol de betterave

5 sociétés produisent de l'éthanol à partir de betteraves en France.

- **Cristal Union** (Bazancourt : Cristanol, Arcy).
- **Groupe Vermandoise** (Tourey)
- **Saint Louis Sucre** (Epeville-Ham)
- **Sica Vallée du Loir** (Souppes)
- **Tereos** (Origny-Sainte-Benoite, Bucy, Lillers).

II.2.4.3 - ECONOMIE DE LA FILIERE**II.2.4.3.1 - LES PARAMETRES DE CONVERSION STANDARD**

Ils sont les suivants pour la betterave, en tenant compte qu'environ 30 kg de sucre / tonne de betteraves restent non extractibles.

En sucrerie :

1 t de betteraves "à la référence de 16 % de sucre" → 160 kg de sucre + 500 Kg de pulpes humides + 38 Kg de mélasses contenant 18 kg de sucre.

1 ha de betteraves → 13 à 14.5 t (rendement record) de sucre

En distillerie :

1 t betteraves "à 16 % de sucre" → 90-100 l d'éthanol pur
+ 4-5 kg de levures + des pulpes (48-52 kg de matière sèche)
+ des eaux résiduaires (à 1 kg d'azote et 1.6 kg de potasse par m³),

Autrement dit : 1 ha de betteraves = 75 hl = 6 t d'éthanol = 3.84 tep

1t de mélasses à 48 % de sucre → 290 l d'éthanol pur + 420 kg de vinasses

Rappels sur l'éthanol : 1 t = 12.65 hl 1 hl = 79.3 kg

Canne à sucre (données typiques)

1 ha de canne à sucre → 80 tonnes de canne

1 t de canne → 740 kg de jus (135 kg de sucre et 605 kg d'eau) → 115 kg de sucres et 35 kg de mélasse + 260 kg de bagasse à 50 % d'eau.

1 ha de canne → 8 à 11.5 t de sucre → 4000 l à 5500 l d'éthanol

II.2.4.3.2 - LA PRODUCTION DE SUCRE EN FRANCE ET DANS L'UNION EUROPEENNE

Le cadre européen

La production de betterave à sucre en Europe est encadrée par un règlement fixant les volumes et les prix jusqu'en 2014. Des quotas sont attribués aux sociétés productrices de sucre et d'isoglucose via les Etats-Membres. Les quantités produites dans le cadre du quota sont destinées au marché intérieur du sucre alimentaire. Les quantités produites au-delà du quota sont destinées aux industries chimiques et pharmaceutiques et aux industries de fermentation (y compris la fabrication d'alcool), elles peuvent être exportées dans le cadre de contingents dans la limite des engagements de l'Union Européenne à l'OMC, ou reportées sur la campagne suivante.

L'Union avait historiquement encouragé et protégés ses productions sucrières mais a peu à peu été contrainte de réformer son "règlement sucre" sous la pression internationale. En 2001, elle a ainsi ouvert son marché au pays les moins avancés (PMA). En 2006, la production sous quotas a été diminuée de 25 % et le prix minimum garanti a été réduit de 30 %. L'UE est alors passée de la position d'exportatrice nette de sucre à celle d'importatrice pour aujourd'hui 25 % de sa consommation. Elle est devenue le deuxième importateur mondial de sucre !

La réglementation des importations dans l'UE de sucre est en réalité complexe. Les PMA gardent un accès libre, sans droits de douane, au marché européen. Les pays de la zone ACP ont également un accès libre mais avec un accord de sauvegarde global de 3.5 Mt. Les pays des Balkans et la Moldavie ont un contingent de 402 Kt sans droit de douane. Les grands pays producteurs (Brésil, Inde, Australie...) disposent d'un contingent total de 677 Kt à droit réduit. L'UE peut également ouvrir des contingents d'importations supplémentaires de sucre à usage industriel non alimentaire (400 Kt en 2009-2010). Les importations dans l'UE ont finalement été de 2.9 Mt de sucre en 2008-2009, pour des exportations de 0.82 Mt (4 à 6 Mt avant 2006).

Prix minimum garanti des betteraves du quota en euros par tonne

	Avant réforme	2006-07	2007-08	2008-09	A partir de 2009-10*
Prix net de taxe	43.63	32.86	28.76	26.95	25.41

* : jusqu'en 2014-2015

Source : CGB

Le prix hors quota en France s'est établi en moyenne en 2008-2009 autour de 20 €/t (à 16°S) ce qui s'est révélé peu attractif pour les producteurs. Il a été légèrement revu à la hausse par les industriels en 2009-2010. Toute production hors quota fait l'objet de contrat entre les planteurs et un industriel transformateur qui pourra valoriser le sucre auprès de l'industrie ou à l'export, dans la limite des contingents négociés dans le cadre de l'OMC.

En 2009-2010 la production de sucre prévue dans l'UE est de 17.3 millions de tonnes dont 13.4 Mt de quotas de sucre blanc.

La production de sucre en France

La production française de la campagne 2009-2010 s'élève donc à 4.7 millions de tonnes de sucre de betteraves qui se répartissent ainsi :

- 2.96 M t vendues en France ou dans l'UE (= quota de la France métropolitaine).
- 300 Kt pour les industries chimiques et pharmaceutiques.
- 600 Kt de sucre hors quota, exporté vers les pays tiers.
- 650 Kt d'équivalent sucre, transformé en éthanol/alcool.

En 2008-2009, 3 millions de tonnes de sucre ont été consommés en France dont 59.2 % dans les industries alimentaires et la restauration, 20.3 % sous forme d'alcool / éthanol, 13.3 % sous forme de sucre de bouche et 7.2 % par les industries chimiques et pharmaceutiques. Près de 2 millions de tonnes de sucre ont été exportés (vers l'Espagne, l'Italie, la RFA, le Royaume Uni, la Suisse, l'Algérie, Israël, etc.) alors que 430 000 t ont été importées.

II.2.4.3.3 - LA PRODUCTION MONDIALE DE SUCRE ET LE MARCHÉ INTERNATIONAL

Le suivi des statistiques mondiales n'est pas simple, certaines données étant exprimées sous forme de sucre brut et d'autres de sucre blanc, un coefficient de conversion de 0.92 permettant de passer du brut au blanc !

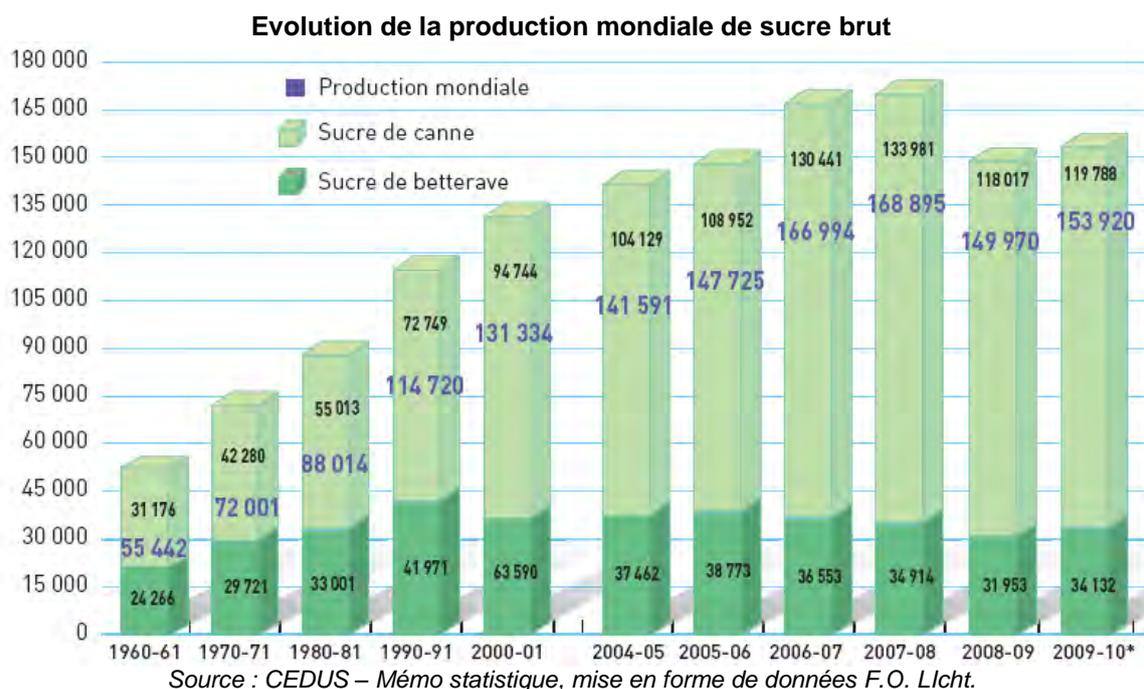
La production et la consommation sont en croissance régulière, avec le développement de la population mondiale. Le Brésil est de loin le premier producteur, suivi par l'Union Européenne, l'Inde et la Chine. Le Brésil est le premier exportateur, suivi par la Thaïlande et l'Australie. L'Inde est le premier importateur, suivie par l'UE, la Russie et les USA.

Principaux pays producteurs de sucre (millions de tonnes de sucre brut)

Pays	2003-2004	2009-2010 (prévisions)			
	Production	Production	Consommation	Exportation	Importations
Brésil	26.4	38.0	12.4	25.9	
UE*	16.6	18.7	19.7	1.8	3.2
Inde	15.0	17.3	23.0		4.0
Chine	10.3	14	15.5		
Thaïlande	7.3	8		5.6	
USA	3.6	7.3	9.9		2.6
Mexique	5.3	5.6	5.3		
Australie	5.3	4.9		4.0	
Pakistan	4.3	3.7	4.7		
Russie		3.4	6.2		2.7
Monde	144	153.9	167		

(* à 25 en 2003-04 puis à 27 en 2009-10).

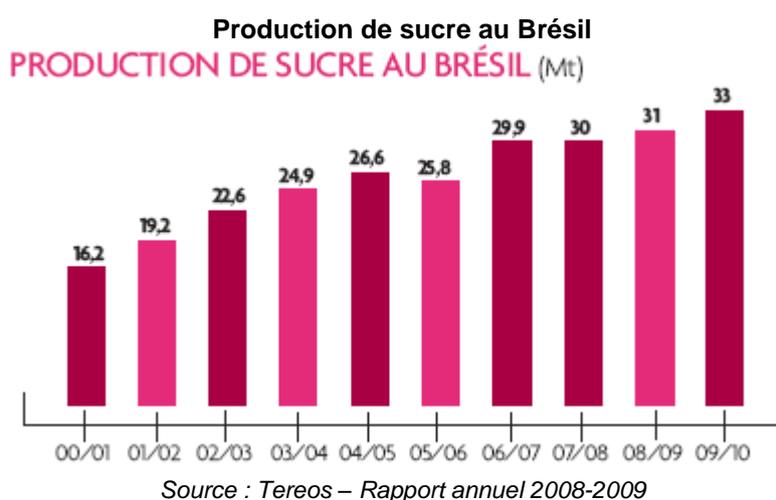
Source : CEDUS - Mémo statistique du sucre.



La part du sucre de betterave baisse régulièrement, en raison d'une diminution des productions betteravières dans l'Union Européenne et aux USA mais surtout du fait de l'augmentation des tonnages de sucre de canne.

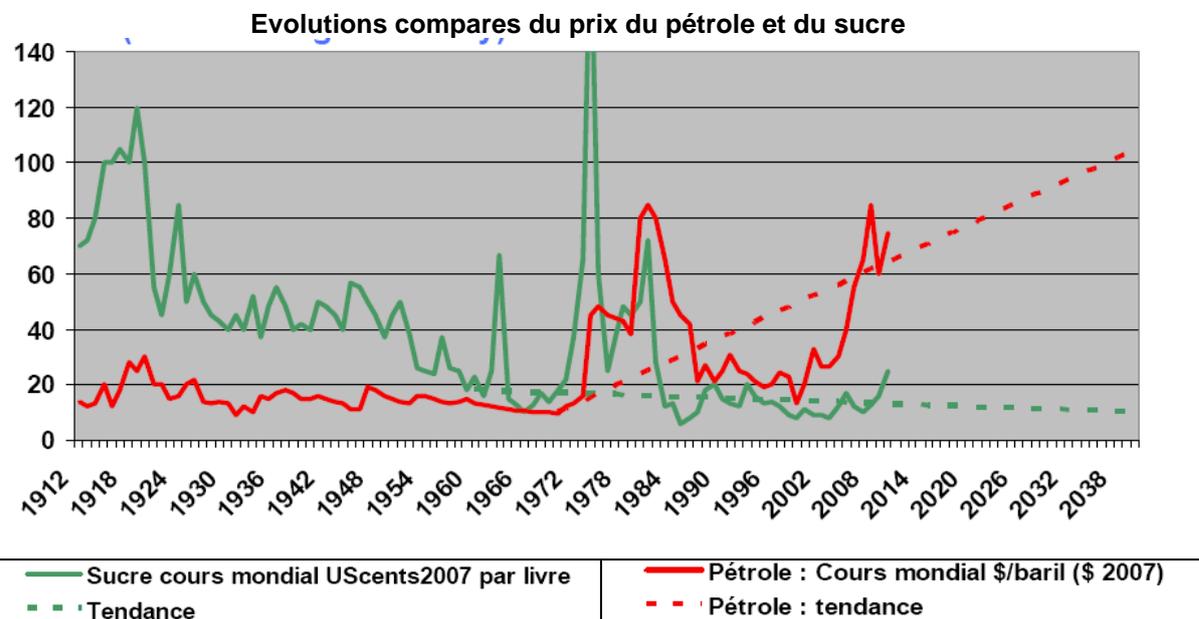
Cependant, la forte croissance de la production de canne à sucre au Brésil n'entraîne pas mécaniquement la hausse de la production de sucre dans ce pays, la part de la récolte de canne dédiée à la fabrication directe d'éthanol se développant très rapidement.

En 2010, la production de sucre au Brésil devrait être en croissance de 19.1 % avec un total de 34 millions de tonnes à comparer au 26.8 millions de tonnes de l'année précédente. La récolte de canne s'est accrue de 10 %, 595 millions de tonnes de canne sont traitées contre 541 Mt l'année d'avant. 43 % seront transformées en sucre et 57 % seront destinées à la production de bioéthanol.



Le prix du sucre subit des variations cycliques, parfois de grande ampleur, en fonction des tensions mondiales se créant entre l'offre et la demande. Si l'on considère l'évolution du prix sur une longue période, l'ampleur des oscillations diminuerait, les prix montrant une tendance

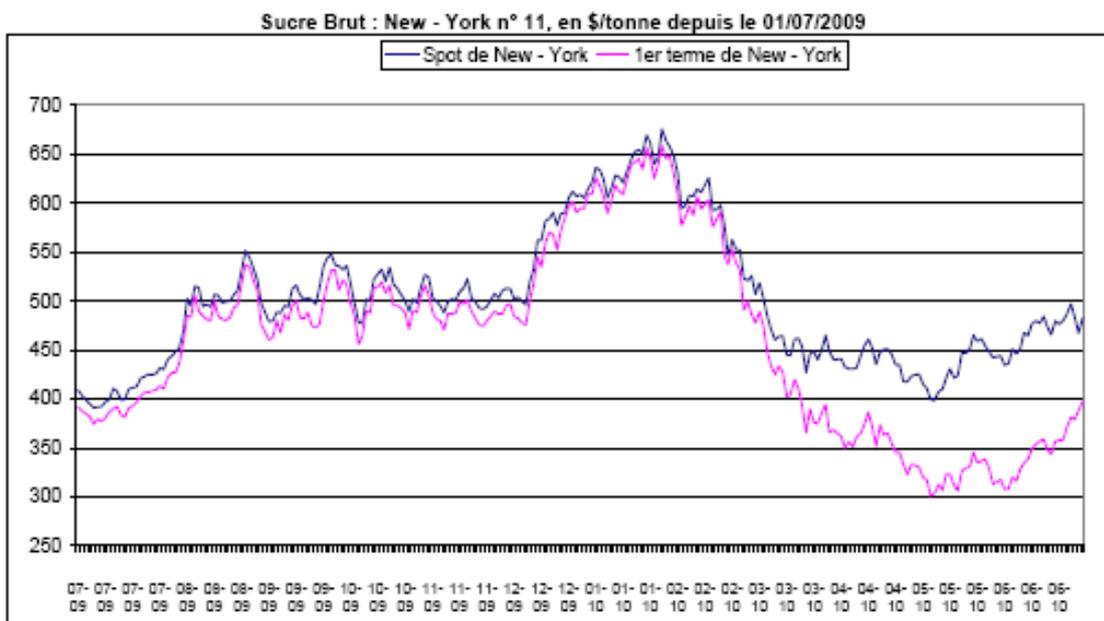
lourde à la baisse. A l'inverse, le prix des ressources fossiles est en hausse structurelle et devenu plus volatil. En ce qui concerne l'avenir, l'analyse prospective doit rester prudente, la croissance de la demande mondiale de sucre et le développement rapide des nouveaux usages de la biomasse pouvant faire évoluer les modèles de régulation des marchés.



Source : Tereos – Exposé de B. Chaud aux journées de l'IFP 2010 – D'après Morgan Stanley

L'examen de l'évolution des prix sur une période plus récente montre des variations de plus du simple au double (cf. ci-dessous). Pour des analyses précises, il convient de distinguer le prix du sucre brut de celui du sucre blanc. Le différentiel a varié entre 45 et 160 \$/t mais des valeurs moyennes de 100 \$/t sont courantes.

Evolution récente du cours du sucre brut (\$ US/t), de juillet 2007 à juin 2010



Source : France Agrimer

II.2.4.3.4 - LA PRODUCTION ET LE MARCHÉ DE L'ALCOOL ETHYLIQUE

La France a produit en 2008-2009 près de 8.5 millions d'hectolitres d'alcool à partir de betteraves dont 8.5 Mhl d'origine betteravière, parmi lesquels 6.8 de bioéthanol, destinés à être incorporés dans les carburants.

Le marché de l'alcool éthylique et du bioéthanol seront abordés plus en détail au § III.1.

Production d'alcool en France (en milliers d'hectolitres)

	2205-06	2006-07	2007-08	2008-09
Origine betteravière	5232 (61 %)	6438 (63 %)	9051 (71 %)	8467 (53 %)
Total	8594	10272	12796	16012

Source: CEDUS – Mémo statistiques, à partir de CGB, SNPAA.

En 2010, la production brésilienne d'éthanol devrait atteindre en 274 millions d'hectolitres, en progression de 15 % par rapport à l'année précédente (237 millions d'hectolitres).

II.2.4.3.5 - LA PRODUCTION ET LE MARCHÉ DES PULPES DE BETTERAVE

En moyenne, le traitement d'une tonne de betteraves génère la production de 500 kg de pulpes humides. Les quantités de pulpes disponibles dépendent donc directement de l'importance de la récolte. Les pulpes restent la propriété des planteurs de betterave ce qui justifie leur implication dans la valorisation de ce coproduit.

Production de pulpes de betterave en France et en Europe

	France (2009-2010)		UE à 27 (2007-2008)	
	Kt brutes	Kt ms	Kt brutes	Kt ms
Pulpe humide	187.5*	19	3065	320
Pulpe surpressée	1322**	358	7672	1762
Pulpe déshydratée	1151***	1011	4168	3727

* : à 10.2 % de ms ; ** : à 27.1 % de ms ; *** : à 88 % de ms.

Source : CEDUS

Les prix des pulpes ont fortement varié ces dernières années. Il est corrélé à celui d'autres matières agricoles (céréales) mais aussi à l'état de santé des secteurs d'élevage consommateurs et enfin au comportement des acheteurs, privilégiant l'achat spot ou des contrats.

Le prix des pulpes payé au producteur était en moyenne de 0.5 €/t de betteraves en 2003-2004. Il s'est accru jusqu'à 1.89 €/t en 2008 avant de redescendre. La crise laitière et plus généralement de l'élevage, ainsi que l'abondance de la dernière récolte de betteraves vont entraîner une saturation du marché et une baisse des prix.

Le prix de marché des pulpes déshydratées (la présentation la plus transportable et stockable du produit) a ainsi évolué entre 110 et 240 €/t ces dernières années, avec un maximum début 2008. Le prix moyen de vente en 2008 a été proche de 155 €/t tandis que celui des pulpes surpressées avoisinait les 78 €/t.

II.2.4.3.6 - LE MARCHÉ DES MELASSES

La production de mélasses en France métropolitaine a été de 328 Kt en 2007-2008 (664 Kt en 2002-2003) et de 2.546 Kt dans l'Europe des 27. La France a importé 473 Kt dont 350 Kt de pays tiers et 123 Kt depuis l'Union Européenne.

II.2.5 – LES PRINCIPAUX PRODUITS DES FILIERES SUCRE

II.2.5.1 - VALORISATION DES PULPES DE BETTERAVE

Rappelons que 1 t de betteraves récoltées génère environ 500 kg de pulpes à 10 % de matière sèche.

Composition de la pulpe de betterave et de la bagasse (en % de la matière sèche)

Composés	Pulpe de betterave	Bagasse
Cellulose	18 - 36	45-55
Hémicelluloses dont arabinoses dont galactoses	18 – 32 ~ 20 ~ 7	20-25
Lignine	3 – 6	18-24
Pectine	15- 32	
Protéines	5 – 10	
Minéraux	3 – 12	1-4
Sucre résiduel	2 - 6	

Source : CEDUS

La pulpe constitue une ressource de biomasse comportant autant de cellulose que d'hémicelluloses. Elles se distinguent des pailles ou des produits à base de bois par sa faible teneur en lignine et sa richesse en pectines contenant des sucres particuliers comme l'acide férulique.

Comme on le verra ci-dessous, on retrouve sur la pulpe de betterave la concurrence d'usage potentielle entre trois grandes valorisations de nombreux coproduits agricole : l'alimentation animale, la production d'énergie et l'obtention de dérivés plus ou moins transformés pour d'autres industries.

Usages en alimentation animale

Cela reste aujourd'hui le débouché traditionnel et presque exclusif des pulpes de betterave. Celles-ci sont vendues humides (à proximité des sucreries) ou déshydratées. Elles sont considérées comme une excellente source de fibres pour les espèces qui en nécessitent (truies, lapins mais aussi pour les animaux de compagnie comme le chien). C'est également une très bonne matière première pour l'alimentation des ruminants.

La commercialisation de **pulpes humides** est en régression régulière car celles-ci sont difficiles à conserver, y compris dans les élevages. En outre, les coûts de transport d'une telle matière première chargée en eau deviennent rapidement prohibitifs.

Composition des coproduits de la betterave valorisés en alimentation animale

Teneurs en % du brut	Pulpe déshydratée	Pulpe déshydratée mélassée	Pulpe surpressée	Mélasse
Humidité	10.9	11.7	75.9	75.7
Protéines brutes	8.1	8.8	2.1	11.0
Cellulose brute	17.3	17.1	5.0	0
NDF*	40.5	40.1	11.6	0
Matières grasses	0.9	0.6	0.1	0.2
Cendres brutes	6.8	6.3	1.6	9.8
Amidon	0	0	0	0
Sucres totaux	6.6	8.9	1.2	46.6

Source : tables INRA de composition et de valeur nutritive des matières premières

*: le NDF (Neutral Detergent Fiber) est un paramètre classique de mesure du taux de fibres (lignine + cellulose + hémicelluloses + une partie des pectines)

De même, la production de **pulpes surpressées** est en diminution car l'ensilage nécessaire à leur conservation reste délicat. Pour des raisons de coûts, elles ne peuvent voyager à plus de 150 km des sucreries dont le nombre s'est réduit ces dernières années. En outre, les pulpes surpressées se retrouvent en concurrence croissante avec les drèches de distillerie d'éthanol de céréales.

Ce sont finalement les **pulpes déshydratées** qui sont le plus utilisées dans les grandes régions d'élevage de l'Ouest, loin des bassins de production betteravière.

Utilisations comme source d'énergie

La déshydratation de la pulpe de betterave nécessite de l'énergie coûteuse. Une fois sèche, en revanche, la pulpe peut devenir elle-même un combustible.

2.6 t de pulpes déshydratées peuvent remplacer 1 t de fuel. Le PCI des pulpes sèches est de 3700 kcal/kg.

Dans la technologie de déshydratation des pulpes, l'efficacité du pressage préalable a été améliorée régulièrement depuis 20 ans, permettant des économies sensibles sur la phase suivante qui nécessite de l'énergie thermique. Deux voies sont explorées :

- La première consiste à brûler une partie de la pulpe sèche obtenue pour déshydrater le reste à haute température. L'investissement est modéré mais 45 % de la pulpe produite serait nécessaire. La mise en place de telles pratiques réduirait donc d'autant l'offre de pulpes sur le marché.
- Une autre approche industrielle est de sécher les pulpes à la vapeur surchauffée en utilisant la station d'évaporation de la sucrerie. Ce système est nettement plus économe en énergie mais l'investissement est beaucoup plus lourd.

D'autres études ont montré qu'une sucrerie pourrait devenir entièrement autonome en énergie en brûlant les $\frac{3}{4}$ de ses pulpes après leur séchage à la vapeur. Le coproduit "pulpes" pourrait devenir alors la source d'énergie de la production du sucre. Les sucreries de betterave évolueraient dans ce cas sur le modèle des sucreries de canne ou des usines de pâte à papier dont la combustion des coproduits assure l'autonomie énergétique.

Les pulpes peuvent également être utilisées pour la production de biogaz par méthanisation.

Les autres valorisations des pulpes

La filière betterave et ses partenaires (dont l'ADEME) ont réalisé depuis plusieurs années de nombreuses études destinées à explorer d'autres valorisations de la pulpe de betterave. Peu ont cependant des applications industrielles. Les produits issus de la betterave se retrouvent en concurrence avec ceux de la pétrochimie mais aussi avec ceux d'autres filières végétales.

Les principales propriétés intéressantes des pulpes de betterave sont liées à leur richesse en polysaccharides et notamment en pectines, aux propriétés texturantes, présentant des capacités de réticulation et pouvant être transformés en polyols.

On retrouve ainsi des usages de pulpes comme :

- **Substrat de fermentation.** Lyven, intégrée au groupe **Soufflet**, utilise des pulpes de betterave comme substrat de fermentation en phase solide pour la production d'enzymes.

- **Sources de dérivés de l'acide galacturonique.** L'acide mucique est un produit d'oxydation de l'acide galacturonique, présent dans les pectines de pulpe de betterave. C'est un additif cosmétique valorisé par la société **Soliance**, filiale d'**ARD**. Des alcools gras peuvent être greffés sur l'acide galacturonique et les autres sucres présents dans les pectines et donner naissance à des molécules tensioactives de très bonne qualité de type alkylogalacturonates. Leurs applications sont limitées à des niches particulières compte tenu de leur coût élevé (en comparaison avec de produits d'origine céréalière).

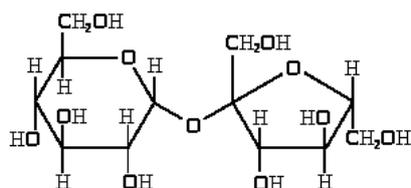
Et des projets parfois anciens de valorisation comme :

- **Additif pour la pâte à papier.** La pulpe blanchie, séchée puis micronisée pourrait remplacer l'amidon dans ses fonctions de liant.
- **Charge végétale dans des ciments composites,** pour des applications dans des panneaux à fonction d'isolant phonique et thermique. La pulpe de betterave se heurte à la concurrence du chanvre, des sciures de bois, du liège et des pailles de céréales.

D'autres recherches ont été – entre autres - menées sur :

- Leur pouvoir de fixation d'ions toxiques en traitement des eaux
- Les capacités absorbantes de pectines de betteraves réticulées.
- Des polyuréthanes à base de pulpes. Sans purification, par traitement à l'oxyde de propylène, celles-ci peuvent être transformées en polyol visqueux qui peut être mélangé à des polyisocyanates pour former des polyuréthanes.
- Les pulpes comme substrat de production de vanilline. Les pectines de la pulpe contiennent de l'acide férulique qui est un précurseur, par fermentation, de l'acide vanillique puis de la vanilline. La pulpe de betterave est en concurrence avec d'autres matières premières riches en acide férulique comme le son de riz.

II.2.5.2 – LES UTILISATIONS ET LES DERIVES DU SACHAROSE



Le saccharose, association d'un fructose et d'un glucose a des propriétés spécifiques. Sa molécule dispose de 8 groupes hydroxyles dont chacun présente une réactivité particulière. C'est une force, par la diversité des réactions possibles et une faiblesse car il est difficile de réaliser une seule réaction à la fois. La chimie du saccharose ou sucrochimie rassemble les transformations mettant en œuvre directement la molécule de saccharose dans son intégrité. Dès que celle-ci est hydrolysée en ses deux composants, on se retrouve face à la chimie du glucose ou du fructose, décrite en partie dans le chapitre II.1 consacrée aux filières de l'amidon mais aussi dans le chapitre III, dédié à certaines molécules pouvant provenir de plusieurs ressources végétales (comme l'éthanol).

Les utilisations (non alimentaires) directes du sucre

Le saccharose est utilisé directement dans :

- Les ciments et bétons, pour retarder la prise,
- La fonderie, pour faciliter le démoulage,

- Le tabac (maintien d'un taux d'humidité suffisant),
- Les produits phytosanitaires,
- Les colles, comme additif,
- La tannerie du cuir.

Le sucre dans les polyuréthanes

10 000 t de sucre seraient utilisées en Europe dans la production de mousses rigides de polyuréthane.

Les dérivés spécifiques à haute valeur ajoutée. On peut citer :

- **Les fructo-oligosaccharides.** Ce sont des chaînes courtes obtenues par conversion enzymatique du saccharose. Elles ont des propriétés bifidogènes, valorisées en diététique humaine et animale.
- **Le Sucralose**, découvert par Tate&Lyle en 1976 est un édulcorant intense fabriqué en greffant 3 atomes de chlore sur du saccharose.
- **L'Olestra** est un substitut de graisse à base d'un polyester de saccharose et d'acides gras. Il a été développé par **Procter & Gamble** dans les années 70 mais n'a été approuvé par la FDA qu'en 1996. Il est utilisé dans les chips et les produits de grignotage. Le marché est en croissance rapide (plusieurs centaines de millions de dollars).
- **Le Sucralfate** est un complexe de sulfate d'hydroxyde d'aluminium et de saccharose utilisé en pharmacie, dans le traitement des ulcères.
- **Le Polysucrose** est un copolymère de saccharose et d'épichlorhydrine utilisé dans les laboratoires de biologie pour créer des gradients de densité.

Les esters gras de saccharose : sucroesters et sucroglycérides

Leur production est ancienne au Japon et plus récente en France. Les sucroesters sont produits par une transestérification dans laquelle les réactifs sont le saccharose et des esters méthyliques d'acides gras végétaux à chaînes courtes ou plus longues (y compris en C18). Ce sont des produits biodégradables et non toxiques.

Les sucroglycérides sont des mélanges de sucroesters et de glycérides partiels, résultant de la réaction entre le saccharose et des triglycérides.

Sucroesters et sucroglycérides ont des propriétés tensioactives et sont utilisés comme agents mouillants et dispersants. Ils ont de nombreuses applications agroalimentaires en panification, biscuiterie, confiserie, dans les produits laitiers, les mayonnaises, les margarines, les boissons, etc.... Leurs activités antibactérienne et antifongique sont également valorisées dans diverses préparations alimentaires et dans l'enrobage des fruits.

Les sucroesters sont utilisés comme détergents dans des applications où leur prix élevé n'est pas rédhibitoire. Ils sont employés pour le nettoyage de fruits et légumes, de produits de la mer et de volailles. Leurs faibles propriétés moussantes leur offrent des débouchés dans les produits de lavage des textiles délicats.

En pharmacie et cosmétique, leurs propriétés détergentes, antiseptiques et émulsifiantes sont valorisées dans des applications où ils sont incorporés à des crèmes et des gels. Leur capacité à former des microémulsions favorise l'absorption de principes actifs et justifie d'autres utilisations. Les sucroesters rentrent dans la composition de comprimés et de gélules, soit comme agent lubrifiant pour leur fabrication, soit pour améliorer la solubilisation, la dispersion et l'absorption des molécules actives dans le tube digestif.

Le plus gros marché des sucroesters serait celui du SAIB (Sucrose Acétate Isobutyrate) et atteindrait 100 Kt à l'échelle mondiale.

II.2.5.3 - LA VALORISATION DES MELASSES

Les mélasses de betterave ou de canne sont utilisées couramment en alimentation animale mais aussi comme substrat de fermentation. On peut également en extraire différentes molécules.

Source pour l'extraction de certaines molécules

- **La bétaine** est un précurseur métabolique de la méthionine. Elle est utilisée comme additif en alimentation animale et aussi en pharmacie. Des dérivés de la bétaine sont également utilisés en cosmétique (shampoings, bains moussants, laits démaquillants) pour leurs propriétés amphiphiles.

Substrat de fermentation

- **Levure de boulangerie**
Les levuriers européens (**Lessafre, CSM**, etc.) consomment 750 000 t de mélasses produites localement et 250 000 t de mélasses d'importation (de canne et de betterave), pour produire 900 000 t de levure.

1 tonne de mélasse permet en effet d'assurer la production d'environ 1 t de levure.
- **Production d'acides organiques et d'antibiotiques**
Les mélasses de betterave sont utilisées pour la production par fermentation de nombreux acides organiques :
 - acides aminés (L-lysine, L-tryptophane)
 - acides lactique, citrique, itaconique, propionique,Et d'antibiotiques (β -lactames).

II.2.6 - FORCES, FAIBLESSES, PERSPECTIVES DE LA FILIERE FRANÇAISE

La betterave est une plante très productive dans le schéma intensif français et ses rendements progressent régulièrement. La filière est très structurée et sait mener un lobbying efficace en dépit de sa petite taille. Sa pérennité dépend toutefois fortement de décisions politiques et de négociations internationales.

Le traitement industriel de la betterave est contraignant car la récolte est riche en eau et doit donc être traité dans des unités présentes à proximité des zones de culture.

La filière betterave génère trois grands produits : le sucre, l'alcool (ou bioéthanol) et les pulpes.

L'importance des valorisations alimentaires du sucre masque son potentiel pour l'industrie. La sucrochimie est encore une science récente et semble en même temps déjà passer dans l'ombre. Les dérivés du saccharose, par hydrolyse ou par fermentation directe, se retrouvent aujourd'hui directement concurrents de ceux issus de l'amidon et le seront demain des produits de fragmentation de la cellulose.

Dans notre pays, le développement de la production d'alcool à partir de la biomasse reste un processus majoritairement orienté vers à la fabrication de biocarburants dont le développement est défini par les pouvoirs publics. Au Brésil où les coûts de production sont beaucoup plus bas, la ressource largement plus abondante, une chimie active de l'éthanol de canne à sucre se développe pour servir des marchés dont la dynamique de croissance est beaucoup plus forte qu'en Europe.

La diversité des travaux menés sur les valorisations potentielles des pulpes de betterave est impressionnante mais ces dernières restent encore majoritairement utilisées par l'alimentation animale.

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> - Très bonne productivité en sucre et en bioéthanol à l'hectare (en comparaison des céréales mais aussi de la canne à sucre). - Croissance des rendements. Potentiel d'amélioration génétique de la betterave (voie classique et OGM). - Filière parfaitement organisée et structurée. 	<ul style="list-style-type: none"> - Petite filière, aux capacités de production limitées. - Coûts de production élevés. - Pas de projet significatif en France de production de molécules pour la chimie. - Filière fortement dépendante des négociations internationale sur le sucre et du soutien national au bioéthanol. - Chimie spécifique (sucrochimie) restant peu développée.

Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> - Développement de technologies de production d'intermédiaires de synthèse par fermentation des sucres. - Hausse du prix du pétrole, rendant plus compétitive les filières valorisant la biomasse. 	<ul style="list-style-type: none"> - Concurrence très forte de la canne à sucre, particulièrement brésilienne, sur les principaux produits de la betterave et se développant dans des régions en forte croissance tant en ce qui concerne l'agriculture que l'industrie chimique. - Compétition avec les filières céréalières (bioéthanol drèches/pulpes, dérivés du saccharose/de l'amidon). - Refus national et européen des OGM limitant les perspectives d'augmentation de la productivité.

II.2.7 - RECOMMANDATIONS

Dans l'inventaire des perspectives de développement de la chimie du végétal et des bioraffineries qui est l'objet cette étude, la filière betterave est un objet de dilemme. Elle n'offre en effet guère de produits spécifiques et reste de petite taille. Les sucreries et les éthanoleries de betterave modernes sont en revanche des modèles d'efficacité de traitement de la biomasse humide. Que proposer donc ? Les recommandations qui suivent diffèrent malheureusement la réponse, faute d'éléments suffisants.

Une question de fond doit être traitée : quelle est la position compétitive actuelle et future de notre filière betteravière comme fournisseur potentiel de l'industrie chimique en comparaison de celles :

- des céréales en France et en Europe,
- de la canne à sucre dans les régions tropicales (particulièrement au Brésil et en Asie) ?

Au delà des seuls paramètres économiques, quelles peuvent être les justifications stratégiques de soutenir en France et en Europe le développement d'une filière de chimie des dérivés de la betterave ?

On peut ainsi proposer de mener une analyse prospective de l'évolution attendue des compétitivités relatives de la filière betterave, de celle du blé et de celle de la canne à sucre, exprimées en termes d'équivalent glucose ou éthanol, disponibles pour des conversions chimiques ou par fermentation (coût du kg de glucose et du litre d'éthanol). Il conviendra de prendre en compte les perspectives de progrès des pratiques agronomiques et celles de l'amélioration génétique des cultures, classique ou par génie génétique. Les évolutions à attendre des coûts de production agricoles et de ceux des transformations industrielles doivent être également analysées (en intégrant notamment une baisse progressive des différentiels de coûts de main d'œuvre entre les pays du Nord et ceux du Sud mais en prenant également en compte les niveaux d'économies d'échelles, accessibles ou non, suivant les filières et les régions).

Formulée en termes plus directs, les questions nécessitant une réponse sont les suivantes :

- Produire de l'éthylène de betterave peut-il avoir un sens en France ?
- Si les productions européennes d'acide succinique, d'acide lactique et d'autres produits de fermentations prennent une ampleur importante dans notre région du monde, la filière betterave sera-t-elle adaptée à en fournir les substrats ?

Un autre regard devra être proposé : les sucreries et les éthanoleries sont des bioraffineries de biomasse humide. Par définition, cette dernière ne peut être transportée sur de longues distances ni être stockée pendant une longue période. Le développement des technologies de seconde génération va offrir de nouvelles possibilités de traitement d'espèces végétales diversifiées. Quelles autres récoltes, produites à proximité des sucreries / éthanoleries françaises, pourraient elles être traitées par celles-ci à l'avenir, de façon à lisser mieux leurs activités ?

Les travaux de développement des applications des pulpes de betterave doivent être pour leur part concentrés sur une sélection de deux ou trois pistes, réellement porteuses d'un avenir industriel. Le potentiel quantitatif de développement des technologies de fermentation en milieu solide mériterait d'être examiné de près. Quels tonnages de substrat à base de pulpe pourraient-elles être amenées à consommer à l'avenir ?

II.3 - LES FILIERES DES HUILES VEGETALES

Les plantes dites oléagineuses stockent la majorité ou une partie des réserves de leurs graines sous forme d'huiles, autrement dits de lipides, caractérisés par leurs chaînes carbonées de longueur variable et leur forte densité énergétique, liée à leur faible niveau d'oxydation.

II.3.1 - ESPECES BOTANIQUES, ORIGINES ET VARIETES CULTIVEES

Il existe de nombreuses espèces oléagineuses cultivées. En France et en Europe, le colza et le tournesol occupent les premières places. Nous évoquerons également ici des plantes importantes dans d'autres régions du monde ou présentant un intérêt particulier pour la chimie du végétal : le soja, le palmier à huile, le cocotier et le ricin. L'arachide, le carthame, le coton, le lin oléagineux, le jatropha, le jojoba et d'autres espèces plus secondaires ne seront pas décrits en détail ici.

Le colza, *Brassica napus var. oleifera* (rapeseed ou canola, en anglais) est une brassicacée (crucifère) annuelle qui aurait été domestiquée en Europe. Son régime reproducteur est mixte, avec une dominance des fécondations autogames. Les fécondations croisées sont assurées majoritairement par les insectes. Son génome "amphidiploïde" est une combinaison ancienne de celui du chou (*B. oleracea*) et de celui de la navette (*B. campestris*). On ne retrouve pas de "colza sauvage" dans la nature. En revanche, le colza cultivé peut échanger des gènes à des faibles taux avec les navettes adventices.

Il existe des variétés de colza d'hiver qui sont semées à l'automne et récoltées l'été suivant et des colzas de printemps qui accomplissent leur cycle entre le début du printemps et l'été. En France, le colza d'hiver, dont le rendement est plus élevé, domine largement. Les colzas de printemps sont réservés à des usages comme cultures "dérobées". Ils dominent en revanche dans les pays froids (Canada) ou subtropicaux.

Les variétés modernes de colza sont de différents types :

- Des lignées pures.
- Des hybrides restaurés (entre une lignée femelle, mâle stérile, et une lignée pollinisatrice).
- Des composites d'hybrides et de lignées ou d'hybrides.

La multiplication de semences de ferme reste non négligeable (elle est estimée à 26 %). Près de 150 variétés de colza d'hiver sont commercialisées en France. En 2009, 4 hybrides restaurés et 8 lignées ont tenu les 12 premières places. Monsanto a occupé 43 % du marché français des semences de colza, Advanta 14.5 %, Momont 11.5 %, Syngenta 8.5 % et Euralis 7.5 %.

Le tournesol, *Helianthus annuus*, (sunflower en anglais) est une composée annuelle diploïde, dont les capitules rassemblent en leur centre des fleurs hermaphrodites. Son métabolisme photosynthétique est en C3. Domestiqué dans l'Est des Etats-Unis, le tournesol a connu une première sélection active comme plante de grande culture en Russie au 18^{ème} siècle.

Le tournesol est une plante allogame et sa fécondation est entomophile. Les tournesols cultivés en France et dans de nombreux pays sont des variétés hybrides, issues de la fécondation de lignées à stérilité mâle cytoplasmique et de lignées à fonction de restaurateur. En France, le tournesol est semé au printemps et récolté à l'automne.

Plus de 230 variétés de tournesol, de précocité variable sont commercialisées en France dont plus de 45 variétés "oléiques". 5 entreprises dominent le marché de la semence : Syngenta seeds (NK et sélection Dekalb de tournesol rachetée en 2009 au groupe Monsanto) avec un total de 46 % de parts de marché en 2009, Euralis-Semences 16 %, Pioneer semences (groupe DuPont) 15 %, Limagrain 10.5 %, etc.

Le soja, *Glycine max* (soybean en anglais) est une fabacée (= papilionacée) diploïde, originaire du Nord de la Chine. C'est une plante autogame et les variétés cultivées sont des lignées pures. La majorité du soja cultivé dans le monde est transgénique, l'introduction de résistances à des désherbants non sélectifs ayant permis d'étendre considérablement son aire de culture dans certains pays et de pratiquer des cultures sans labour sur des sols fragiles. La recherche variétale sur le soja reste très concentrée aux Etats-Unis et les travaux de sélection propres à l'Europe sont limités (*45 variétés de soja sont cependant commercialisées en France*).

Le palmier à huile, *Elaeis guineensis*, est une arécacée pérenne, cultivée pour son fruit dont la pulpe fournit l'huile de palme (palm oil) et l'amande l'huile de palmiste, de compositions en acides gras différentes (cf. II.3.2). C'est une espèce diploïde, monoïque et allogame, originaire de l'Ouest de l'Afrique, du Sénégal jusqu'à l'Angola. Son introduction en Asie du Sud Est ne date que du 19^{ème} siècle.

Le cocotier, *Cocos nucifera* (coconut tree) est une autre arécacée pérenne, probablement originaire d'Asie du Sud Est et cultivée dans toute la zone tropicale humide, surtout le long des côtes. C'est une espèce monoïque et préférentiellement allogame.

Le ricin, *Ricinus communis* (castorbean, en anglais) est une euphorbiacée (comme le manioc et l'hévéa). Son origine géographique reste controversée car on rencontre l'espèce de façon spontanée dans toutes les régions tropicales du monde. Les différences entre formes sauvages et cultivées sont faibles. La diversité génétique maximale s'observe toutefois en Afrique de l'Est et en Inde. Diploïde et monoïque, le ricin est préférentiellement allogame et présente des formes annuelles et pérennes.

II.3.2 – COMPOSITION DES RECOLTES

Colza

La graine de colza est petite. Elle comprend une enveloppe très dure, difficile à broyer et une amande dans laquelle les cotylédons constituent les organes de réserve, riches en protéines et en huile.

La composition de la graine de colza a été profondément modifiée par sélection classique ces 40 dernières années. L'huile des variétés anciennes de colza était riche en acide érucique (en C22), accusé de pouvoir causer des troubles vasculaires. De plus, leur tourteau contenait de nombreux composés soufrés, les glucosinolates, qui entraînent des troubles de croissance chez les animaux monogastriques (porcs et volailles). Des variétés dite "simple zéro" à très faible teneur en acide érucique ont été produites, puis des variétés "double-zéro" ou "00" ont été sélectionnées qui ne contenaient plus que très peu de glucosinolates. Elles se sont généralisées sur le marché depuis de nombreuses années. Les Canadiens ont rebaptisé ces colzas 00, "canola".

Parallèlement à la sélection des 00, des variétés très riches en acide érucique mais pauvres en glucosinolates ont été développées pour des marchés spécifiques. Plus récemment, des premiers colzas très riches en acide oléique ont été développés. Notons aussi que des colzas génétiquement modifiés, riches en acide laurique ont été développés, aux USA dans les années 90. Ils ne semblent pas avoir fait l'objet de culture à grande échelle.

Il existe 2 variétés de colza riche en acide érucique commercialisées sur le marché français (Obtenteur : Semences de France) mais aussi une variété riche en acide oléique (Dekalb-Monsanto).

Composition de la graine et du tourteau de colza

Teneurs en % du brut	Graine de colza	Tourteau de colza	Tourteau de soja 48 (en comparatif)
Humidité	7.8	11.3	12.2
Protéines brutes	19.1	33.7	45.3
Lysine	1.19	1.8	2,8
Cellulose brute	8.2	12.4	6
NDF*	17.6	28.3	12.2
Matières grasses	42.0	2.3	1.9
Cendres brutes	4	7.0	6.4
Amidon	0	0	0

Source : tables INRA de composition et de valeur nutritive des matières premières

*: le NDF (Neutral Detergent Fiber) est un paramètre classique de mesure du taux de fibres (lignine + cellulose + hémicelluloses + une partie des pectines)

L'huile de colza double zéro (canola) est considérée avant tout par l'industrie comme une source d'acide oléique, ce qui justifie l'intérêt pour les colzas oléiques, très riches en cet acide gras et apparaissant sur le marché des semences depuis 2006.

En revanche, dans les utilisations en alimentation humaine de l'huile de colza, c'est sa teneur en acide linoléique qui est largement mise en avant pour les qualités diététiques qu'elle lui confère.

Teneurs en acides gras du colza et d'autres huiles végétales (%)

Acides gras	Type	Colza		Tournesol		Soja	Coco coprah	Palme		Ricin
		0:0	oléique	classique	oléique			palmiste	palme	
caprylique	C8:0	-	-	-	-	-	6 – 10	2-5	-	-
caprique	C10:0	-	-	-	-	-	6 – 10	3-5	-	-
laurique	C12:0	-	-	-	-	-	39- 54	44-51	traces	-
myristique	C14:0	0 - 1	-	-	-	traces	15- 23	15-17	1 – 2	-
palmitique	C16:0	1 - 5	3	5 – 7	4	8 – 13	6 – 11	7-10	43– 46	0.5-1
stéarique	C18:0	0.5 – 2	1	4 – 6	5	2 – 5	1 – 4	2-3	4 – 6	0.5-1
oléique	C18:1	50– 65	16	15 - 25	>(75) 80	17- 26	4 – 11	11-18	37- 41	2-6
ricinoléique	C18:1	-	-	-	-	-	-	-	-	85-95
linoléique	C18:2	15- 30	14	62 - 70	8 (< 10)	50- 62	1 – 2	1-4	9 – 12	1-5
linoléique	C18:3	6 – 13	10	< 0.2	< 1	4 – 10	traces	traces	traces	0.5-1
eicosénoïque	C20:1	1 – 3	6	< 0.5	-	< 0.4	-	-	-	-
béthénique	C22:0	0.5	-	< 1	-	< 0.5	-	-	-	-
oléique	C22:1	0 – 5	> 45 (50)	-	-	-	-	-	-	-

Source : Karleskind 1992, F. Gunstone, *The chemistry of oils and fats*, 2004.

Le tournesol

La graine de tournesol comprend des enveloppes fibreuses, riches en cellulose et une amande contenant de l'huile et des protéines (les tissus de réserves sont les cotylédons).

Le tourteau de tournesol produit en France est généralement non décortiqué. Il est riche en fibres et moins concentré en protéines et lysine que celui de soja. Le tourteau de tournesol décortiqué est plus riche en protéines. Une seule usine de trituration en produit en France (à Lezoux, en Auvergne). Les tourteaux d'importation argentins ou d'Europe de l'Est sont, pour leur part, le plus souvent décortiqués.

Composition de la graine et du tourteau de tournesol

Teneurs en % du brut	Graine de tournesol	Tourteau de tournesol		Tourteau de soja 48 (en comparatif)
		non décortiqué	décortiqué	
Humidité	7	11.3	10.3	12.2
Protéines brutes	16	27.7	33.4	45.3
Lysine	0,6	1	1,2	2,8
Cellulose brute	15.5	25.5	21.2	6
NDF*	28.8	41.1	35.9	12.2
Matières grasses	44.6	2	1.7	1.9
Cendres brutes	3.4	6.2	6.7	6.4
Amidon	0	0	0	0

Source : tables INRA de composition et de valeur nutritive des matières premières

*: le NDF (Neutral Detergent Fiber) est un paramètre classique de mesure du taux de fibres (lignine + cellulose + hémicelluloses + une partie des pectines)

La teneur en acides gras de l'huile de tournesol diffère suivant les variétés :

- L'huile de **tournesol "classique"** est avant tout riche en acide linoléique C18:2, double-insaturé, et ne renferme qu'environ 20 % d'acide oléique et seulement des traces d'acide linoléique en C18:3.
- L'huile des variétés de tournesol inscrites comme "**oléiques**" renferme au moins 75 % d'acide oléique C18:1. Cependant, la teneur généralement retenue dans les contrats de production est de 82 % ou plus, avec des systèmes de bonus malus. Certaines variétés récentes atteignent 90 % d'acide oléique. *La production de tournesol oléique a une histoire ancienne mais elle était pratiquement inexistante en France avant les années 2000. Depuis 2007, les variétés oléiques représentent 50 à 60 % des surfaces. Elles sont demandées pour les applications industrielles de l'huile, dans l'agroalimentaire comme pour la production de biodiesel. Des bonus de 8 à 15 €/t garantissent l'attractivité de sa production.*
- L'huile de tournesol "**linoléique**", pour sa part, renferme plus de 72 % d'acide linoléique.

Le soja est une plante cultivée avant tout pour son tourteau, riche en protéines et destiné à l'alimentation animale, l'huile étant le coproduit. La graine de soja contient en effet 35 % de protéines (en brut) avec seulement 18 % d'huile et le tourteau peut dépasser 45 % de protéines (en brut). L'huile de soja a une composition similaire à celle de l'huile de tournesol "classique". Elle est donc riche en acides linoléique et oléique.

Les huiles de coprah (coco), de palmiste (amande du palmier à huile) et, dans une moindre mesure, de palme sont des sources d'acides gras dits "à chaînes courtes", ce qui justifie l'importation de ces matières premières depuis les régions tropicales pour les applications concernées.

La graine de **ricin** a une teneur élevée en huile, pouvant atteindre 55 à 60 % et plus. Sa composition est très particulière, **l'acide ricinoléique** représentant environ 90 % des acides gras. C'est une molécule en C18 à laquelle la fonction alcool en C12 et la double liaison confèrent des propriétés et des applications particulières. Les autres acides gras de l'huile de ricin sont principalement en C18 (acides linoléique et oléique). La graine de ricin contient des protéines très toxiques ou allergéniques (ricine, ricinine) et l'usage de ses coproduits (tourteaux) nécessite des précautions particulières.

II.3.3 – IMPORTANCE AGRICOLE ET PRINCIPAUX PAYS PRODUCTEURS

Le tableau de la page suivante présente les productions, surfaces et rendements en colza, tournesol et soja des principaux pays producteurs en 2008.

II.3.1.1 - LE CLASSEMENT DES PAYS PRODUCTEURS

Les premiers producteurs de colza sont l'Union Européenne, le Canada et la Chine. La France est le deuxième producteur en Europe derrière l'Allemagne.

La Russie est le premier producteur de tournesol, devant l'Union Européenne, l'Ukraine et l'Argentine. En Europe, la France devance la Hongrie, la Bulgarie et la Roumanie.

La production mondiale de soja (231 millions de tonnes) est beaucoup plus importante que celles de colza et de tournesol (respectivement de 58 et 37 millions de tonnes). Elle est concentrée aux Etats-Unis, Brésil, Argentine et, dans une moindre mesure, en Chine. L'Union Européenne est une très petite région productrice, dominée par l'Italie (346 000 t).

Principaux pays producteurs de colza, tournesol et soja en 2008

	Production (millions t)			Surfaces (millions d'ha)			Rendement (qx/ha)		
	colza	tournesol	soja	colza	tournesol	soja	colza	tournesol	soja
Canada	12.6	0.11	3.3	6.5	0.07	1.2	19.5	16.3	27.9
Chine	12.1	1.85	15.5	6.6	1.04	9.1	18.4	17.8	17.0
Inde	5.83	1.11	9.0	5.8	2.05	9.6	10.1	0.5	9.4
Allemagne	5.15	0.05	-	1.37	0.0	-	37.6	19.6	-
France	4.72	1.61	0.06	1.42	0.63	0.02	33.2	25.5	29.0
Ukraine	2.87	6.53	0.8	1.38	4.28	0.54	20.8	15.2	15.1
Pologne	2.1	-	-	0.77	-	-	27.3	-	-
Royaume Uni	1.73	-	-	-	-	-	33.0	-	-
Australie	1.62	0.07	-	1.17	0.0	-	13.9	15.2	-
Russie	0.75	7.35	0.8	0.62	5.98	0.7	12.5	12.3	10.5
Etats Unis	0.66	1.55	80.5	0.47	0.97	30.2	14.0	16.0	26.7
Brésil	0.17	0.15	59.9	0.1	0.11	21.3	17.0	13.4	28.2
Roumanie	0.67	1.17	0.1	0.36	0.81	0.05	18.8	14.5	19.7
Hongrie	0.65	1.47	0.07	0.25	0.55	-	26.6	26.7	25.6
Bulgarie	0.23	1.30	-	0.09	0.72	-	26.4	18.0	-
Paraguay	0.06	0.2	6.8	0.06	0.12	2.6	14.5	16.7	25.7
Argentine	0.02	4.65	46.2	0.01	2.58	16.4	16.1	18.0	28.2
<i>Total UE</i>	<i>18.92</i>	<i>7.10</i>	<i>0.65</i>	<i>6.13</i>	<i>3.74</i>	<i>0.23</i>	<i>30.9</i>	<i>19.0</i>	<i>27.7</i>
Total Monde	57.86	36.64	231	30.3	25.02	96.9	19.1	14.2	23.8

Source : FAO. Les données ont été triées en fonction des productions décroissantes en colza des différents pays. Les données FAO additionnent les résultats des cultures d'hiver et de printemps pour le colza et peuvent donc différer de données nationales présentées séparément.

Les principaux producteurs d'huile de palme sont l'Indonésie (19.2 Mt) et la Malaisie (17.7 Mt), suivies de beaucoup plus loin par le Nigeria, la Thaïlande, la Colombie etc. pour un total mondial de 42.4 Mt en 2008, en forte progression depuis 2000 (21.8 Mt). La majorité, soit 34 Mt, est exportée dont 15.4 Mt depuis la Malaisie et 14.6 Mt depuis l'Indonésie. Les principaux pays importateurs sont l'Inde (5.7 Mt), la Chine (5.6 Mt) et l'Union Européenne (5.5 Mt). Par comparaison, entre 2000 à 2008, la production mondiale d'huile de palmiste a évolué de 2.7 à 4.9 Mt, les exportations atteignant 2.7 Mt depuis l'Indonésie (1.3 Mt) et la Malaisie (1 Mt), etc. vers l'Union Européenne (0.7 Mt), la Chine (0.3 Mt), les USA (0.3 Mt), etc. (Source : Fediol – Oil World).

Les premiers producteurs d'huile de coco (= d'huile de coprah) sont les Philippines (1.2 Mt), l'Indonésie (0.8 Mt), l'Inde (0.4 Mt) et le Mexique (0.1 Mt) pour un total mondial de 3.2 Mt en 2008, stabilisé entre 3 et 3.5 millions de tonnes depuis 10 ans. Les premiers exportateurs sont les Philippines (0.8 Mt) et l'Indonésie (0.6 Mt) alors que les grands importateurs sont l'Union Européenne et les USA (0.5 Mt) En 2008, l'Union Européenne a consommé, 677 000 t d'huile de coco, l'Allemagne (205 Kt) et les Pays Bas (152 Kt) étant les premiers utilisateurs. (Source : Fediol – Oil World).

Les principaux pays producteurs de graines de ricin sont l'Inde (1120 000 t), la Chine (220 000 t) et le Brésil (120 000 t). La production mondiale d'huile de ricin est relativement stable, oscillant entre 400 et 600 000 tonnes par an.

L'Union Européenne a consommé, en 2008, 131 000 t d'huile de ricin, la France étant le plus gros utilisateur (46 Kt), devant l'Allemagne (39 Kt) et l'Italie (18 Kt).

(Source : Fediol – Oil World).

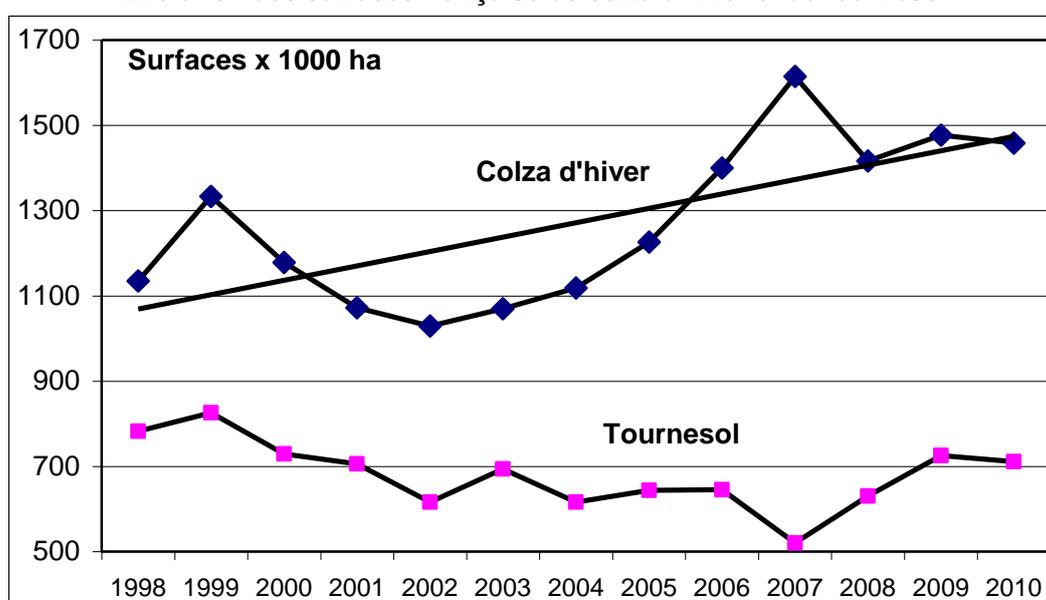
II.3.1.2 - LES EVOLUTIONS DES CULTURES OLEAGINEUSES SUR LE TERRITOIRE FRANÇAIS

Les surfaces de colza d'hiver sont en progression, en raison notamment de la demande créée par le développement du biodiesel.

Celles de tournesol stagnent alors que la proportion des surfaces consacrées au tournesol oléique oscille désormais entre 50 et 60 % du total. Les rendements étant similaires, le tournesol oléique est favorisé par les primes à l'achat qu'offrent les industriels utilisateurs dans leurs contrats.

Les surfaces de soja avaient dépassé les 120 000 ha en 1990 puis à nouveau en 2001, avant de diminuer régulièrement jusqu'à 26-29 000 hectares ces dernières années, cette espèce devenant ainsi une culture marginale dans notre pays.

Evolution des surfaces française de colza d'hiver et de tournesol

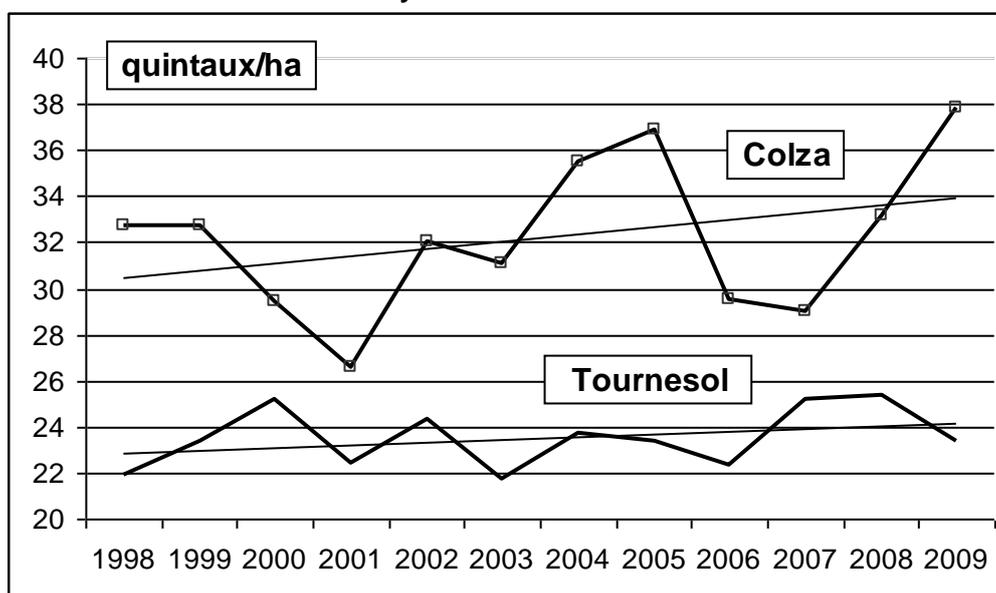


Source : Agreste – Semences et Progrès

Le rendement moyen du colza d'hiver en France affiche une tendance générale à la hausse. Il a atteint un record en 2009 : 37.7 quintaux par hectare, portant la production nationale à 5.6

millions de tonnes sur 1.47 millions d'ha. Des rendements de 40 à 45 q/ha ont été obtenus au Nord de la Seine. En 2010, on s'attend à récolter 1.46 millions d'hectares.

Evolution des rendements moyens du colza d'hiver et du tournesol en France



Source : Agreste – Semences et Progrès

Les rendements du tournesol ne connaissent pas d'évolution marquée oscillant entre 20 et 25 qx/ha dans nos régions.

II.3.4 – DESCRIPTION DES FILIERES HUILES VEGETALES

II.3.4.1 - SCHEMA GENERAL (voir schéma en annexe des filières colza et tournesol)

Le colza et le tournesol sont des cultures oléagineuses et leur filière a pour principaux produits l'huile et ses dérivés ainsi que des tourteaux pour l'alimentation animale. Le biodiesel reste le premier débouché non alimentaire de la filière.

Le schéma présenté en annexe introduit les grandes familles de produits qui peuvent être obtenus à partir du colza et du tournesol. On y retrouvera :

(1) en amont, **les coproduits de l'huile**. Ce sont :

- **Les pailles** ou chaumes d'oléagineux restent le plus souvent au champ et sont enfouies. Les pailles de colza sont particulièrement dures à broyer et elles ne font pas l'objet de programmes particuliers de valorisation (combustible, biocarburants de seconde génération) comme celles de céréales.
- **Le tourteau**, utilisé en alimentation du bétail et contribuant ainsi à l'autonomie protéique de la France ou de l'Europe, qui reste largement importatrice de tourteaux de soja du continent américain. Les protéines de tournesol, extraites du tourteau, peuvent avoir d'autres applications.
- **Les coproduits du raffinage de l'huile** sont des molécules diverses. L'huile de colza commercialisée auprès de l'industrie est le plus généralement semi raffinée (elle subit

seulement une démulcination et une neutralisation). Les huiles raffinées, commercialisées après une décoloration et une désodorisation, sont destinées aux usages alimentaires.

(2) **les esters méthyliques** constituent les principaux produits non alimentaires de la filière. Utilisés comme **biodiesel**, ils sont aussi valorisés tels quels dans des **biolubrifiants** et comme **solvants**. Hydrogénés, ces esters permettent l'obtention **d'alcools gras** dont les applications sont liées à leurs propriétés tensioactives. La production massive d'esters méthyliques d'huiles de colza et de tournesol fait de cette famille de molécules une nouvelle plateforme de l'oléochimie.

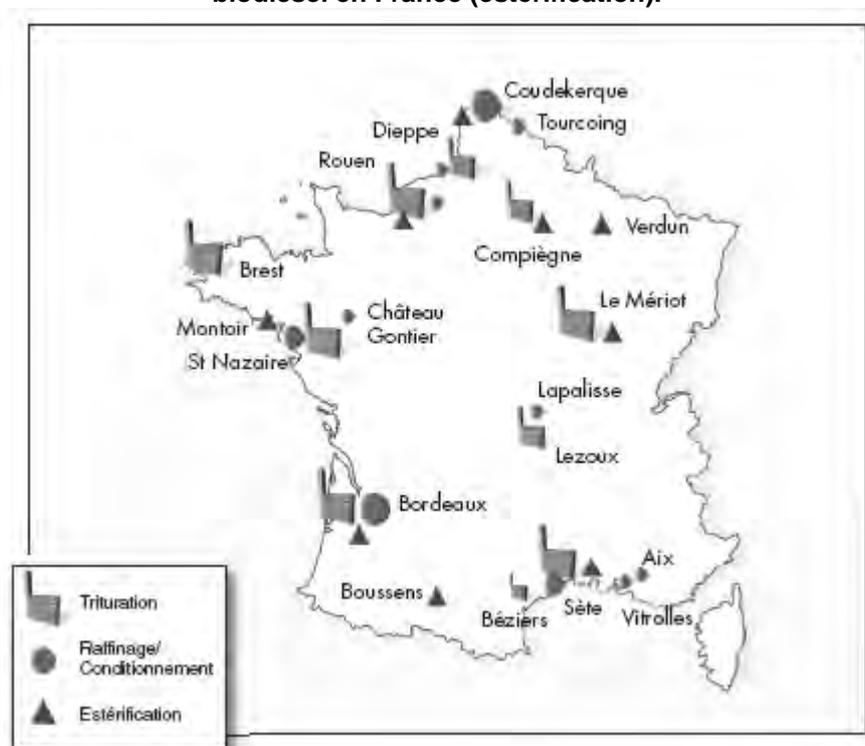
(3) **le glycérol** est le coproduit de la fabrication des esters méthyliques. Ses applications et celles de ses dérivés sont anciennes et nombreuses. Le glycérol est une molécule plateforme et certains intermédiaires chimiques qui en sont issus commencent à être produits à l'échelle industrielle (épichlorhydrine, monopropylène glycol). D'autres projets sont en cours de développement (1,3 propanediol, acide acrylique, etc.).

(4) **d'autres produits issus de la transformation ou de l'utilisation directe de l'huile** comme les résines alkydes, les esters éthyliques mais aussi divers dérivés des acides gras offrant de nouvelles perspectives. Les huiles de colza et de tournesol oléique non transformées ont leurs propres applications comme biolubrifiants.

II.3.4.2 - INDUSTRIES CONCERNEES

Les triturateurs sont les industriels spécialisés dans l'extraction de l'huile à partir de la graine. Le secteur est très concentré en France. **Saipol** dont l'actionnaire principal est **Sofiprotéol** se partage le marché avec la filiale française de la société nord-américaine **Cargill**.

Sites de trituration de graines oléagineuses, de raffinage des huiles et de production de biodiesel en France (estérification).



Source : SOFIPROTEOL

Ailleurs dans le monde, hormis **Cargill**, on peut citer parmi les grands acteurs de la trituration les américains **Bunge** et **ADM** (Archer Daniels Midland)

Des chimistes spécialisés transforment les huiles.

Diester Industrie, filiale à 66 % de Sofiprotéol est le premier producteur de bio diesel et d'esters méthyliques en Europe. **Oleon** (ex **Petrofina**) et **Novance** sont les deux filiales d'oléochimie de Sofiprotéol.

Les autres acteurs de l'oléochimie européenne sont :

- L'allemand **Cognis** (ex Henkel et racheté, en juin 2010, par **BASF**) avec 4 sites en France. A Boussens (31), Cognis produit 60 Kt d'alcools gras, des esters éthyliques, du CLA, des stérols et 110 Kt d'esters méthyliques **Cognis** se dit leader mondial sur le marché des APG (alkylpolyglucosides), fabriqués à partir d'huile de coco et de palme.
- L'anglais **Croda** et sa filiale hollandaise **Uniqema**.
- L'estéricateur **Stéarinerie Dubois**.
- L'italien **Parodi**.
- Le français **Seppic**, filiale d'**Air Liquide**.

Les producteurs de lubrifiants d'origine végétale rassemblent des sociétés de taille variables parmi lesquelles une majorité de PME. On citera **CCL**, **Condat**, **Entreprise Charentaise de Lubrifiants**, **Fuchs Petrolub Ag**, **Igol**, **Motul**, **Novance**, **Panolin**... Les grands acteurs comme **Total** et les autres pétroliers (**Shell**, **Exxon Mobil**...) ont également des biolubrifiants dans leurs gammes.

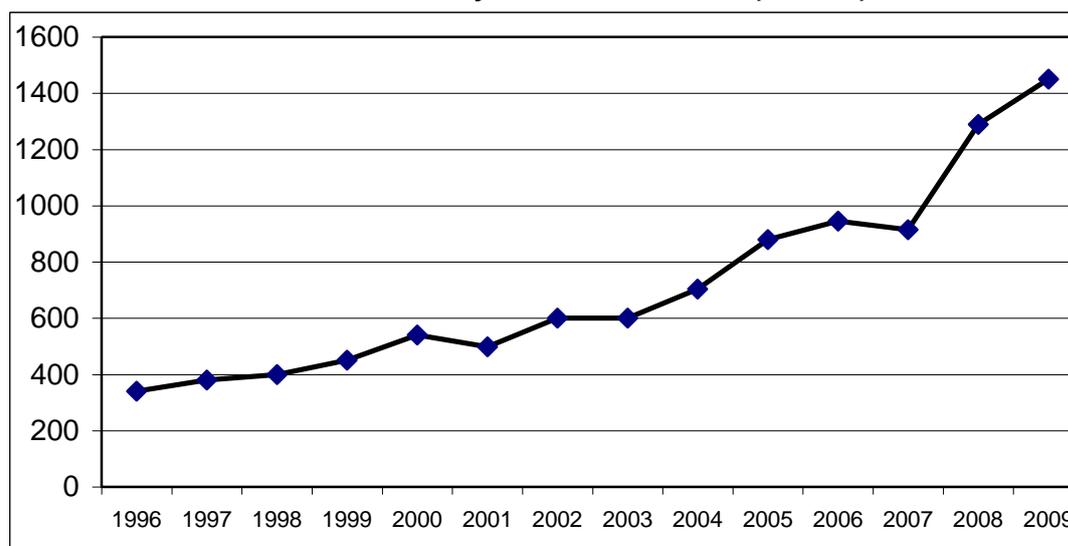
Parmi les producteurs de solvants, on retrouve **Oleon**, **Novance**, **Uniqema-Croda** mais aussi **Cargill**, **Halterman**... Les formulateurs d'encre d'imprimerie sont des sociétés comme **Coates-Lorilleux**, **Sicpa**, **Spici**, **Sun Chemical**, **Trenal**. Les producteurs d'huiles adjuvantes phytosanitaires sont **Bayer**, **Novance**, **Surfagri**...

II.3.4.3 - ECONOMIE DE LA FILIERE

Le colza et le tournesol en France – Données en Kt

	Colza	Tournesol
<i>Production graines 2009</i>	5546	1735
Production graines 2008	4718	1574
Importation graines 2008	589	67
Exportation de graines 2008	2107	279
Trituration de graines 2008	3157	1062
Production d'huile 2008	1289	452
Importation d'huile 2008	393	281
Exportations d'huile 2008	353	273
Consommation apparente d'huile 2008	1329	460
Production de tourteau 2008	1766	513
Importation de tourteau 2008	619	163
Consommation apparente de tourteau 2008	2136	610

Source : Prolea

Production française d'huile de colza (x 1000 t)

Source : Prolea

Quelques ratios de base :**Colza :**

1 ha de colza produit (environ) 35 quintaux de graines.

1 t de graines permet la production de 420 kg d'huile et 560 kg de tourteaux.

1 t d'huile + 0.1 t de méthanol → 1 t d'esters méthyliques + 0.1 t de glycérol

1 ha de colza → 1.47 t d'huile + (1.96 t de tourteaux) → 1.47 t de diester + 0.15 t de glycérol**100 000 t de diester = 68 000 ha de colza & 130 Kt de tourteaux & 10 Kt de glycérol****Tournesol :**

1 ha de tournesol → 24 quintaux de graines

1 t de graines → 430 kg d'huile + 550 kg de tourteaux

1 ha de tournesol → 1 t d'huile + 1.3 t de tourteaux

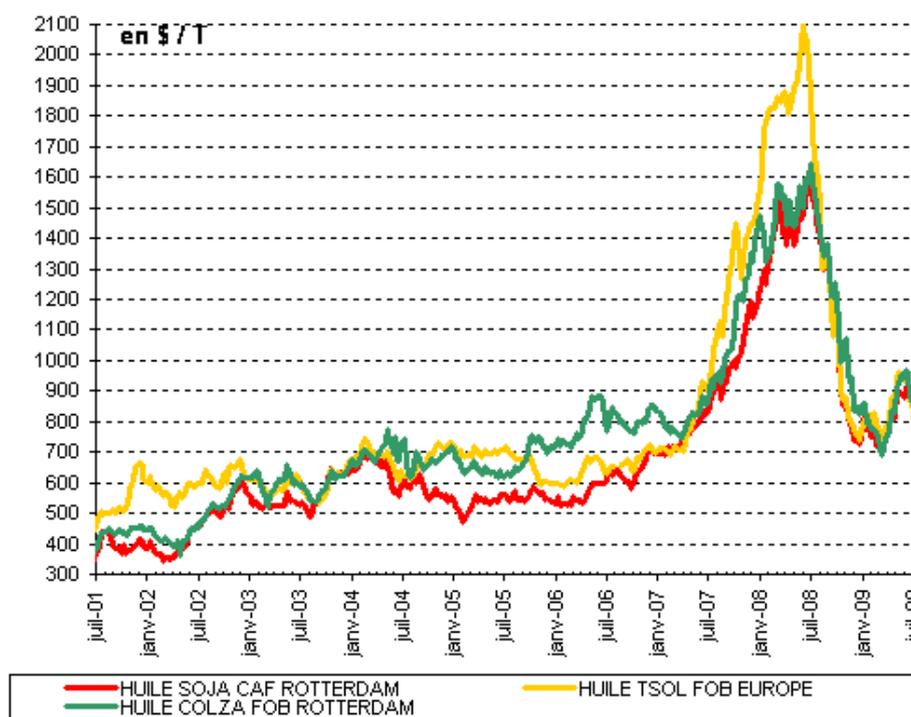
100 000 t d'huile ↔ 100 000 ha de tournesol

100 000 t de diester = 100 000 ha de tournesol oléique (130 Kt de tourteaux, 10 Kt de glycérol)

Les cours des graines de colza et de tournesol ont connu de fortes variations ces dernières années, comme toutes les matières premières agricoles : le prix de la graine de colza rendue Rouen a évolué depuis 2001 entre 190 €/t (début 2005) et 500 €/t début 2008 avec des cours récents dans la fourchette 205-350 €/t. La graine de tournesol a suivi un parcours voisin, avec un cours minimum en dessous de 200 €/t début 2006 et un maximum de près de 640 €/t début 2008. La graine de soja, qui reste la référence, évoluait entre temps (prix CAF Rotterdam) entre 190 €/t (janvier 2005) et 430 €/t (juillet 2008).

Les prix des huiles ont évolué selon des tendances relativement proches, avec également des pics très élevés en 2008.

Evolution récente des prix de différentes huiles végétales en Europe



Source : CETIOM

II.3.5 – LES PRINCIPAUX PRODUITS DES FILIERES HUILES VEGETALES

Les huiles végétales sont constituées majoritairement de triglycérides qui sont des esters d'acides gras et de glycérol. Les principaux dérivés des huiles végétales se rattachent donc à d'un côté à ceux des chaînes grasses, de l'autre à ceux du glycérol.

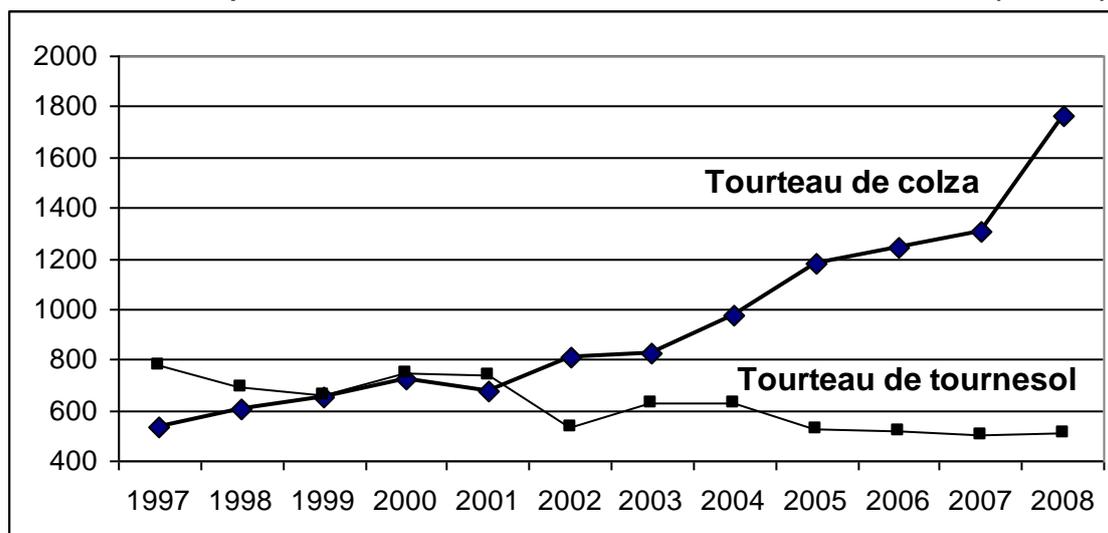
II.3.5.1 - LES COPRODUITS DE L'AMONT DE LA FILIERE

Les tourteaux de colza et de tournesol. Ce sont des matières premières de grande qualité pour l'alimentation animale, riches en protéines (cf. tableaux de composition en II.3.2). Le tourteau de colza présente l'avantage d'être bien équilibré dans sa teneur en Lysine, un acide aminé limitant dans l'alimentation des monogastriques.

Le tourteau de colza est utilisé principalement pour la nutrition des ruminants et des porcs. C'est un bon substitut au tourteau de soja d'importation, dans des rations qui doivent toutefois être moins concentrées. Le développement du biodiesel s'est accompagné d'un accroissement considérable de l'offre en tourteau de colza d'origine nationale et d'une utilisation beaucoup plus large dans les formules d'aliments du bétail, réduisant d'autant notre dépendance protéique vis-à-vis des pays d'Amérique.

Les tourteaux de tournesol sont de deux catégories. Lors de la trituration de la graine entière le tourteau produit est nommé "non décortiqué". Il contient l'ensemble de la coque, riche en fibres cellulosiques. Il est valorisé dans l'alimentation des bovins (capables de digérer la cellulose) mais aussi dans celle des animaux monogastriques nécessitant des fibres dans leur alimentation (truies, lapins, poules pondeuses). Le tourteau de tournesol décortiqué est plus riche en protéines et convient donc à des rations plus concentrées. Il n'est produit en France que sur un seul site, mais il est abondant dans les produits d'importation.

Evolution de la production de tourteaux de colza et de tournesol en France (x 1000 t)



Source : Prolea

Les phospholipides, séparés de l'huile lors des premières étapes du raffinage ont des valorisations comme émulsifiants.

Les phytostérols

100 g d'huile de colza contiennent 850 mg de stérols qui représentent 93.3 % de sa fraction insaponifiable. Ces stérols sont principalement le bêta-sistostérol (45-61 % pour le colza, 58-64 % pour le tournesol), le campestérol (28-40 % pour le colza, 8-11 % pour le tournesol) et le brassicastérol (13-17 % pour le colza).

Les stérols sont classiquement extraits des huiles lors du raffinage (à l'étape de la désodorisation).

Les propriétés des phytostérols sont nombreuses. Ils ont des activités hypercholestérolémiantes mais aussi anti-cancéreuses, anti-virales, anti-inflammatoires... En cosmétique, les stérols sont des agents émulsifiants dont les propriétés sont renforcées sous forme éthoxylée. Ils favorisent la régénération de peau irritée ou brûlée et s'utilisent aussi dans des agents de soin pour leurs propriétés anti-âge.

Les phytostérols sont valorisés en fonction de leur qualité et de leur pureté pour :

- la synthèse de stéroïdes en pharmacie,
- l'alimentaire,
- la cosmétique.

On retrouve des phytostérols concurrents de ceux du colza et du tournesol dans l'huile de soja et dans le tall oil, co-produit de la fabrication de papier à partir de bois résineux.

Les tocophérols, parmi lesquels la vitamine E, sont isolés également lors de l'étape de désodorisation, dans les dernières étapes du raffinage de l'huile.

II.3.5.2 - LES PRODUITS PEU OU PAS TRANSFORMES

Les huiles de tournesol oléique, de colza 00 et érucique ont des applications directes comme **biolubrifiants**. On parle d'HETG (Huiles Environnement Triglycéride). Les performances des huiles non modifiées sont limitées mais se prêtent à certaines lubrifications peu contraignantes en ce qui concerne la température subie, comme celle des chaînes de tronçonneuses. De tels biolubrifiants sont composés d'huile raffinée et d'additifs. Ils ont l'avantage d'être issus de ressources renouvelables, biodégradables et non écotoxiques.

Les huiles de tournesol oléiques résistent mieux à l'échauffement que celles de colza dont la teneur en acide linoléique C18:3 est relativement élevée. L'huile de colza est cependant bien meilleur marché et reste préférée pour toutes les applications peu exigeantes.

Le développement des biolubrifiants en France et en Europe dépend étroitement des incitations ou des obligations environnementales imposées par les pouvoirs publics, particulièrement pour les lubrifiants à usage perdu ou à pertes accidentelles répétitives.

Le marché des lubrifiants européen est d'environ 5 millions de tonnes dont 1200 Kt en Allemagne et 800 Kt en France, parmi lesquelles entre 100 et 200 Kt de lubrification perdue. Le marché européen des lubrifiants biodégradables ne dépassait pas 125 Kt en 2006 mais connaîtrait une croissance régulière de 3-4 % par an. Les parts de marché des biolubrifiants seraient importantes en Allemagne (15 %) et dans les pays scandinaves (11 %), restant faibles en France (1-2 % ?) et en Espagne. Il convient de distinguer les lubrifiants biodégradables d'origine pétrochimique des lubrifiants biodégradables d'origine végétale. En 2005, ces derniers ne représentaient moins de 1000 t en France pour 3500 t de lubrifiants biodégradables d'origine pétrolière.

Aux Etats-Unis, le marché des biolubrifiants d'origine végétale reste très petit (25 Kt en 2008 – *source : United Soybean Board*) mais pourrait croître avec le développement de soja oléique (l'huile de soja standard est trop riche en acide linoléique pour être performante).

L'huile utilisée directement comme carburant dans les moteurs diesel a connu des développements limités. Les risques de casse des moteurs récents sont élevés car ceux-ci ne sont pas adaptés à un carburant trop visqueux. L'huile non transformée offre un bilan carbone beaucoup plus favorable que le biodiesel constitué d'esters méthyliques, à ceci prêt que sa combustion génère des aldéhydes. L'huile carburant doit être raffinée ou au moins démulcinée, ce qui complique largement son traitement "à la ferme".

L'huile de colza a de petites applications dans le domaine des **adjuvants et solvants phytosanitaires** mais ce sont ses esters qui ont le plus de succès dans ce domaine.

II.3.5.3 - LES AUTRES DERIVES DES HUILES DE COLZA ET DE TOURNESOL

Résines alkydes

Des résines alkydes semi siccatives peuvent être obtenues à partir d'huile de tournesol. Elles ont des applications dans les revêtements (peintures, laques, vernis) et les encres. 5 à 10 Kt d'huile de tournesol seraient ainsi utilisés chaque année.

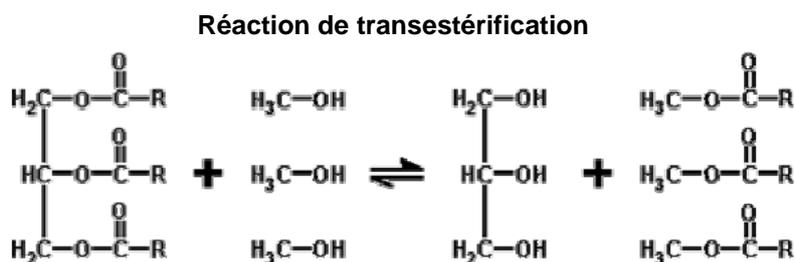
Des résines alkydes non siccatives peuvent être obtenues à partir d'huile de colza et d'acide téréphtalique. Les applications industrielles concernent de petits marchés de vernis ou de peintures appelés à sécher autrement que par oxydation des doubles liaisons des chaînes carbonées.

Polyols et polyuréthanes

L'huile de colza peut être transformée en huile hydroxylée, porteuse de différentes fonctions alcools. Les polyols qui en résultent ont des perspectives dans les polyuréthanes. Différents travaux de recherche ont été publiés sur le sujet mais sans développement industriel à ce jour.

II.3.5.4 - LES ESTERS METHYLIQUES ET LEURS DERIVES

Les esters méthyliques de colza ou de tournesol (oléique) sont souvent nommés EMVH (esters méthyliques d'huile végétale). Ils sont obtenus par transestérification en faisant réagir les triglycérides de l'huile avec du méthanol (qui reste d'origine fossile). Le glycérol est le coproduit de la réaction.



Progrès dans les technologies

Les procédés de production d'esters méthyliques par transestérification ont connu des évolutions importantes et des améliorations sensibles de leur efficacité. Le procédé conventionnel est la catalyse homogène en milieu basique. Le procédé de catalyse hétérogène en continu permet, pour sa part, un meilleur respect de l'environnement car ses rendements de synthèse sont plus élevés. Les purifications sont ainsi facilitées et les rejets polluants sont diminués. Il est mis en œuvre avec succès à l'usine de production de biodiesel de **Diester** de Sète. La glycérine obtenue est très pure.

Le biodiesel

C'est l'application phare des esters méthyliques de colza et de tournesol oléique. Les esters méthyliques de l'huile de tournesol "classique" ne se prêtent pas à la production de biodiesel, du fait de leur trop grande richesse en acide linoléique. Les EMVH ont des propriétés très proches du gazole et sont donc tout à fait adaptés à être mélangés avec celui-ci. L'addition d'EMVH de tournesol oléique à des EMVH de colza permet de réduire l'indice d'iode du mélange, ce qui intéresse les formulateurs de carburants.

Les EMVH peuvent être ainsi intégrés dans les circuits de distribution traditionnels. Les esters méthyliques de colza ont en outre les avantages suivants :

- meilleures capacités lubrifiantes, permettant de réduire plus facilement la teneur en soufre des carburants diesels, en conformité avec les nouvelles normes.
- propriétés naturelles d'anti-usure, liée à la fonction ester,
- inodores, non toxiques, biodégradables à plus de 98 % en 21 jours,
- réduisant la production de particules.

Leur inconvénient est une moindre stabilité thermique, d'autant plus que les acides gras utilisés comportent des doubles liaisons.

Comparaison des caractéristiques du gazole et des EMVH de colza

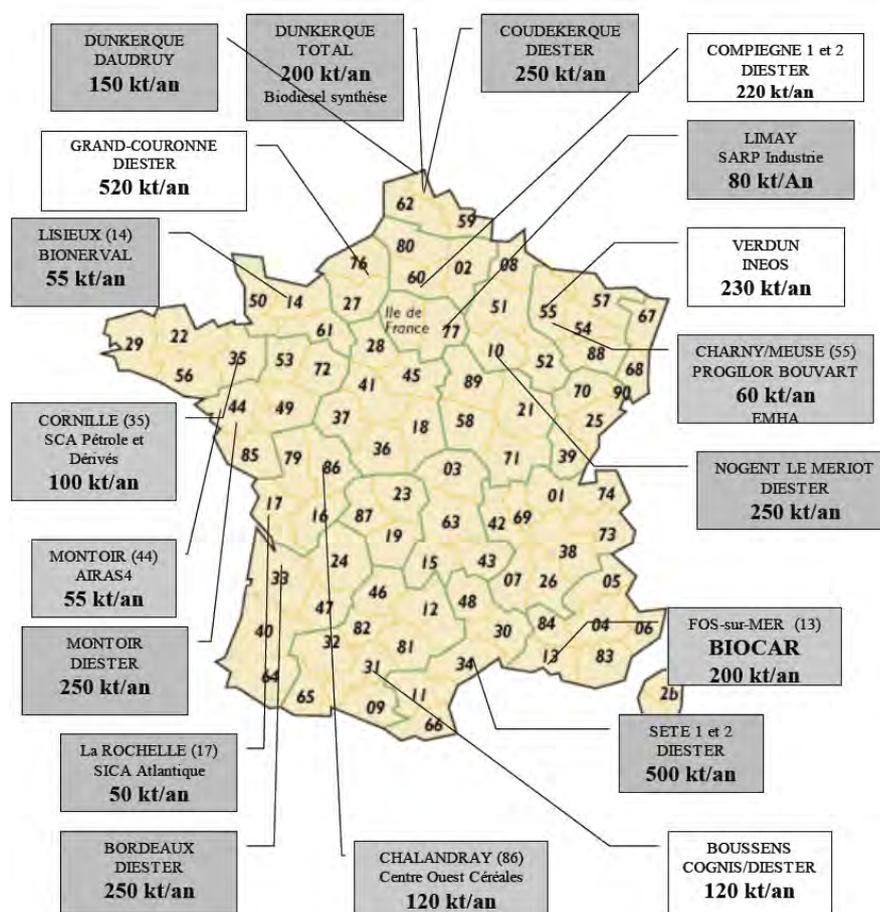
Caractéristiques	Gazole	Esters méthyliques de colza
Masse volumique (kg/m ³ , à 15°C)	820-845	880-885
Viscosité à 40°C (mm ² /s)	2-4,5	4,5
Point éclair (°C) (température à partir de laquelle les vapeurs dégagées sont inflammables)	> 55 °C	188 °C
Point de trouble (°C)	< -5	-3
CFPP (°C) (Cold Filter Plugging Point, température à laquelle le produit se fige dans les filtres)	< -15 °C	-12 °C
PCI (KJ/kg) (quantité de chaleur dégagée par la combustion)	42 300	37 040
Indice de cétane (aptitude à l'auto inflammation)	51	49-51
Teneur en soufre (mg/kg)	350	10-2

Source : Prolea

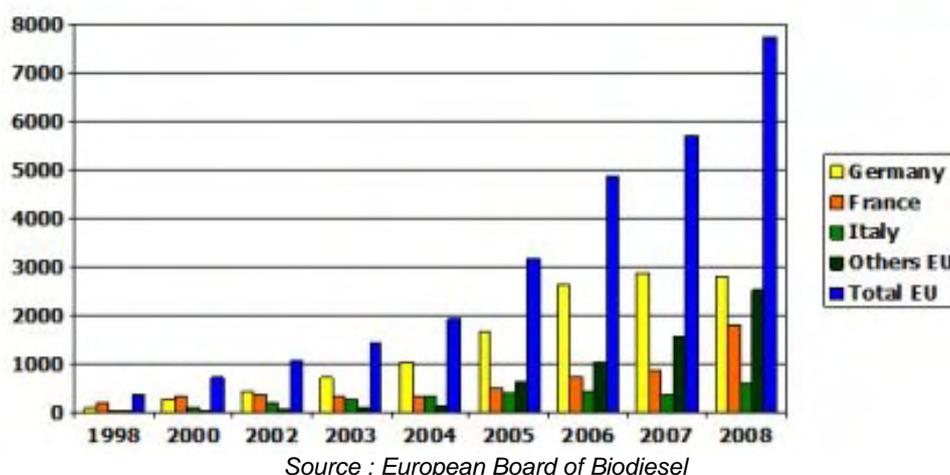
En France, les EMVH de colza et de tournesol oléique sont utilisés en mélange avec le gazole dans des proportions variables, allant de quelques % jusqu'à 7 % dans le gazole courant et de 30 % pour le carburant de flottes captives, l'objectif général étant de 5.75 %. L'utilisation pure est possible mais nécessiterait des aménagements techniques au niveau des moteurs.

La production du biodiesel français est régulée selon l'attribution de quotas à des industriels. D'autres systèmes d'incitation sont en vigueur dans d'autres pays. La carte présentée ci-dessous intègre des industriels produisant du biodiesel à partir d'autres matières premières que les huiles végétales.

Production de biodiesel en France : sites, acteurs et capacités

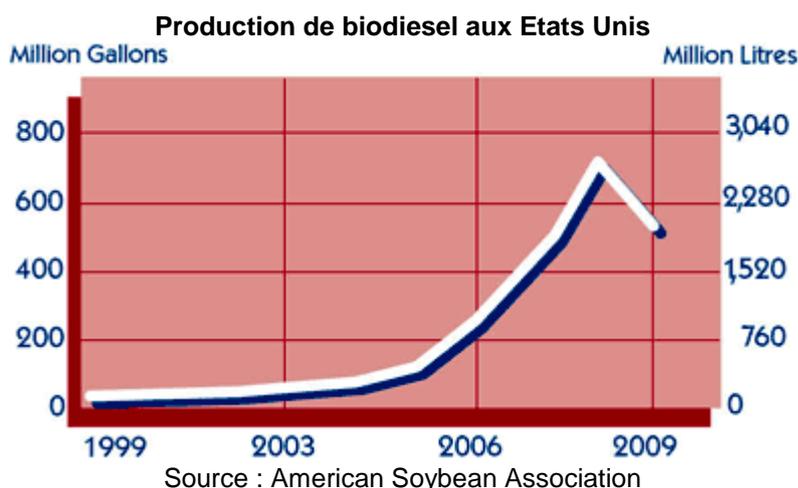


Evolution de la production de biodiesel en Europe
EU and Member States' Biodiesel Production ('000 t)
 Source: EBB



A l'échelle mondiale, la production de biodiesel augmente rapidement. Selon l'agence internationale de l'énergie (AIE = IAE) en 2009, la production aurait été multipliée par 10 lors des 8 années précédentes, atteignant 10.9 milliards de litres (9.6 Mt) en 2008 et pourrait doubler encore de 2009 à 2012. En 2010, les projections prévoyaient plus de 15 Mt de production. L'Europe domine encore le paysage avec du biodiesel issu d'huiles de colza et de tournesol. Sur le continent américain, l'huile de soja est la plus utilisée alors que c'est l'huile de palme – produite durablement ou non – qui sert de matière première au biodiesel du sud est asiatique.

Aux USA, la production a été stimulée par les importations de l'Union Européenne jusqu'à la prise de mesures anti-dumping qui ont entraîné l'effondrement des achats. La production des USA aurait atteint de 2.7 milliards de litres (2.3 Mt) en 2008 avant de chuter fortement en 2009, la tendance étant peu favorable pour 2010. Il y aurait 180 usines de production de biodiesel aux USA, travaillant à 15 % de leurs capacités.



Il y a une douzaine d'usine de fabrication de biodiesel au **Canada** (valorisant du colza) pour une capacité de production qui atteindra 550 millions de litres (450 000 tonnes) lors du démarrage d'une nouvelle unité de 225 millions de litres, en construction dans l'Ouest du pays.

Le Brésil compte dès maintenant 43 usines de biodiesel avec une capacité de production globale de 3.9 milliards de litres et une production effective de 2.4 milliards de litres (2.1 millions de tonnes) est attendue dès 2010. Le gouvernement fixe depuis 2008 un taux d'incorporation de biodiesel dans les carburants diesel et a décidé début 2010 de le faire passer de 4 à 5 %

L'Argentine est devenue un important producteur de biodiesel avec une capacité de production de 2.4 millions de tonnes de biodiesel, un marché intérieur très restreint et donc un fort potentiel d'exportation tant vers ses voisins (Brésil) que vers l'Europe.

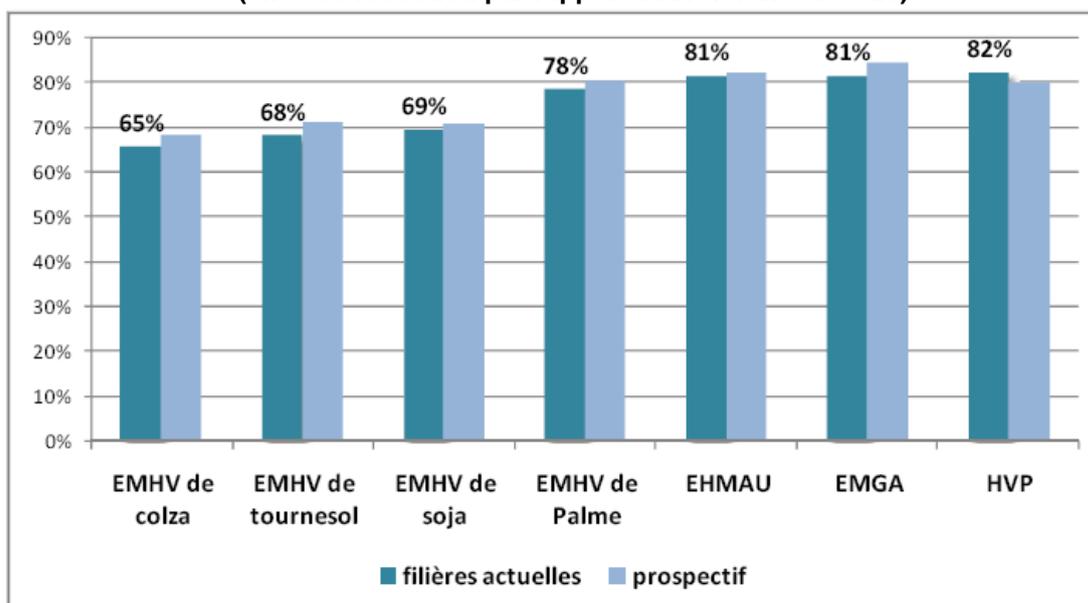
En Malaisie, et dans les autres pays gros producteurs d'huile de palme d'Asie du Sud Est (Indonésie, Philippines), les projets d'usines de biodiesel sont nombreux et dépassent le million de tonnes.

Ecobilan du biodiesel

Les écobilans des biocarburants ont fait l'objet de nombreuses études mais aussi de controverses sur des questions méthodologiques. La démarche d'analyse du cycle de vie est déjà complexe quand on étudie un produit pour un seul paramètre (bilan énergétique ou bilan CO₂) car le mode de prise en compte des coproduits est sujet à discussion. Les modèles d'analyses récents prennent en considération une multitude de critères. A vouloir tester tant les vertus et les faiblesses des biocarburants de 1^{ère} génération, on en oublie parfois leur rôle fondamental dans le développement de filières de substitution aux carburants fossiles et dans la réduction de notre dépendance énergétique vis-à-vis de pays tiers. On n'est pas tant regardant sur l'hétérogénéité des écobilans des différentes filières fossiles suivant la nature et le mode d'exploitation des gisements pétroliers. Notons également qu'il n'y a pas de marée noire de biocarburants et que les esters méthyliques d'huiles végétales sont, au contraire, des solvants biodégradables remarquables pour contribuer à nettoyer les zones souillées par les hydrocarbures sur le littoral.

A l'issue d'un important travail méthodologique, une étude sur l'analyse du cycle de vie de nombreux biocarburants a été réalisée pour l'ADEME par BIO Intelligence Service. Elle montre notamment le bon rendement énergétique des esters méthyliques d'huiles végétales, y compris dans les systèmes intensifs européens.

Réduction de la consommation d'énergie non renouvelable de différents biodiesels (en % de réduction par rapport à la référence fossile)



Source : étude ADEME / BIO Intelligence Service - "ACV des biocarburants de 1^{ère} génération en France", février 2010.

EHMAU = Esters d'huiles usagées, EMGA = Esters de graisses animales, HVP : huile végétale pure

L'interprofession française des oléagineux a engagé en 2007 une démarche de progrès pour améliorer le bilan énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'ensemble de la filière de production du biodiesel. De nombreuses améliorations sont possibles principalement au niveau agricole, mais également en ce qui concerne certaines opérations industrielles. La démarche se poursuit.

Les autres applications des esters méthyliques de colza ou de tournesol

Les esters méthyliques de colza ou de tournesol sont valorisés en l'état comme :

- **Solvants pour encres d'imprimerie**, non volatils et non toxiques. La cible particulière pour les esters méthyliques concerne les encres offset quickset dont le séchage s'assure tant par infiltration dans le support que par oxydo-polymérisation. Le véhicule de ces encres est traditionnellement composé de résine dure de colophane et d'un mélange d'huiles minérales, d'huiles végétales et de résines alkydes. Les esters de colza ou soja peuvent se substituer aux huiles minérales. Ils permettent de solubiliser les résines en conservant la viscosité nécessaire. Ils gardent l'inconvénient de filtrer lentement dans le support, de ne pas permettre une fixation et un séchage optimisés, et d'être chers.
- **Adjuvants ou solvants phytosanitaires** Ils viennent remplacer des solvants aromatiques d'origine pétrochimique. Les EMVH offrent de bonnes propriétés et sont biodégradables.
- **Solvants pour nettoyage de surface**. Ces applications sont en phase de développement technique et commercial.
- **Biolubrifiants**. Les esters méthyliques de colza peuvent être utilisés dans les huiles de coupe, pour le travail du métal, en remplacement des esters méthyliques de suif. Il s'agit d'un potentiel, qui n'est pas encore exploité. Les esters méthyliques de colza peuvent être utilisés dans d'autres applications de lubrification, soit comme base lubrifiante, soit comme additif de lubrifiant à base de PAO (polyalphaoléfines) d'origine pétrochimique.
- **Fluxants de bitumes**. Les esters méthyliques de tournesol peuvent être employés en remplacement des fluxants d'origine pétrolière. Les esters méthyliques de tournesol permettent de réduire la viscosité des bitumes sans avoir la forte volatilité des produits d'origine pétrolière. Ils sont de plus biodégradables. Le marché des fluxants de bitumes serait de 54 Kt en France.

Les dérivés des esters méthyliques

- **Des CLA (Conjugated Linoleic acids) ou acides linoléiques conjugués** sont obtenus industriellement à partir des esters méthyliques de tournesol. Les CLA existent sous forme de nombreux isomères dont quelques uns ont des propriétés bien établies pour la santé humaine (anticancéreux, antioxydant, réducteur de cholestérol et de la masse grasseuse). **Cognis** produit deux isomères spécifiques de CLA à partir d'esters méthyliques d'huile de tournesol riche en acide linoléique (> 72 %). Ils sont destinés à l'alimentation animale et permettent de réduire le taux de gras des viandes. Des présentations enrobées ou sous forme de sels de calcium de CLA sont nécessaires pour éviter une dégradation dans le rumen des bovins.
- **Les alcools gras**
Les esters méthyliques de colza peuvent être hydrogénés pour produire des alcools gras.

Les applications des alcools gras se répartissent ainsi :

- Détergents : 70 % (en majorité à base d'alcools à chaînes en C12 ou C14, inévitablement d'importation : coprah, palmiste)
- Industrie chimique : 18 %
- Lubrifiants : 8 %
- Cosmétique : 4 %.

Les 3 derniers secteurs d'application peuvent valoriser des chaînes de type C18, comme celles de colza, de tournesol mais aussi de soja ou de palme.

Les alcools gras en C16-C18, comme ceux issus du colza, sont valorisés comme anti-mousses et comme agents de texture pour les crèmes, les pâtes, les polish et les rouges à lèvres. La concurrence de l'huile de palme est très forte.

Les alcools gras de colza sont également transformés en **alcools éthoxylés ou sulfatés** qui sont valorisés pour leurs propriétés tensioactives sur le marché des cosmétiques.

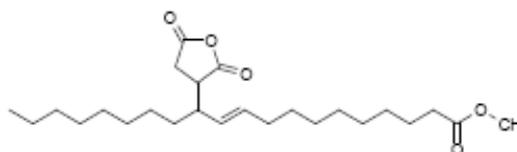
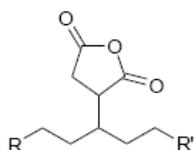
Les alcools gras peuvent être utilisés pour produire des **APG (Alkyl poly glycosides)**, des tensio actifs dans lesquels la tête hydrophile est un sucre. Cognis est un producteur majeur de ces produits. Les chaînes grasses sont généralement courtes, issues du coprah et du palmiste.

Les **sulfométhylesters** ont des applications comme tensio-actifs et agents moussants, notamment en cosmétique.

Les Alkenyl Succinyl Anhydride (ASA)

Issus de la réaction entre l'anhydride maléique et un alcène, les ASA sont une famille de molécules qui sont utilisées dans l'industrie en tant qu'agents de collage papetiers, détergents pour les produits pétroliers, additifs pour les carburants, lubrifiants et, comme produits de traitement du bois.

Les ASA d'origine pétrochimique ont été complétés par les ASAM (pour Anhydride Succinique d'Alkénoate de Méthyle), des molécules obtenues par maléinisation d'esters méthyliques d'origine végétale (colza ou tournesol). Un important travail a été réalisé sur les ASAM et leurs applications par le Laboratoire de Chimie Agro-industrielle de l'INP Toulouse.



Structure générale d'un ASA Structure d'une molécule d'ASAM obtenue par maléinisation de l'oléate de méthyle

Source : Thèse d'Olivier Pignolet (2008) "**Optimisation de la durabilité de bois d'œuvre (classe d'emploi 4) à l'aide d'anhydrides alkényles succiniques d'origine végétale**"

Les ASAM sont des protecteurs du bois non toxiques qui peuvent se substituer à des fongicides et à des insecticides toxiques. Le potentiel est important (10 millions de m³ de bois d'œuvre en France). Des développements sont en cours et montrent que de tels produits peuvent assurer la protection de bois de classe de risque 3 (bois placés en extérieur, soumis à des alternances rapides d'humidité ou de séchage : fenêtres, portes, revêtements extérieurs) et 4 (bois placés en extérieurs, de type poteaux, clôtures, passerelles). Les produits atteignent aujourd'hui l'étape pré commerciale, des sociétés comme **Lapeyre** effectuant de premiers usages industriels.

Les ASAM ont d'autres applications potentielles en papeterie, comme agents de collage.

II.3.5.6 - LES AUTRES DERIVES DES ACIDES GRAS

Au travers de la production de biodiesel, les esters méthyliques obtenus directement par transestérification de l'huile ont pris une grande place dans la filière industrielle du colza ou du tournesol. L'oléochimie plus traditionnelle utilisait souvent les acides gras comme matières premières (quitte à les ré-estérifier parfois avec du glycérol).

Ces derniers produits sont plus purs et beaucoup mieux définis en termes de composition. Ils sont aussi plus chers et réservés à des applications comme celles de la cosmétique. Les "estérificateurs" produisent des esters d'acide gras avec du glycérol, de l'éthanol ou des alcools de synthèse. Les acides gras du colza restent en compétition avec ceux d'autres huiles végétales.

- Les **esters éthyliques d'huile végétale** sont aujourd'hui des produits à haute valeur ajoutée, utilisés comme adjuvants de solvants dans des produits phytosanitaires ou des lubrifiants. Des sociétés comme **Cognis** ou **Novance** en sont producteurs. Des esters butyliques ont des propriétés voisines.

La technologie pour produire massivement des esters éthyliques qui pourraient former un **bio diesel "100 % d'origine végétale"** est en cours de développement. Un pilote de 10 000 tonnes, mettant en œuvre le procédé de **Valagro** est en place à La Palice.

- De **l'alcool béhénique est produit à partir d'huile de colza érucique** et selon une technologie spécifique. C'est une base cosmétique, au marché en développement.
- Parmi les autres applications de dérivés de l'acide érucique, on peut citer **l'érucamide** aux propriétés d'agent antibloquant, pour la mise en forme de PVC ou de polyéthylène.
- Les trioléates de TMP (triméthylolpropane), utilisés pour des lubrifications exigeantes sont à base d'acide oléique qui provient soit du suif (qui reste peu cher), soit d'une origine végétale et notamment d'huile de colza.

Les perspectives de nouveaux dérivés d'acides gras

Les usages non alimentaires des acides gras à chaînes longues disponibles en Europe restent très largement confinés aux applications des EMVH dans le biodiesel. Il est donc stratégiquement nécessaire de stimuler et de développer des recherches actives pouvant offrir d'autres opportunités de débouchés pour des volumes conséquents. Les pistes permettant le développement de polymères et donc de matériaux biosourcés font naturellement partie de celles à explorer avec soin.

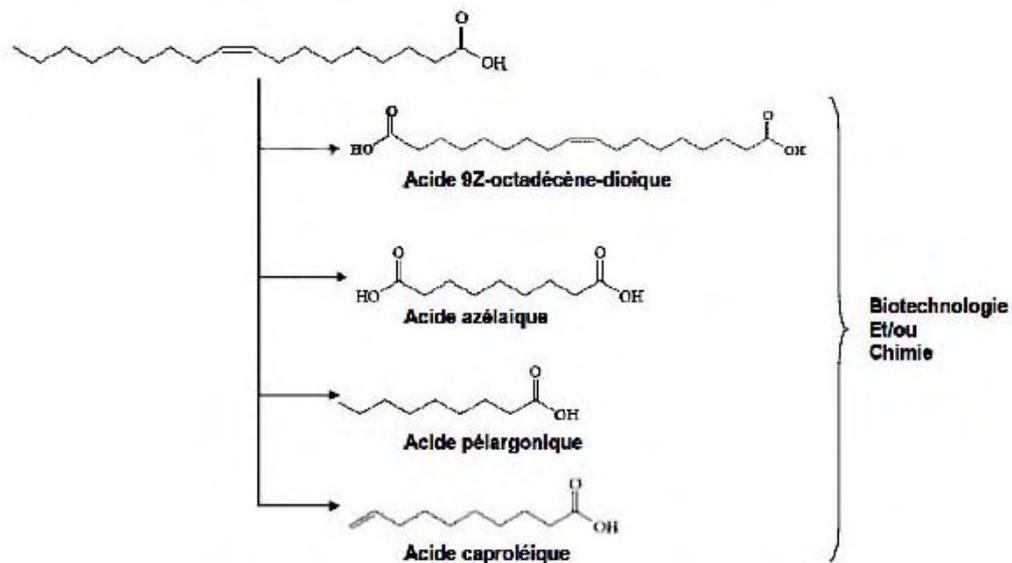
Les molécules disponibles comme l'acide oléique sont longues et monofonctionnelles. Elles sont en revanche porteuses d'une double liaison qu'il est facile de rompre.

Acide oléique



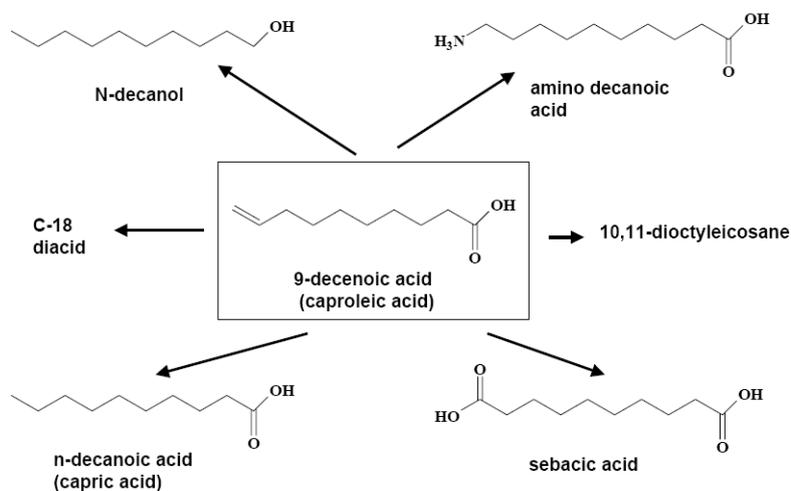
Divers travaux de recherche sont en cours, mettant en œuvre des procédés biotechnologiques ou chimiques pour créer de nouveaux intermédiaires de synthèse à partir des acides gras à chaînes longues. Certaines levures savent ainsi transformer des acides gras en diacides, qui peuvent alors être polymérisés ou intégrés dans des polymères (polyesters, polyamides). Sous réserve d'une hydrogénation des doubles liaisons on peut obtenir des molécules aux propriétés proches du polyéthylène mais restant biodégradables par leur liaison ester tous les 18 carbones.

Nouveaux dérivés potentiels de l'acide oléique



Le cracking d'acides gras insaturés comme l'acide oléique permet d'obtenir des chaînes impaires en C9 (ou C11 pour l'acide érucique) que les chimistes ne savent produire autrement que par métathèse. On ouvre ainsi des pistes d'applications de molécules comme les acides caproléïque, pélagoniques, etc....

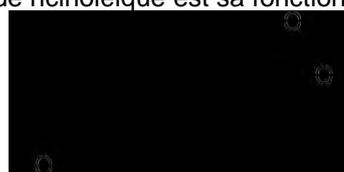
9-Decenoic acid as a platform chemical



Source : DC Cameron, Cargill

Les dérivés de l'acide ricinoléique du ricin.

La particularité de l'acide ricinoléique est sa fonction hydroxyle sur sa chaîne carbonée.



Acide ricinoléique

Les dérivés de l'huile de ricin sont nombreux. Nous citerons ici ceux qui sont produits ou consommés par des groupes français comme Arkema et Rhodia.

- **Le polyamide 11.** L'alkoolyse de l'huile de ricin permet d'obtenir du ricinoléate de méthyle et du glycérol. L'ester en C19 est cracké en acide heptanoïque (C7) et en undécylénate de méthyle en C12. Par hydrolyse de ce dernier, on obtient de l'acide 10-undécylénique qui par bromuration puis amination est transformé en acide 11-amino-undécanoïque $\text{HOOC}-(\text{CH}_2)_{10}-\text{NH}_2$, le monomère du polyamide 11 $-(\text{CH}_2)_{10}-\text{CO}-\text{NH}-$, commercialisé par **Arkema** sous la marque Rilsan®. Il est valorisé également dans un poeether block amide, le Pebax®.
- **L'acide sébacique.** Il est obtenu par fusion alcaline de l'huile. Il a de nombreuses applications dans les plastifiants, les lubrifiants, les fluides hydrauliques, etc. C'est un précurseur du polyamide 6-10, produit notamment par **Rhodia**.



Acide undécylénique



Acide heptanoïque



Acide sébacique

II.3.5.7 - LE GLYCEROL ET SES DERIVES

Généralités

Le glycérol issu de ressources fossiles peut être obtenu à partir du propylène via l'épichlorhydrine.

Le glycérol d'origine végétale est un coproduit très ancien de la fabrication des savons ou de dérivés d'acides gras.

Depuis quelques années, ce glycérol végétal est désormais majoritairement obtenu comme coproduit de la fabrication du bio diesel à partir d'huile de colza, de tournesol, de soja ou de palme. **La production d'1t d'ester méthylique de colza génère 0.1 t de glycérol. Aux deux millions de tonnes de biodiesel produites en France à ce jour, sont associées 200 000 t de glycérol.** En comparaison, la production de biodiesel française en 2003 (357 Kt) n'avait généré que 36 Kt de glycérol.

Le glycérol à proprement parler est la molécule purifiée à partir de la **glycérine**. Quand un niveau de pureté élevé est nécessaire, des distillations successives sont réalisées et le prix du produit fini augmente considérablement (il varie du simple au double entre une qualité alimentaire ou pharmaceutique - qui doit être de 99.9 % - et un grade destiné à la transformation industrielle). La possibilité de pouvoir utiliser du glycérol non purifié pour la production d'un dérivé est un important facteur de réduction des coûts de revient.

La production mondiale de glycérol était de 800 Kt en 2003, dont 100 Kt liées à la production d'esters méthyliques. Elle est aujourd'hui de près de 1.8 à 2 millions de tonnes, avec un taux de croissance moyen avoisinant 50 % par an ces dernières années ! On attend 3 millions de tonnes en 2012. Avec 300 000 t, **Sofiprotéol** est le plus gros producteur mondial et a un rôle structurant dans un secteur par ailleurs très atomisé.

Depuis de longues années, **le prix du glycérol** a la réputation d'être particulièrement difficile à prévoir. Le développement du biodiesel et, en conséquence, de l'offre en glycérol a fait baisser structurellement les prix mais ceux-ci restent très volatils et le marché libre se tend volontiers. Le prix du glycérol raffiné (qui fait l'objet de cotations) était de plus de 2 \$/kg entre 1995 et 1997. En 2002, il était en dessous d'1 \$/kg. Fin 2006, il était à moins de 0.7 \$/kg avant de doubler fin 2007, de rebaisser fortement et de repartir plus récemment dans un mouvement de hausse.

La diversité des applications du glycérol

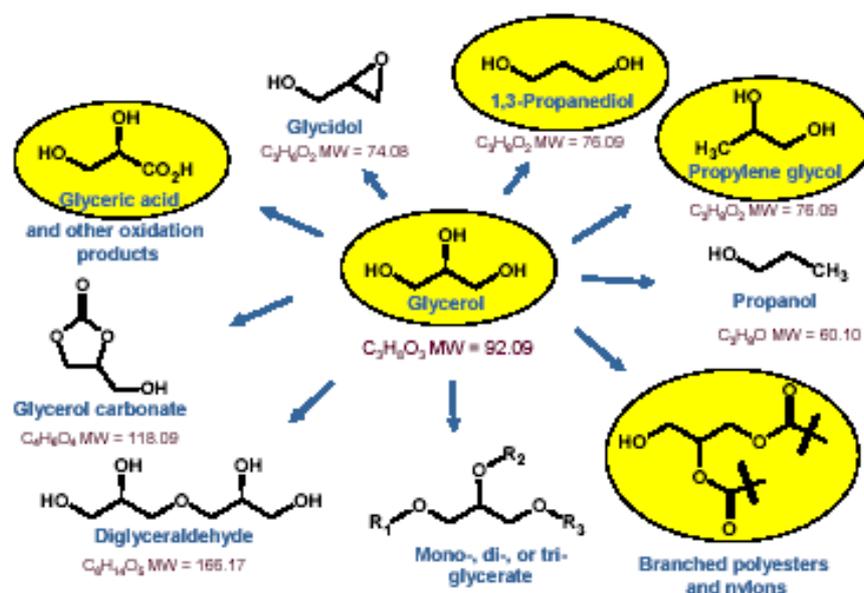
On dénombrait plus de 1500 applications du glycérol il y a déjà 50 ans. La plupart correspondent à de petits marchés stabilisés, sans perspectives de développement important.

- **Le glycérol est utilisé tel quel** dans des applications aussi diverses que les pâtes dentifrices, les humectants, les conservateurs et les antigels. Un certain nombre de ses dérivés sont également valorisés par l'industrie depuis fort longtemps.
- **Les esters de glycérol : des dérivés classiques**
 - **Le triacétate de glycérol**, est un dérivé bien connu, utilisé dans l'industrie du tabac (filtres de cigarettes). Il n'a pas de nouvelles perspectives particulières.
 - **Les mono et di-glycérides** sont également des dérivés classiques, utilisés comme émulsifiants en cosmétique et dans l'agroalimentaire. Les progrès de leur marché dépendent de recherches en matière de formulation d'émulsifiants.
 - Les dérivés de monoglycérides peuvent être utilisés comme tensioactifs pour peu que les propriétés hydrophiles de l'acide gras soient renforcées. Les sulfates et les éthoxylates de monoglycéride ont des propriétés intéressantes. Toutefois, de tels produits ne sont généralement pas obtenus à partir d'huile de colza mais de coprah, pour disposer de chaînes d'acides gras en C12 ou C14.
 - **La nitroglycérine**, bien connue comme explosif, est du trinitrate de glycérol. obtenu par réaction avec un mélange d'acides nitrique et sulfurique.

Le glycérol, molécule plateforme

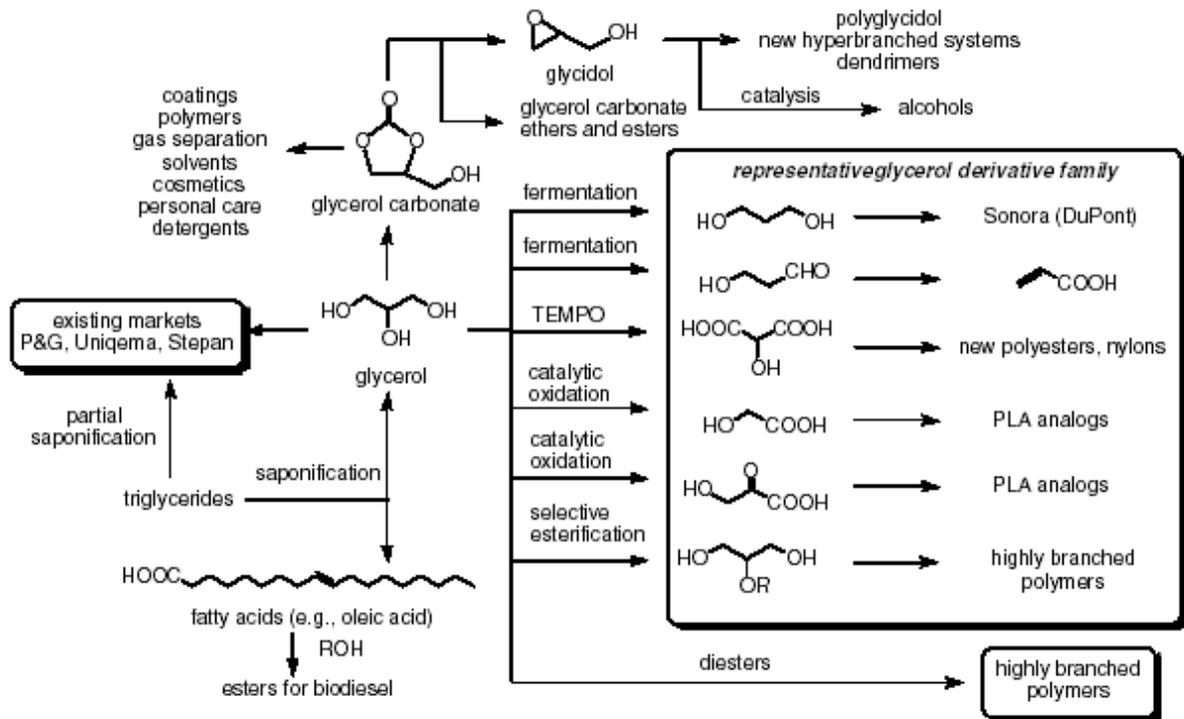
Lors de l'étude réalisée en 2004 par le Laboratoire National des Energies Renouvelables américain (NREL) pour l'US DOE, le glycérol avait été classé dans le "top 10" des molécules plateformes potentielles des futures bioraffineries. Il a par la suite été confirmé dans ce statut par d'autres travaux de référence (cf. § IV.1). Selon certains, le glycérol serait l'équivalent d'origine végétale du propylène pour la pétrochimie.

Un des regards du NREL américaine sur les dérivés du glycérol en 2004

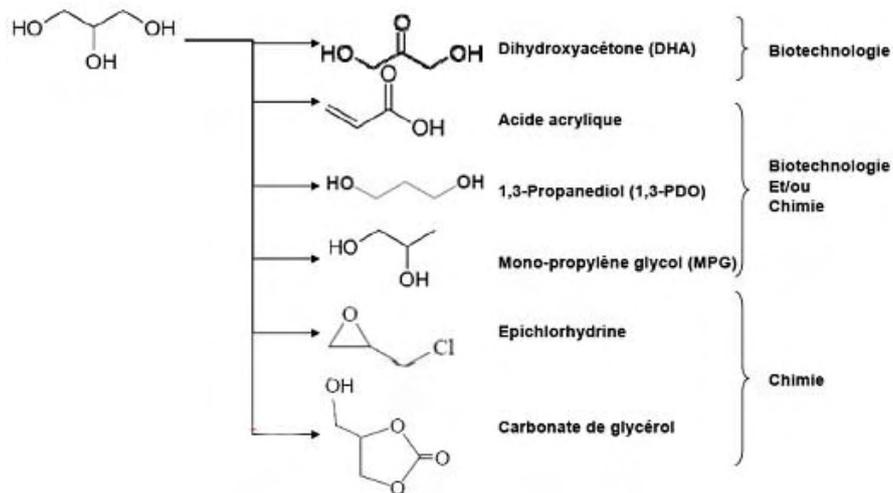


De premiers schémas comme les deux présentés avaient alors été produits. Comme polyol en C3, le glycérol peut être transformé par voie chimique ou biotechnologique en un vaste ensemble de molécules d'intérêt.

L'autre présentation du NREL des dérivés du glycérol en 2004



Et celui, plus concentré, de Sofiprotéol en 2010...

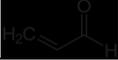
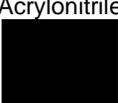
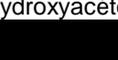
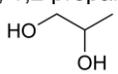
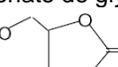
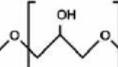
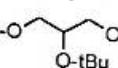
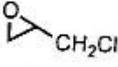


La liste des dérivés potentiels établie en 2004 oublie ce qui est aujourd'hui le projet le plus avancé en termes d'utilisation nouvelle et massive du glycérol : la production d'épichlorhydrine, une molécule historiquement plutôt considérée comme le précurseur pétrochimique du glycérol que l'un de ses dérivés ! Il y a là une illustration très forte de la transition en cours d'une partie – encore modeste - de la pétrochimie vers la chimie de la biomasse.

La liste des articles scientifiques sur les nouveaux usages du glycérol aurait doublé entre 2000 et 2007 et dépassé 7000 cette dernière année là. Elle se développe encore depuis. Un premier

livre spécialisé, "The future of glycerol – Pagliaro & Rossi – RSC Publishing, Cambridge UK" a été publié en 2008 et réédité en 2010.

Principaux dérivés actuels ou potentiels de la molécule plateforme qu'est le glycérol

Réaction	Produit principal	Applications	Commentaires
Reformation	Gaz de synthèse CO, H ₂	Dérivés d'une réaction de Fischer-Tropsch	Bon ratio CO/H ₂ pour obtenir du méthanol.
Déshydratation	Acroléine 	Nombreux dérivés polymères (peintures et résines acryliques, fibres textiles, résines ABS), détergents, etc. Importants marchés.	Travaux d' Arkema de production d'acide acrylique via l'acroléine. Des procédés émergents d'obtention directe d'acide acrylique et d'acrylonitrile à partir du glycérol. <i>L'acide acrylique peut être obtenu également par fermentation du glucose (OPX aux USA). Cargill et Novozymes mènent un projet où le 3-HPA est un intermédiaire.</i>
	Acide acrylique 		
	Acrylonitrile 		
Oxydation sélective ou fermentation	Acide glycérique 	Polymères, etc.	Encore au stade de recherche.
	Dihydroxyacétone 	Cosmétique : agent autobronzant.	Petits marchés. Produit par ARD par fermentation du glycérol.
Hydrogénolyse ou fermentation	Propylène glycol MPG, 1,2 propanediol 	Emulsifiant alimentaire, solvant, humectant. Dégivrant, liquides de refroidissement, fibres polyesters. Importants marchés.	Productions à partir de glycérol par ADM (unité de 100 Kt), + projets <i>Cargill, Virent, Dow, Huntsman ??</i> Projets par fermentation ? Met Ex développe un procédé par fermentation. De glucose ou de glycérol ?
	1,3 propanediol (1,3 PDO) 	Composant de polyesters pour fibres, films et revêtements. Important marché.	Met Ex dispose d'un procédé au stade pilote de production du 1,3 PDO à partir de glycérol. DuPont / Tate & Lyle produisent du 1,3 PDO à partir de glucose.
Carboxylation	Carbonate de glycérol 	Emollient (cosmétique). Potentiel pour produire des polycarbonates.	Deux procédés au point mais coûts de revient encore élevés. Acteurs : Novance et Huntsman .
	Glycidol 	Polyglycidol, utilisable dans les résines époxy ou les polyuréthanes.	Le glycidol peut être produit à partir du carbonate de glycérol ou de l'épichlorhydrine.
Estérification, transestérification	Polyglycérols et leurs esters 	Emulsifiants cosmétiques et agroalimentaires.	Nombreuses autres applications potentielles : nouveaux polymères.
Ethérification	Tertiobutyl éther 	Additifs de carburants concurrents du MTBE et de l'ETBE.	Pas encore de développement industriel.
Chlorination	Epichlorhydrine 	Résines époxy, etc.	Unité de 10 000 t de Solvay opérationnelle en France. Construction d'une unité de 100 Kt en Thaïlande.

Le tableau précédent montre que de nombreuses transformations peuvent se réaliser par synthèse chimique mais aussi que, pour plusieurs dérivés importants (acide acrylique, Propylène glycol, 1,3 propanediol), des procédés biotechnologiques sont opérationnels ou en cours de mises au point. Selon les développements, ce peuvent être le glycérol ou les sucres qui sont les matières premières des mêmes intermédiaires chimiques, avec en conséquence un décloisonnement croissant entre les filières végétales pour les applications de leurs dérivés dans la chimie.

L'épichlorhydrine

Cette application avait donc été ignorée de l'étude NREL-US DOE de 2004.

La production d'épichlorhydrine à partir de glycérol peut être résumée de façon simplifiée par la réaction suivante (*le procédé comporte en réalité deux réactions successives avec du dichloropropanol comme intermédiaire*). Il faut environ 1 t de glycérol pour produire 1 t d'épichlorhydrine.



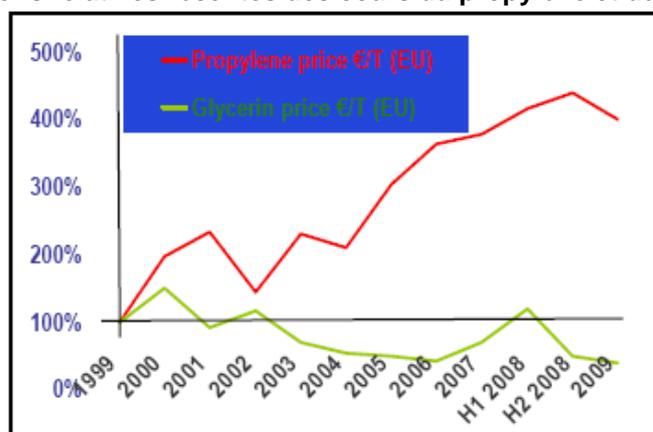
La demande annuelle d'épichlorhydrine était de 1250 Kt en 2009, dont plus de la moitié en Asie (690 Kt avec une croissance moyenne de près de 6.7 %/an) et un quart en Europe (300 Kt avec seulement 2.1 % de croissance annuelle).

L'épichlorhydrine a des applications dans :

- Les résines époxydes (75-80 % des usages) pour des éléments rigides (automobiles, coques de bateaux, pièces d'éoliennes, etc.), des peintures et des adhésifs.
- Le renforcement de papier pour la production de lingettes humides.
- Les agents de floculation.
- D'autres résines.

L'épichlorhydrine est produite dans toutes les régions du monde à partir du propylène des vapocraqueurs et de chlore. Les industriels utilisateurs peuvent disposer d'une production intégrée ou acheter le produit sur le marché "libre" (environ 700 000 t) auprès de producteurs comme le groupe belge **Solvay**, implanté sur les différents continents. Le prix du propylène a été multiplié par 4 entre 1999 et 2010, avec un marché très court et des problèmes de disponibilité locale dès 2005-2006 qui justifient de lui rechercher des alternatives.

Evolutions relatives récentes des cours du propylène et du glycérol



Source : Solvay

La production d'épichlorhydrine à partir de glycérol a été développée par **Solvay** (procédé Epicerol®) avec de premiers essais pilotes en 2004-2006 en France, sur son site de Tavaux, dans le Jura (un projet qui fut soutenu par Agrice et le ministère de l'Industrie) Il existait depuis 1931 un procédé de conversion du glycérol, décrit dans la littérature mais inapplicable en termes industriels. Un travail de développement a été nécessaire, qui s'est formalisé par le dépôt de 38 brevets dont beaucoup d'entre eux sont déjà validés dans plusieurs pays de différentes régions du monde. Une unité d'une capacité de 10 000 t a été construite qui fonctionne depuis 2007. Elle cohabite sur le site avec celle consommant du propylène.

Le procédé Epicerol® permet non seulement d'utiliser une matière première biosourcée mais de réduire fortement les impacts environnementaux de la production d'épichlorhydrine (division par 10 de la consommation en eau et par 2 de celle de chlore et d'énergie non renouvelable, réduction d'un facteur 8 du volume de coproduits chlorés, diminution des émissions de CO₂ de 20% et réduction de 50% de la consommation de matières premières non-renouvelables).

Solvay a entrepris la construction d'une autre unité de production de 100 000 tonnes d'épichlorhydrine à partir de glycérol sur son site de Map Ta Phut, en Thaïlande, pour servir les marchés régionaux en fort développement.

L'acide acrylique.

L'acide acrylique est ordinairement produit à partir du propylène. Ses dérivés sont nombreux, dans les peintures, les vernis, les thermoplastiques et les élastomères.

La demande mondiale d'acide acrylique est de 1.1 à 1.2 millions de tonnes, avec des prix ayant fluctué ces dernières années entre 1.1 et 2.5 \$/kg à ses plus hauts.

Le chimiste français **Arkema** travaille à l'étape pilote sur la production d'acide acrylique à partir de glycérol, avec l'acroléine comme intermédiaire de synthèse. Arkema réalise ces travaux sur son site de Carling en Moselle et collabore sur le sujet avec deux laboratoires de la région, cette dernière contribuant au financement des travaux.

Différents procédés de production d'acide acrylique mais aussi d'acroléine et d'acrylonitrile à partir de glycérol font l'objet de brevets publiés. Les progrès récents en termes de catalyse offrent des rendements améliorés et des possibilités de travailler sur du glycérol en solution à différentes concentrations, sans cosolvant et avec une bonne régénération des catalyseurs.

Notons que certaines entreprises travaillent sur la production directe d'acide acrylique par fermentation à partir de glucose. C'est le cas aux USA, de la start up **OPX**. **Cargill** et **Novozymes**, pour leur part mène un projet dans lequel le 3-HPA sera un intermédiaire de production de l'acide acrylique.

Le mono propylène glycol (MPG) ou 1,2 propanediol

Cette molécule a de très nombreuses applications dans l'agroalimentaire et les produits d'hygiène, les liquides antigel et les produits de dégivrage mais aussi comme composant de résines polyesters insaturées.

Le MPG est ordinairement produit à partir de l'oxyde de propylène. Son marché mondial peut être estimé à 1.8 Mt. Le prix du produit a varié entre 800 et 1250 €/t ces dernières années.

La toxicité de l'éthylène glycol (un marché de près de 18 millions de tonnes !) et de ses dérivés favorise le développement des applications du propylène glycol.

Le plus gros projet de production de propylène glycol à partir de glycérol est celui d'**Archer Daniel Midlands** (ADM), à Decatur dans l'Illinois avec une unité de 100 000 tonnes. Il reste à préciser si le sorbitol pourra être également utilisé comme matière première. Plusieurs autres

projets de production avaient été annoncés en 2007 (**Dow, Huntsman, Cargill, Synergy**) mais semblent retardés ou annulés.

Il existe des projets de production de MPG par fermentation mais à partir de sucre. C'est le cas de celui de **Metabolic Explorer** en France.

Le carbonate de glycérol $C_4H_6O_4$ a des applications dans les solvants et potentiellement dans les polymères. C'est une molécule qui peut être dérivée de la pétrochimie (le chimiste nord américain **Huntsman** est un producteur) ou à partir du glycérol végétal.

La capacité du carbonate de glycérol à se polymériser sur lui-même lui offre des perspectives en concurrence des polyacrylates.

Deux procédés industriels permettent de transformer le glycérol en carbonate de glycérol : celui de **Novance** et celui d'Huntsman.

Novance a développé un procédé continu qui permet d'obtenir le carbonate de glycérol avec 90 % de rendement à partir de la glycérine brute selon la réaction : glycérol + urée → carbonate de glycérol + ammoniac. La gestion du rejet d'ammoniac alourdit le coût de mise en œuvre.

Le carbonate de glycérol peut être également un précurseur du **glycidol** et du **polyglycidol**, utilisables dans les résines époxy ou les polyuréthanes. Le glycidol est classiquement synthétisé à partir de l'épichlorhydrine.

Le carbonate de glycérol était présenté en 2005 comme une molécule plateforme potentielle mais, 5 ans après, ses coûts de production restent encore trop élevés et le produit n'a pas connu de fort développement.

Les polyglycérols et les esters de polyglycérols. Les polyglycérols sont obtenus par oligomérisation en conditions alcalines. Leur estérification avec différents acides gras permet d'obtenir de larges familles de produits.

Ces composés ont déjà des applications comme émulsifiants en cosmétique et dans l'agroalimentaire. Ils peuvent se positionner comme tensioactifs et lubrifiants biodégradables, en remplacement peut être partiel du polyoxoéthylène. On peut attendre des applications en forage pétrolier et dans la décontamination des sols pollués.

Polyglycérols et méthacrylates de polyglycérols ont un potentiel intéressant comme agents de traitement du bois, destinés à maintenir son taux d'humidité entre 15 et 20 %. Ils entrent en compétition sur cette application avec les polyéthylèneglycols. Les performances du bois ainsi traité lui permettent de rivaliser avec le PVC.

Le 1,3 propanediol (dénommé également 1,3 PDO), est une molécule produite par la pétrochimie, qui peut être également obtenue par fermentation du glucose ou du glycérol. Un paragraphe spécifique est consacré à cette molécule en III.3.

Il n'y a pas aujourd'hui de production industrielle de 1,3 PDO à partir de glycérol. En France, **Metabolic Explorer** a développé un procédé qui est encore à l'étape pilote.

Les polyuréthanes. Ces matériaux, qui forment une famille d'une très grande diversité, sont obtenus à partir d'un polyol et d'un di-isocyanate. La présence de gaz variés permet leur expansion. **Novance** a développé un procédé dans lequel l'agent d'expansion est l'eau. Le polyol utilisé est à base de glycérol dont un -OH reste libre, ce qui lui confère une grande hydrophilie.

Conclusions : glycérol

- Le glycérol est effectivement une molécule plateforme. Avec ses trois carbones et ses trois fonctions alcools, il offre un grand nombre de dérivés potentiels.
- L'offre en glycérol s'est considérablement accrue et poursuit son développement. Elle reste dans notre contexte encore totalement tributaire des politiques des états en matière de soutien à la production de biodiesel de type EMVH.
- Les projets innovants mobilisant plus d'une centaine de milliers de tonnes de glycérol pour une application et un site sont au nombre de deux aujourd'hui : celui de **Solvay** pour produire de l'épichlorhydrine et celui d'**ADM** pour fabriquer du mono propylène glycol. Plusieurs projets similaires à ce dernier semblent avoir été annulés ou reportés.
- Les dérivés du glycérol sont aujourd'hui principalement obtenus par conversion chimique, des progrès réguliers étant réalisés en matière de catalyse.
- Les biotechnologies n'ont pas - à ce jour - ouvert de nouveaux horizons tangibles au glycérol.
- Le carbonate de glycérol a des propriétés intéressantes mais son coût de production reste trop élevé pour que puisse se développer des usages massifs.

II.3.6 – FORCES, FAIBLESSES, PERSPECTIVES DE LA FILIERE FRANÇAISE

On peut les résumer ainsi :

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> - Filière française très structurée et volontariste, émanant directement des producteurs agricoles et disposant d'outils industriels importants. - Poursuite de la progression des rendements du colza. Production performante de tournesol oléique. - Démarche de progrès environnemental de la filière. - Bon équilibre entre les débouchés des bioraffineries de la filière (alimentaire, alimentation animale, biocarburants). - Production importante de biodiesel permettant le développement des EMVH comme une plateforme pour la chimie. - Recherche active sur les débouchés du glycérol dont l'offre a fortement progressé. - Potentiel de développement d'une chimie des chaînes grasses impaires. 	<ul style="list-style-type: none"> - Filière en situation de quasi monopole en France, manquant d'émulation par la concurrence. Dimension internationale limitée (Europe). - Limites agronomiques à l'expansion de la culture de colza en France. - Biodiesel pas encore 100 % d'origine biomasse (le méthanol des EMVH est produit à partir de ressources fossiles). - Impossibilité pour les filières oléagineuses européennes de produire des acides gras à chaînes courtes (hormis par des OGM). - Encore peu de valorisations du potentiel des biotechnologies blanches dans le secteur. - Certains projets tardent à atteindre l'étape industrielle (carbonate de glycérol). - Encore peu de coopération sur de grands projets entre la filière agroindustrielle et nos principaux chimistes français.

Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> - Déficit européen en gazole facilitant la bienveillance des pétroliers sur le biodiesel. - Hausse structurelle du coût du pétrole, permettant à différents produits de la filière de devenir plus compétitifs. - Possibilité de valoriser de très grands volumes de tourteaux de colza par l'alimentation animale, en substitution du tourteau de soja d'importation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Compétition directe avec les huiles d'importation de soja et de palme pour de nombreuses applications. - La viabilité de la filière biodiesel dépend encore de choix politiques. - Refus français et d'une partie de l'Europe des OGM de colza alors que cette plante offre plusieurs possibilités d'amélioration par génie génétique.

La filière française a pour atouts majeurs la qualité de sa structuration. Notre pays occupe une position solide dans la production d'huiles végétales à chaînes d'acide gras longues. Le développement du biodiesel a permis celui de l'offre en glycérol et d'applications originales.

II.3.7 – RECOMMANDATIONS

- **Conforter la production de biodiesel** en offrant de la visibilité aux acteurs tout en les incitant à gagner encore en performances non seulement sur l'amélioration des performances environnementales de la filière, mais aussi sur **leurs capacités d'entraînement et de développement d'un secteur d'oléochimie moderne française et européenne.**
- **La chimie des acides gras en C18 et C22 mais aussi de leurs dérivés en C9 et C11 doit être développée par nos équipes de recherche publique et industrielle.** Un petit nombre de projets porteurs, valorisant notre excellence, en France et en Europe devront être sélectionnés et faire l'objet d'un soutien important.
- Il est nécessaire de **poursuivre le développement des dérivés du glycérol mais en concentrant là-aussi les efforts** sur les quelques projets susceptibles de valorisation significative par notre industrie nationale. La sélection devra être réalisée avec soin, tant sont nombreux les dérivés potentiels du glycérol. Le risque de développer la technologie dans notre pays et qu'elle soit par la suite valorisée dans des régions de plus forte croissance doit être intégré. Il faudra prendre en compte les intérêts de notre filière agricole nationale mais aussi ceux de nos industries chimiques, actives sur différents continents. L'exemple de **l'acide acrylique** mérite d'être approfondi, **Arkema** disposant d'importants sites de production en France.
- Il serait pertinent de développer en France un projet du type "BioHub de l'oléochimie" (chimie des acides gras et chimie du glycérol), avec des ambitions et des soutiens de niveaux similaires. Il lui faudra rassembler la filière oléagineuse, des industriels de la chimie, des PME et des laboratoires de recherche publique.

II.4. - LES FILIERES LIGNOCELLULOSIQUES

Alors que les filières précédentes utilisent des substances de réserves que les plantes accumulent dans leurs graines, leurs racines ou leurs tubercules, les filières dites "lignocellulosiques" sont celles qui valorisent les parois végétales qui sont riches en cellulose, hémicelluloses, lignines. La diversité des ressources disponibles, de leur nature et de leurs propriétés, est très grande si l'on considère le bois, les pailles agricoles, les cultures dédiées mais aussi divers déchets d'origine végétale.

II.4.1 - ESPECES BOTANIQUES, ORIGINES ET VARIETES CULTIVEES

La liste des espèces alimentant ou pouvant alimenter de telles filières est très importante. Elle comprend les arbres forestiers utilisés traditionnellement par l'industrie de la pâte à papier, des plantes textiles dont les fibres ont des usages traditionnels ou plus innovants et, enfin, des cultures pérennes ou annuelles développées pour la production de biomasse combustible ou de biocarburants de seconde génération.

ARBRES CULTIVES

Le papier est issu de la transformation des fibres du bois. Les espèces résineuses (*en anglais : softwood*) possèdent des fibres longues tandis que les feuillus (*hardwood*) ont des fibres courtes. La pâte à papier (*pulp*) est la matière première du papier. Les grandes espèces forestières utilisées pour la fabrication de papier sont d'une part des résineux (pins, sapins, épicéas) et d'autre part des feuillus (eucalyptus, peupliers, bouleaux, trembles et autres espèces diverses). L'industrie papetière française consomme des bois d'éclaircie, les arbres de fût étant réservés à la production de bois d'œuvre. Elle est également alimentée par des coproduits de scierie et par la récupération de papiers et de cartons à recycler.

Les pins, *Pinus sp.* (pine en anglais). De nombreuses espèces de pins sont utilisées pour produire des pâtes de cellulose dans les régions tempérées et tropicales du monde, avec d'intéressants coproduits (terpènes, tall oil). L'exemple du pin maritime (*Pinus pinaster*) en France est intéressant car c'est l'espèce de l'important massif forestier des Landes (1 million d'hectares). Le pin maritime n'était présent naturellement que sur le littoral. Sa culture a été très largement étendue depuis le dix neuvième siècle. C'est une espèce monoïque et allogame, à pollinisation anémophile. Des variétés synthétiques améliorées ont été développées par l'INRA et sont multipliées dans des vergers à graines. Les peuplements améliorés qui en sont issus couvrent environ 10 % du massif forestier landais.

Eucalyptus. Ce genre, originaire d'Australie et de Nouvelle Guinée, appartient à la famille des myrtacées et rassemble plus de 550 espèces. C'est l'essence forestière feuillue la plus plantée au monde. Les eucalyptus sont préférentiellement allogames, à fleurs hermaphrodites présentant une protandrie marquée. Leur pollinisation est entomophile. Les variétés modernes sont des clones, multipliés par bouturage.

Les peupliers, *Populus sp.* (poplar en anglais) sont des arbres cultivés pour leur production rapide de bois. Les peupliers sont dioïques (un arbre est mâle ou femelle), à pollinisation anémophile. Les variétés sélectionnées sont multipliées par bouturage. Les peupleraies, établies pour 15 à 25 ans, sont valorisées pour la production de contreplaqué, emballages, palettes, etc. ou en trituration. Le peuplier se prête également à des cultures à haute densité (taillis à courte rotation).

La transgénèse est maîtrisée depuis longtemps sur les peupliers et des clones à teneur réduite en lignine ont été développés, sans que des cultures commerciales soient encore envisagées.

Les saules, *Salix sp.*, (willow en anglais) sont des arbustes dioïques qui se prêtent à la réalisation de taillis à courte ou très courte rotation (2-4 ans).

ESPECES AGRICOLES

Le blé et les autres céréales (maïs, orge, avoine, seigle...) peuvent alimenter les filières lignocellulosiques par leurs pailles, mais aussi par leurs plantes entières en cas de déclassements et par certains coproduits riches en fibres.

Le triticale, *Triticosecale* (triticale en anglais) est une plante cultivée obtenue à partir de croisements entre blé et seigle. Sa sélection active a démarré dans les années 1980. Initialement développée comme céréale destinée à l'alimentation animale car cumulant des caractères de productivité du blé et de rusticité du seigle, le triticale, avec ses importants volumes de paille, offre des perspectives plus larges pour produire de la biomasse à des fins énergétiques ou autres. Comme le blé, le triticale est majoritairement autogame et reproduit par autofécondation (son autre parent, le seigle est un allogame strict).

La sélection de triticale est active, avec près d'une centaine de variétés inscrites au catalogue français (les semenciers sont Florimond Desprez, RAGT, Lemaire Desfontaines,

Le lin, *Linum usitatissimum*, (linseed en anglais), est une linacée en C3, très anciennement cultivée par l'homme et qui fut domestiquée au Moyen Orient. Le lin est annuel et autogame. Ce sont les variétés de printemps qui dominent en France mais il existe des formes d'hiver. Le lin est cultivé pour la fibre du sclérenchyme de ses tiges (lin textile) mais aussi pour ses graines oléagineuses, (lin oléagineux) dont l'huile siccative est riche en acide linoléique (C18:3) mais aussi linoléique (C18:2) et oléique (C18:0). Des variétés de lin riches en acide linoléique ont été développées (dénommées "Linola").

Le lin est une espèce principalement cultivée en France dans le Nord –Ouest du Pays. La surface cultivée en 2009 a été de moins de 56 500 ha, à comparer en Europe avec les 11 500 ha en Belgique, les 2100 aux Pays Bas et les 1500 ha du cumul de la Pologne, des Pays Baltes et de la Tchéquie. 85 % de la production française est achetée par la Chine qui transforme la fibre et la revend sur différents marchés, actuellement en crise. Le prix du lin teillé a baissé depuis la fin de la campagne 2009 de 121 €/ql à 110 € en septembre. Pour éviter les invendus, la profession a voulu limiter les surfaces 2010 qui atteignent cependant 50-53 000 ha en France (en comparaison la campagne 2004-2005 lors de laquelle 81 500 ha avaient été récoltés).

Le chanvre, *Cannabis sativa* (hem en anglais) est une plante, dioïque (à pieds mâles et femelles séparés), avec un métabolisme photosynthétique en C4 qui lui assure sa croissance très rapide. Le chanvre est également une plante de domestication ancienne, en Asie centrale, qui a été valorisée tant pour la fibre du sclérenchyme de ses tiges que pour l'huile contenue dans ses graines.

12 000 hectares de chanvre ont été cultivés en France en 2009, la fibre trouvant un usage dans les qui s'affirme dans les matériaux de construction. En relation avec la crise du secteur du bâtiment, seulement 8000 hectares ont été semés en 2010. 7 variétés de chanvre sont multipliées en France.

Le coton, *Gossypium sp.* est une malvacée à fleurs hermaphrodites, préférentiellement autogame. Quatre espèces sont cultivées : *G. arboreum* et *G. herbaceum* sont les espèces diploïdes originaires de l'ancien monde, à fibres courtes, alors que *G. hirsutum* et *G. barbadense* sont les espèces allotétraploïdes originaires du nouveau monde et à fibres longues. *G. hirsutum* domine largement la production mondiale. Les cotons sont cultivés pour

les fibres du tégument de la graine. Les fibres moins développées du duvet, constitué par les poils épidermiques de la graine, sont nommées linters et sont utilisées pour produire de la ouate hydrophile, des papiers spéciaux et des dérivés cellullosiques.

Nouvelles cultures dédiées à la production de biomasse lignocellulosique :

Ces espèces sont développées principalement pour la production de biomasse combustible ou comme matière première des futurs biocarburants de seconde génération. Certaines sont pérennes et mises en place pour dix à quinze ans, avec une quantité de biomasse récoltable progressant peu à peu les premières années. D'autres sont annuelles.

Le Miscanthus, *Miscanthus giganteus*, est une graminée pérenne d'origine asiatique au métabolisme photosynthétique en C4. Elle est multipliée et plantée sous forme de rhizomes. Le Miscanthus atteint sa pleine production après 2 à 3 ans et a une pérennité de 15 ans.

Le "switchgrass" ou panic érigé, *Panicum virgatum*, est une autre graminée pérenne en C4, originaire d'Amérique du Nord. Multipliée sous forme de petites graines, difficiles à semer, elle atteint sa production maximale après 3 ans et peut être installée pour 10 ans.

La Canne de Provence (*Arundo donax*) est une graminée à fort développement, cultivée traditionnellement dans le sud de la France pour la production d'anches d'instruments de musique à vent (lamelles vibrantes) et plantée également comme brise vent. La canne de Provence forme de gros rhizomes par lesquels on la multiplie et la transplante. Sa pleine production de biomasse est atteinte après 2 à 3 ans et sa pérennité de 15 ans.

Le sorgho, *Sorghum bicolor* est une graminée annuelle, diploïde, aux fleurs bisexuées et préférentiellement autogame. Il est originaire d'Afrique et cultivée dans de nombreuses régions du monde, le plus souvent comme céréale alimentaire. C'est une plante productive (métabolisme photosynthétique en C4) mais rustique et peu exigeante en eau. 35 à 55 000 ha de sorgho grain sont cultivés en France et il existe une sélection variétale active dans notre pays. Certains sorghos ont un fort développement végétatif (sorgho "fibre" = sorgho papier) et on les destine à des usages de production de biomasse lignocellulosique.

65 millions de tonnes de grain de sorgho ont été produits en 2008 dans le monde dont 517 000 t en Europe (source : FAO). Les statistiques françaises recensent une production de 322 000 t en France (58 000 ha, rendement de 57.6 qx/ha) alors que la FAO ne nous accorde une production que de 231 000 sur 37 000 ha !

II.4.2 – COMPOSITION DES RECOLTES

II.4.2.1 - GENERALITES

La composition de la biomasse "lignocellulosique" varie fortement en fonction de l'espèce, de l'âge et de la nature des organes récoltés. Les données disponibles sont hétérogènes, les modes de récolte et les techniques d'analyse n'étant pas toujours mentionnés dans les nombreuses références mises en avant.

Le tableau présenté ci-dessous n'a donc de valeur qu'indicative. Hormis les linters de coton qui sont composés de cellulose presque pure, les matières premières couramment disponibles présentent également des proportions importantes d'hémicelluloses et de lignine, qui justifient pleinement de chercher à valoriser ces dernières familles de molécules.

**Composition massique indicative de différentes matières lignocellulosiques
(% matière sèche)**

	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine	Cendres
<i>Biomasse lignocellulosique</i>	25-65	8-40	11-35	
Résineux (Pin)	38-42 (45)	(7-15) 20-24	27-29 (34)	
Feuillus (Peuplier, etc.)	(38) 40-49 (50)	16-27	20-24 (30)	
Paille de blé	30-43 (49-54)	22-35	15-23	4-9
Rafle de maïs	35-41	20-27	12-17	
Bagasse	38-40 (44)	23-34	11-25	1.5-5
Linters de coton	80-85	1-3	-	
<i>Données médianes du programme REGIX (arrondies, hors données extrêmes) :</i>				
Céréales plante entière immature ¹	23-32	15-21	8-11	5-6.5
Céréales plante entière à maturité ¹	24-35	17-20	9-14	5-6.5
Pérennes récoltées vertes ²	35-40	19-23	14-18	3.5-5
Pérennes récoltées sèches ²	35-50	23-25	17-21	2-3
Plaquettes de résineux ³	36-41	19-22	27-28	0.8-2.1
Plaquettes de feuillus ⁴	44-51	17-23	22-26	1-2.5
TCR ⁵	52-63	13-19	18-22	1.6-2.4
TTCR ⁶	48-54	15-17	18-21	1.4-4.4

1 : maïs, sorghos sucrier, fibre et fourrager 2 : Miscanthus, Switchgrass et canne de Provence; 3 : pin, épicéa, sapin ; 4 : charme, chêne, hêtre, peuplier, tilleul ; 5 : Taillis à courte rotation (< 5 ans) de saule, eucalyptus, peuplier, robinier ; 6 : Taillis à très courte rotation

Source : diverses dont REGIX

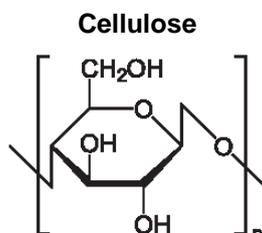
Les avancées permises en France par le programme REGIX

Dans de nombreux pays, des programmes importants de valorisation de la biomasse lignocellulosiques ont été initiés sans que l'on dispose vraiment de données concrètes et homogènes (au moins localement) du potentiel agronomique, de la composition des récoltes et des contraintes de mobilisation des différentes catégories de matières premières considérées.

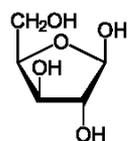
C'est ce vide que le programme de quatre ans REGIX a eu pour but de commencer à combler. Il a réuni des partenaires des filières agricoles (Arvalis Onidol) et forestières (FCBA, ONF, Union de la Coopération Forestière Française) qui n'avaient jamais eu l'occasion de travailler ensemble. L'ADEME et l'ANR ont soutenu le projet. Un réseau expérimental a été constitué sur l'ensemble du territoire français dans lequel les différentes cultures ont été mises en place, cultivées, récoltées et analysées. Des évaluations des contraintes et du coût global de la mobilisation ont été réalisées.

II.4.2.2 – PRINCIPAUX CONSTITUANTS DE LA BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE

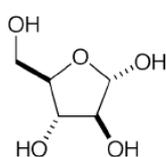
La cellulose est un polymère de glucoses reliés par des liaisons de type β (1-4). Elle diffère ainsi de l'amidon dont les liaisons sont en α -(1-4) et α -(1-6). Les chaînes élémentaires de cellulose sont liées entre elles par des ponts hydrogènes et forment ainsi des microfibrilles qui s'ordonnent dans des ensembles comprenant une partie cristalline et une partie amorphe.



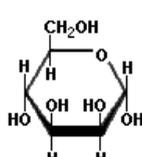
Les hémicelluloses constituent une famille assez large de polymères amorphes d'oses en C5 (xylose, arabinose) et C6 (mannose, galactose, glucose) sous forme d'homo ou d'hétéropolymères. Leur la composition précise varie suivant les espèces végétales.



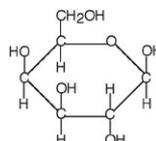
xylose



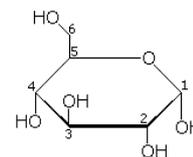
arabinose



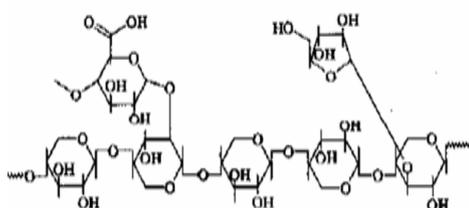
mannose



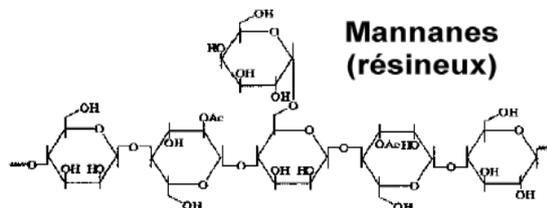
galactose



glucose



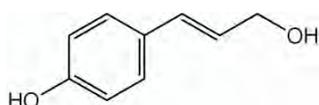
Exemples de xylanes



**Mannanes
(résineux)**

Exemples de mannanes

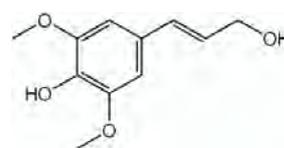
Les lignines (lignins en anglais) sont des polymères réticulés amorphes, à haut poids moléculaire. Elles sont constituées principalement de trois unités en C9 de type phénylepropane : les alcools coumarylique, coniférylique et sinapylique qui sont elles-mêmes assemblées en différentes sous unités. Les lignines sont les seuls constituants majeurs de la biomasse végétale composés de molécules aromatiques.



Alcool coumarylique
(coumarylic alcohol)

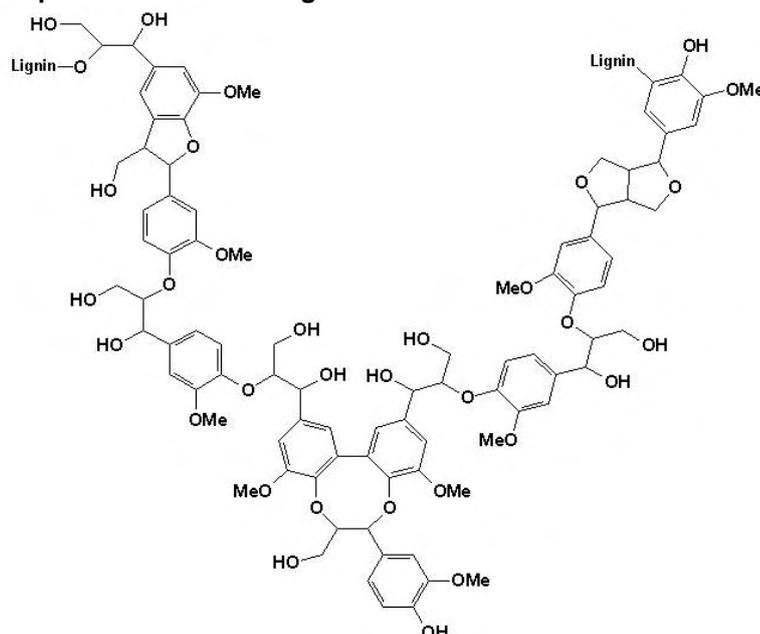


Alcool coniférylique
(coniferyl alcohol)



Alcool sinapylique
(cinalpyl alcohol)

Exemple de structure de lignine



Au-delà de ces trois composants de base, **le bois** renferme également :

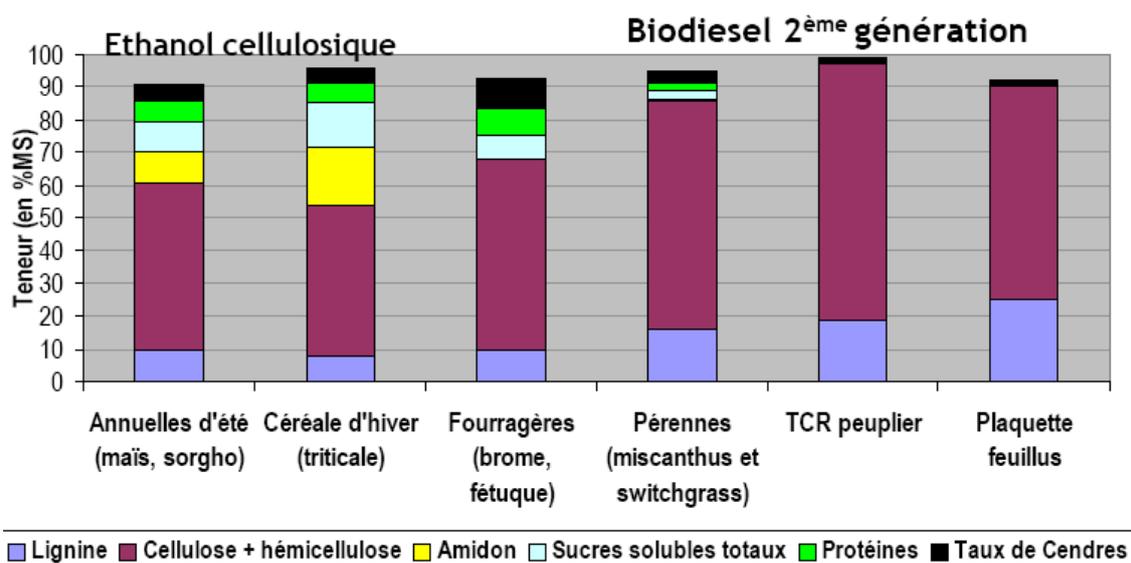
- des tanins et de substances colorées (en concentrations exploitables, principalement chez les feuillus, comme le chêne et le châtaignier et chez diverses espèces d'arbres exotiques comme le Quebracho et certains vrais acacias),
- des composés terpéniques.
- des protéines qui ne demeurent qu'en faible quantité dans le tissu mort.
- des constituants mineurs (alcaloïdes, aldéhydes,).

Les pailles de céréales et les parties végétatives de graminées pérennes sont inégalement riches en cendres (2 à 7 %), celles-ci pouvant contenir du chlore et du soufre en quantités non négligeables, en fonction des fertilisants et des pesticides reçus par la culture. Les pailles de céréales renferment des quantités importantes de potassium dont les exportations doivent être compensées par une fertilisation appropriée.

Les céréales récoltées sous forme de plante entière contiennent naturellement de l'amidon en quantités importantes (4 à 29 % dans les expérimentations REGIX) et des sucres solubles qui diminuent, comme on peut s'y attendre, avec le stade de récolte (9 à 16 % passant à 2 – 8 %). La teneur en protéines avoisine les 6 %.

La composition des différentes ressources lignocellulosiques les prédisposent ou non à certaines transformations. Les cultures annuelles en plantes entières seraient plutôt adaptées à la production d'éthanol cellulosique alors que les cultures pérennes comme le Miscanthus et le switchgrass, plus proches du bois dans leur composition, seraient de bonnes candidates pour les procédés BtL (Biomass to liquid). Les cultures fourragères étudiées dans le cadre de REGIX ont des propriétés intermédiaires.

Qualité de la biomasse cellulosique pour les biocarburants de seconde génération



Source : GIE Arvalis/Onidol. Résultats obtenus dans le cadre du programme REGIX.

II.4.3 – IMPORTANCE DE LA RESSOURCE ET DES RECOLTES

Forêt - bois

La forêt est un ensemble très hétérogène car elle rassemble des cultures monospécifiques d'eucalyptus ou de pin aussi bien que des écosystèmes non - ou peu - exploités.

Les superficies forestières mondiales représentent 3.9 milliards d'hectares dont 830 millions en Amérique du Sud, 810 millions dans les pays d'ex-URSS, 780-734 millions en Asie-Océanie, 700 millions en Amérique du Nord, 635 millions en Afrique et 192 millions en Europe.

Forêt européenne

La forêt de l'Europe des 27 couvre 155 millions d'hectares, inégalement répartis suivant les pays. La France est le 4^{ème} pays d'Europe par la surface forestière mais le 3^{ème} derrière la Suède et l'Allemagne pour les volumes de bois sur pied (exprimés ci-dessous en millions de mètres cubes sur écorce).

La forêt européenne

Pays	Surface forestière (Mha)	% surface du pays	Mm ³ sur écorce
Suède	27.5	67	3155
Finlande	22.5	74	2158
Espagne	17.9	36	888
France	15.5	28	2465
Allemagne	11.1	32	2880
Italie	10.0	34	1447
Pologne	9.2	30	1864
UE à 27	155.0	37	22580

Source : Mémento FCBA, d'après FAO, 2007.

La forêt française couvre 15 millions d'hectares (bois et forêts de plus de 0.5 hectare) auxquels s'ajoutent près de 2 millions d'hectares de superficies boisées hors forêts.

A titre de comparaison, nos surfaces cultivées occupent un total de 19 Mha - dont 9.4 Mha en céréales (grain) et 2.2 Mha en oléagineux – et les surfaces bâties, revêtues et artificialisées représentent 4.8 Mha (en croissance régulière).

Les trois quarts de nos surfaces forestières sont privées et présentent des intensités d'exploitation extrêmement variables. La production biologique de nos forêts est de 102 millions de m³ de bois sur écorce par an, dont 56 millions pour les feuillus et 45 millions pour les résineux. La production moyenne par hectare et par an est de 19.7 m³ pour le douglas (7.5 t de bois sec), 15.1 m³ pour le sapin ou l'épicéa (5 t), 11.8 m³ pour le pin maritime (3.8 t) et 5.6 m³ pour le chêne (2.75 t).

Les arbres sur pied et les grumes sont évalués pour leur volume de bois, sur ou sous écorce, alors que la biomasse se comptabilise en tonnes et la biomasse énergie en tep (tonnes équivalent pétrole). En dépit de l'existence de coefficients de conversion moyens, les correspondances ne sont pas toujours faciles à établir, les taux d'humidité variant considérablement entre le bois sur pied puis au cours du stockage avant transformation.

Répartition des surfaces boisées en France



Source : memento FCBA d'après données IFN.

Les ressources en bois en France pour les bioraffineries de seconde génération

Une part importante du gisement d'origine forestière est aujourd'hui inexploitée. Elle rassemble des **bois et des forêts ne faisant l'objet d'aucune activité de gestion** mais aussi les **rémanents forestiers** (branches, houppiers, souches, etc.) abandonnés sur place lors des exploitations. Certaines premières coupes d'éclaircie ne sont parfois pas réalisées et

constituent des volumes inutilisés non négligeables. Plusieurs limites et contraintes de valorisation de l'ensemble de ce potentiel doivent être prises en considération :

- **De nombreux propriétaires privés forestiers restent réticents à faire exploiter leurs bois ou leurs forêts** qui ont à leurs yeux avant tout un caractère d'agrément et de patrimoine. Aucune de nos politiques forestières n'a jamais été assez volontariste au point d'oser pénaliser celui qui laisse ses bois à l'abandon. Une part importante de nos ressources forestières reste ainsi durablement sans aucune valorisation.
- **La mobilisation de nouvelles ressources en bois se révèle difficile** dans la pratique. Les opérateurs manquent, les voies d'accès aussi. **Le plus "facile" reste de récolter les rémanents dans les forêts déjà exploitées.**

Des travaux du CEMAGREF ont permis d'évaluer les quantités de rémanents pouvant être exportées de façon durable des forêts sans dégrader la fertilité de leurs sols. Les situations sont très variables. Sur certains sols sensibles, il faut éviter d'exporter les rémanents ou compenser leur récolte par des apports d'engrais minéraux. A l'inverse sur les sols peu sensibles, on peut récolter des rémanents deux fois dans la vie des peuplements résineux (au dépressage et lors de la coupe finale) et sans grandes restrictions dans les futaies de feuillus. On retiendra que la ressource mobilisable de façon durable est bien inférieure à celle théoriquement disponible. De bonnes pratiques peuvent avoir une grande importance pour limiter les exportations minérales (laisser les rémanents sécher sur place et restituer ainsi au terrain les feuilles ou les aiguilles).

A dire d'experts, la ressource disponible en France pour produire des plaquettes forestières serait de 10 millions de m³, volume considérable mais néanmoins très inférieur à la précédente évaluation de 30 millions de m³ de l'étude réalisée par l'ADEME-SOLAGRO.

- **Les concurrences d'usage vont en se renforçant.** Différents programmes sont mis en œuvre par l'ADEME et les pouvoirs publics depuis plusieurs années pour promouvoir le chauffage au bois et la cogénération de chaleur et d'électricité à partir de la biomasse (plans bois-énergie, CRE, Fonds Chaleur, BCIA). Plusieurs connaissent un grand succès mais les échecs de certains projets importants ont montré qu'un plan de mobilisation défini sur le papier peut se révéler difficile à mettre en œuvre. A l'échelle régionale ou nationale, la concertation est souvent insuffisante entre les parties prenantes, les différents utilisateurs de la ressource se retrouvant en compétition importante pour celle-ci.

A titre d'exemple, on peut citer l'évolution de l'usage des connexes (coproduits) de scierie. Ceux-ci comportent des écorces, des sciures, des copeaux et des chutes diverses, souvent broyées sous forme de "plaquettes de scierie". Il y a une quinzaine d'années encore, nombreux étaient les scieurs qui étaient encombrés par ce qui était considéré comme un ensemble de déchets coûteux. Les industries dites de trituration du bois ont développé leur consommation de sciures pour fabriquer des panneaux de particules et celle de plaquettes de scierie pour la production de pâte à papier. Des camions de sciures ou de plaquettes – achetés à bon prix – pouvaient descendre de Bretagne jusque dans les Landes de Gascogne, région où la ressource, apparemment très abondante, est toujours limitante compte tenu de la densité locale d'industries utilisatrices. Le développement du séchage des sciages à partir de la combustion des connexes dans les scieries et l'essor de la filière des granulés de bois combustibles ont entraîné une forte concurrence d'usage sur la majorité de ces coproduits, renchérissant considérablement leur prix pour tous les industriels utilisateurs. Le développement des usages des farines de

bois dans des matériaux composites ne fera qu'accroître les tensions sur les prix. La valorisation de l'ensemble du gisement n'a pas fait l'objet de concertation nationale. Les chiffres ci-dessous montrent que les tensions existent déjà, avant le développement de tout nouvel usage.

- Les scieries de résineux françaises produisent par an 5.3 Mt de connexes, soit 1.6 Mt de sciures + 3.7 Mt de plaquettes de scieries humides. Les scieries de feuillus pour leur part produisent environ 1.1 Mt de connexes.
 - Le total disponible est par la suite de 6.4 Mt.
 - La trituration française a consommé en 2007, 6.6 Mt de connexes. La France était ainsi déjà déficitaire si l'on prend en compte le développement du granulé de bois.
 - Les tonnages de ce dernier sont en forte croissance et, en 2010, le granulé de bois devrait consommer 1 Mt de bois humide.
 - Entre temps, la trituration française a réduit ses activités en conséquence de la crise. Ses consommations reprennent aujourd'hui. La tension sur les marchés est donc très forte et ne retombera pas, hormis si une grosse usine de trituration ferme ses portes. Les différents acteurs devront augmenter leur part d'utilisation de rondins d'éclaircie. Aucune ressource n'est disponible pour de nouveaux usages.
- **La gamme de qualités de produits forestiers utilisables dans des transformations de seconde génération dépendra des process mis en œuvre** (thermochimique ou biochimique). Une matière première comprenant des aiguilles, des feuilles, des écorces, voire des résidus de terre, ne pourra être traité comme une paille proprement récoltée ou des chutes de bois

Les taillis à courte (TCR) et très courte rotation (TTCR)

Un TTCR de saule non irrigué, est récolté tous les 3 ans, à raison (au mieux) de 36 t de ms/ha (soit 12 t/ms/an). Il sera laissé en place au plus 24 ans (8 rotations de 3 ans). Un TTCR irrigué peut être récolté tous les 2 ans et produire jusqu'à 38 t de ms/ha (soit 19 t ms/ha/an).

Les "nouvelles" cultures énergétiques représentent aujourd'hui des surfaces très faibles et l'intérêt des démarches comme celle du programme REGIX est de définir leurs aptitudes et leurs rendements potentiels dans les différentes conditions pédoclimatiques de notre pays.

Rendements de cultures énergétiques (t ms/ha/an) obtenus dans le cadre de REGIX

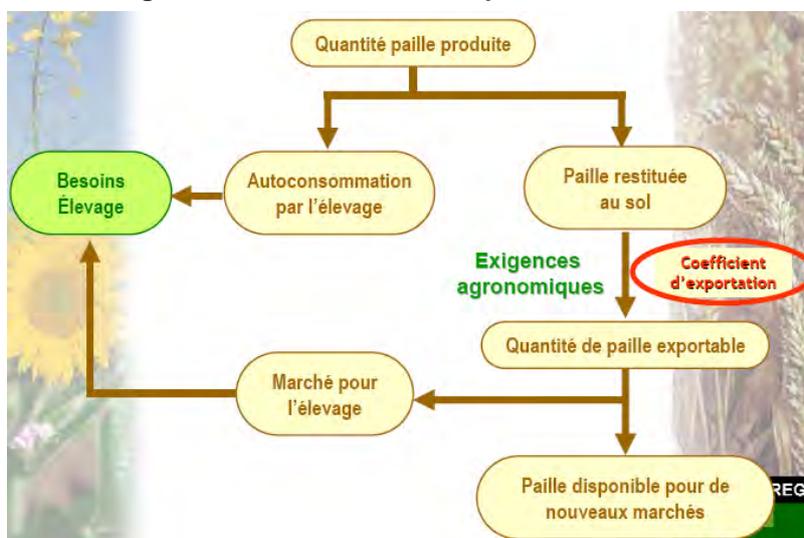
	Rendement			Commentaires
	biologique médian	Récoltable	potentiel	
Miscanthus	15.4	12	20 t en récolte d'automne, 15 t en récolte d'hiver	Perte de matière sèche lors du dessèchement sur pied mais gains sur le séchage
Switchgrass	13.2	10.5	18 t en récolte d'automne, 14 t en récolte d'hiver	Perte de matière sèche lors du dessèchement sur pied mais gains sur le séchage
Sorgho fibre H133	14.4	12.5	8 à 19 t suivant les régions	Meilleures performances dans le Sud de la France
Canne de Provence	13.9	11.1	20	
Triticale plante entière	12.9	10.3	16-18	Meilleures performances dans le Nord de la France

Pailles de céréales

En France, les cultures céréalières produisent entre 8 tonnes (orge) et 12 tonnes (triticale) de matière sèche à l'hectare (10 t pour le blé) dont la moitié est récoltable. Le rendement en pailles exportables de la parcelle est donc de 5 tonnes de matière sèche pour le blé. Le taux d'humidité est classiquement de 12 à 15 %.

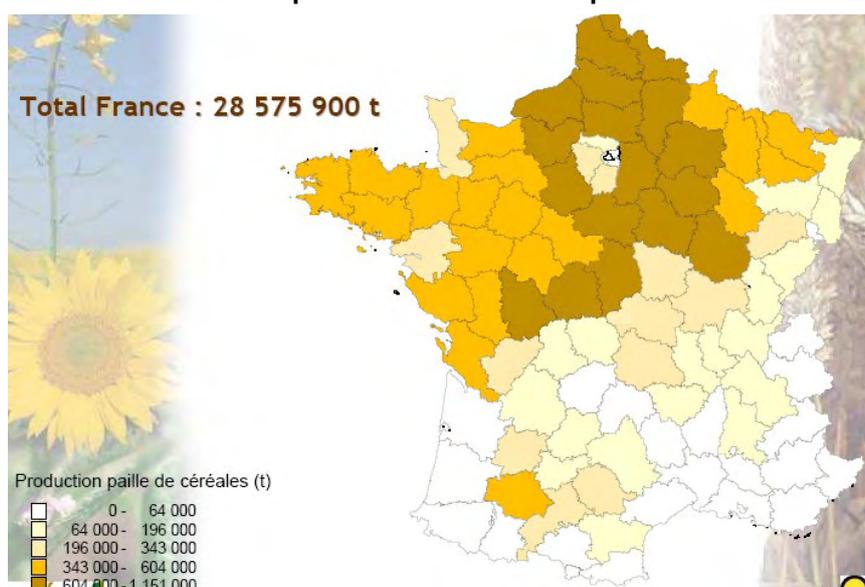
Dans le cadre du programme REGIX, le GIE Arvalis-Onidol a évalué les ressources en pailles mobilisables pour de nouveaux usages en tenant compte des besoins pour l'élevage mais aussi des nécessaires restitutions en matière organique aux sols, pour maintenir une fertilité et un taux d'humus convenable. **Le gisement théorique est de plus de 28.5 millions de tonnes, mais la partie mobilisable ne dépasse pas 3.3 millions de tonnes.** Elle devra fournir tant les filières biocarburants de seconde génération que celles de production de chaleur et celles – encore limitées mais prometteuses - de matériaux à base de paille.

La gestion des ressources en pailles de céréales



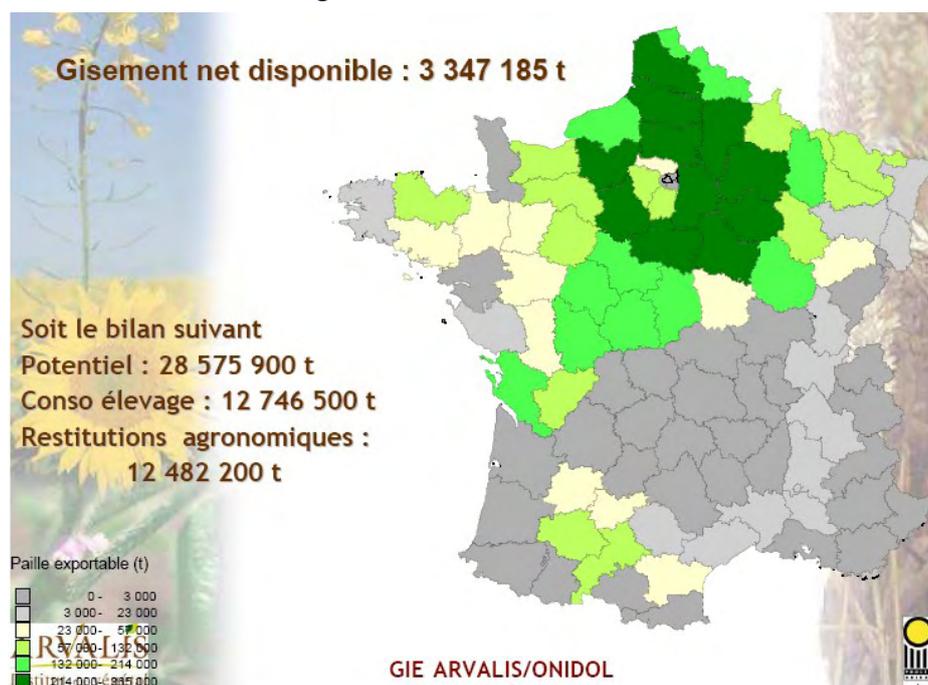
Source : GIE Arvalis-Onidol

Quantités théoriquement récoltables de pailles en France



Source : GIE Arvalis-Onidol

Et gisement net mobilisable ...



Source : GIE Arvalis-Onidol

II.4.4 – DESCRIPTION DES FILIERES LIGNO-CELLULOSIQUES

II.4.4.1 - RAPPELS SUR LA FABRICATION DE LA PATE A PAPIER

Il existe deux technologies de base pour préparer les fibres du papier à partir du bois :

- **La fabrication de pâte mécanique** (en anglais, mechanical pulp) s'effectue en pressant des billes de bois écorcées sur des meules abrasives (défibreurs), animées d'un mouvement de rotation, ou en broyant des copeaux de bois entre deux plaques tournantes rainurées en acier ou entre une plaque stationnaire et une plaque tournante (raffineur). Ces types de pâte sont appelés respectivement pâte mécanique-meule (PMM) et pâte mécanique de raffineur (PMR). Les pâtes de type mécanique sont utilisées pour la fabrication de produits nécessitant peu de résistance, tels que le papier journal, les papiers hygiéniques, etc.

Dans ces pâtes, la lignine n'est pas éliminée (ce qui explique le jaunissement à la lumière des papiers concernés). Il y a peu de coproduits générés lors de la fabrication de pâte.
- **La mise en pâte chimique** (chemical pulp) a pour but de séparer les fibres de cellulose de la lignine au moyen d'agents chimiques, au cours d'une cuisson dans des autoclaves (lessiveurs) qui reçoivent les réactifs et de la vapeur. L'action de la chaleur et des produits chimiques permet de libérer les longues fibres du bois sans les briser.

Les principaux procédés de préparation des pâtes chimiques sont le **procédé kraft à base alcaline au sulfate** et le **procédé au bisulfite**.

Les pâtes chimiques sont utilisées pour la fabrication de produits qui demandent une grande résistance, tels que les papiers d'impression et d'écriture, les papiers fins, les

papiers et cartons d'emballage et les papiers spéciaux. Elles sont aussi utilisées pour augmenter la résistance de certains produits tels que les papiers spécialisés.

La technologie de fabrication des pâtes chimiques a pour objectif d'isoler la cellulose. On retrouve donc dans ses coproduits la majorité des autres composants du bois. Certains sont valorisables pour des applications spécifiques mais la plus grande partie est brûlée pour générer l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'usine mais aussi régénérer les produits chimiques de cuisson.

Les usines papetières produisent en effet de l'énergie pour alimenter les chaufferies nécessaires à leur process mais aussi pour entraîner des turbines électriques. La base de cette énergie est la combustion de produits connexes du bois, non utilisables pour la production de pâte (écorces, ...) mais aussi des coproduits riches en composés organiques (liqueurs noires).

La compétition se développe entre les deux fonctions : celle de production de pâte à papier et celle de production d'énergie. Cette dernière connaît un renchérissement régulier alors que la valeur de la pâte à papier subit de fortes variations cycliques.

Les coproduits de la papeterie contiennent des composés que l'on peut extraire directement du bois. Le choix de la source "bois" ou de la source "coproduit de la papeterie" est principalement d'ordre économique mais pas exclusivement. Les coproduits, généralement moins chers, peuvent ainsi être contaminés par les réactifs utilisés lors du process.

Le procédé Kraft

Le procédé Kraft domine la fabrication des pâtes chimiques. Il consiste à mener une hydrolyse alcaline contrôlée à chaud des liaisons entre la cellulose et les autres composants du bois (hémicelluloses et lignine principalement).

Les copeaux de bois sont pré-étuvés à 70°C. Les composés volatils sont récupérés dès cette étape (**essence de térébenthine**). Le bois est alors mis en contact avec la **liqueur blanche** qui contient de la soude caustique (NaOH) et du sulfure de sodium (Na₂S). La soude a une fonction hydrolytique. Le sulfure de sodium protège la cellulose de l'oxydation par ses propriétés réductrices et a une action propre de délignification en formant avec la lignine des thiolignines.

La cuisson dans le "lessiveur" (à 160°C, pendant 6 à 8 heures) permet de séparer une fraction solide, concentrée en cellulose, de la **liqueur noire** qui renferme principalement divers dérivés de lignine sous forme de sulfures ainsi que d'autres composés. Par décantation de la liqueur noire, on extrait le **tall oil**, riche en acides gras, en acides résiniques et en stérols. Le résidu de liqueur noire est séché et brûlé. Cette dernière opération permet non seulement de produire de l'énergie mais aussi de recycler la très grande majorité des réactifs. Après une combustion à 1200°C, on obtient une liqueur verte constituée de Na₂CO₃ et de Na₂S. La soude est régénérée par addition de chaux :



Le carbonate de calcium précipité est envoyé dans un four pour régénérer la chaux.

Le papier kraft garde une proportion non négligeable de lignine et contient également des hémicelluloses.

Le procédé kraft non blanchi domine très largement le secteur car il permet d'obtenir des pâtes de qualité pour des produits finaux de bonne résistance mécanique. Il est autonome en énergie et assure un très bon recyclage des réactifs.

Une variante du procédé Kraft (Prehydrolysed Kraft = PHK) comprend une préhydrolyse de la matière par étuvage à haute température qui permet la séparation

des hémicelluloses et d'obtenir ainsi de la cellulose de bonne pureté mais à faible degré de polymérisation et destinée donc à des applications particulières. Ce procédé n'est pas utilisé dans les usines françaises.

Le procédé au bisulfite

Ce procédé a largement perdu de son importance dans la production mondiale (5 % ?) mais **il permet l'obtention de cellulose plus pure**, apte à des transformations chimiques. En France, seule l'usine de Tartas du groupe Tembec l'utilise. Le traitement chimique du bois est cette fois-ci acide. L'agent de cuisson est du bisulfite de sodium (NaHSO_3), de calcium, $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$, de magnésium $\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2$ ou d'ammonium NH_4HSO_3 .

Les coproduits sont différents. Les composants du tall oil (résines, acides gras) ne sont pas extraits lors de la cuisson. Les liqueurs noires contenant la lignine sulfonée sont en majorité brûlées avec un recyclage du dioxyde de soufre. Elles constituent une source d'énergie. Ces liqueurs peuvent être également utilisées pour la production de **lignosulfonates** dont les propriétés de liant sont valorisées dans différentes applications industrielles. Certains composés terpéniques volatils (paracymène) peuvent être également récupérés lors de la détente de la liqueur noire, en sortie de cuisson.

II.4.4.2 - SCHEMA GENERAL DE LA FILIERE

Le schéma présenté en annexe positionne les produits et les coproduits des filières lignocellulosiques en détaillant particulièrement ceux, très spécifiques, associés à la production de pâte à papier mais aussi au gemmage des pins.

Les filières lignocellulosiques ont avant tout une fonction de production d'énergie (bois de feu, charbon de bois) et de matériaux. Selon la FAO, 1.76 milliards de m^3 de bois de feu auraient été produits en 2007 pour 1.6 milliards de m^3 de bois ronds.

Ces filières sont souvent présentées comme nécessitant moins d'intrants que les filières agricoles. Si leur exploitation est intensive, l'équilibre n'est durable que lorsqu'une part importante de la biomasse est restituée au sol ou que celui-ci reçoit des fertilisants, d'autant plus qu'il est pauvre en nutriments.

Les fibres matériaux

Les usages directs du bois comme matériau sont connus, qu'il soit valorisé sous forme de bois massif mais aussi de bois déroulé (contreplaqué, placages) ou dans des panneaux de process ou de particules.

Les pailles de blé peuvent être utilisées directement pour la production de panneaux isolants. C'est l'activité de la société **Stramontec** (cf. II.1.5.1). Plusieurs fibres végétales (bois, chanvre ...) peuvent être également intégrées à des matériaux composites à base de béton.

Les fibres végétales peuvent être utilisées pour renforcer des polymères thermoplastiques en modifiant au préalable légèrement leurs fonctions d'interfaces. Dans les compounds obtenus, ce peuvent être le polymère ou la fibre végétale qui sont majoritaires suivant les propriétés recherchées.

La farine de bois peut être incorporée dans des thermodurcissables phénoliques jusqu'à 30 à 40 %. Elle peut être également utilisée en composite avec le polyéthylène (PE) mais aussi avec le PVC, les taux d'incorporation pouvant atteindre 20 à 30 %. Le marché potentiel est considérable, celui du PVC atteignant 2 à 3 Mt en France. La farine

de bois peut être incorporée également à du polystyrène ou polyméthacrylate. **Les fibres de chanvre** sont utilisées dans des composites à base de polypropylène (PP) ou d'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), alors que **les fibres de lin** sont mélangées à du polyéthylène. L'association **Fimalin** réunit les acteurs de toute la filière lin en Normandie. **Arkema** est partie prenante. Des compounds comprenant des fibres de lin ainsi que du Rilsan® ou du PVC sont à l'étude.

La cellulose. Ses dérivés constituent des produits à la fois anciens (viscose, rayonne) et d'avenir. La cellulose issue du bois est en compétition avec celle provenant des "linters" de coton, naturellement plus pure.

Dans les procédés de seconde génération utilisant la voie biochimique, la cellulose devient le précurseur direct du glucose et dans un avenir industriel à définir, tous les dérivés de ce dernier devraient pouvoir provenir également de la biomasse lignocellulosique.

Les hémicelluloses et les lignines ne sont pas des produits commercialisés à ce jour en tant que tel mais elles sont contenues dans les produits ou coproduits de la filière et pourraient à terme être les précurseurs de certains bioproduits pouvant être très spécifiques. Les hémicelluloses contiennent en effet une forte proportion de sucres en C5 (feuillus) ou en C6 (résineux) alors que les lignines sont les seules sources de molécules aromatiques (phénoliques) disponibles en très grandes quantités dans la matière vivante.

Les coproduits de l'industrie papetière proviennent essentiellement de la fabrication de pâtes chimiques à partir de bois de résineux selon le procédé kraft. Ils comprennent :

- Les **lignosulfonates** ou **acides lignosulfoniques**, issus de la concentration des liqueurs noires acides du procédé au bisulfite. Ils ont des propriétés liantes et tensioactives. Les volumes produits sont considérables : une usine comme celle de **Tembec** à Tartas produit 150 000 t de pâtes et 100 000 t de lignosulfonates humides = 50 000 t sèches dont les ventes sont indispensables à l'équilibre économique de l'unité. Le double de ces dernières quantités est consommé dans l'usine pour produire l'énergie nécessaire à son fonctionnement.
- De ces liqueurs noires acides, on peut obtenir par fermentation de l'éthanol de haute pureté (10 millions de litres par an sur le site de **Tembec** – Témiscaming, au Québec).
- **L'essence de térébenthine de papeterie** = essence de papeterie (en anglais : turpentine) est la fraction de composés volatils du bois, séparée dès le début du processus de cuisson du bois, lors du pré-étuvage. Ces composés, parmi lesquels de nombreuses molécules terpéniques, peuvent être obtenus directement par gemmage des diverses espèces de pins. Dans ce cas, ils offrent l'avantage de ne pas être chargés en soufre comme les produits issus de papeterie qui nécessitent un raffinage délicat. Bien que plus onéreux, les produits de gemmage sont recherchés pour des applications en parfumerie.

En France, le gemmage, coûteux en main d'œuvre, s'est arrêté en 1970. Il se poursuit en Chine, au Brésil et en Indonésie. La profession française avait mené des projets de développement de techniques optimisées de gemmage, semi-mécanisées dans le cadre d'un projet Européen "Eurogemme" mais elles restent non compétitives à ce jour.

- **Le tall oil**, issu de l'écumage des liqueurs noires, renferme un grand nombre de molécules, principalement des savons d'acides gras et d'acide résinique (= colophane = rosin en anglais) ainsi que des stérols.

Le mot "tall oil" provient du Suédois "tallolja" qui signifie "huile de pin".

On notera que le gemmage permet d'accéder à l'essence de térébenthine et à la colophane du bois mais pas aux acides gras et aux stéroïdes qui ne se retrouvent que dans le tall oil. La gomme renferme environ $\frac{3}{4}$ de colophane et $\frac{1}{4}$ d'essence de térébenthine.

Pour être plus précis, les industriels du secteur parlent de Colophanes de Gomme (Gum rosin) ou de Colophanes de Tall oil (Tall-oil rosin), d'essences de térébenthine de Gomme (Gum Turpentine) ou d'essences de térébenthine de papeterie (Crude sulfate Turpentine).

- Les autres composants organiques de la liqueur noire alcaline sont des hydrolysats de lignine qui n'auraient pas de valorisation possible autre qu'énergétique.

II.4.4.3- ECONOMIE DE LA FILIERE PAPETIERE

La production mondiale de pâte à papier avoisine les 190 millions de tonnes, en croissance assez lente, avec des baisses ponctuelles en période de crise. En réalité, d'importantes redistributions géographiques de la production sont en cours. L'Europe stagne, l'Amérique du Nord baisse alors que les développements se font en Amérique latine (production largement tournée vers l'export dans des pays comme le Chili) et en Asie (pour servir la consommation régionale).

Production de pâtes à papier (x 1000 t)

Région	2004	2005	2006	2007	2008
France	2547	2564	2466	2375	2340
Union Européenne	37246	36205	41312	41392	39279
Total Europe	50556	49613	51432	51494	49111
Amérique du Nord	79991	78313	76892	75776	71778
Amérique latine	15001	15688	16682	18562	20394
Asie	37066	39398	41638	42525	45340
Autres	5882	5967	5647	5853	5795
Production mondiale	188234	188710	192169	194210	192418

Les pays du Nord de l'Europe sont les plus importants producteurs de cette région. La France ne vient qu'en 5^{ème} position, au même niveau que l'Espagne.

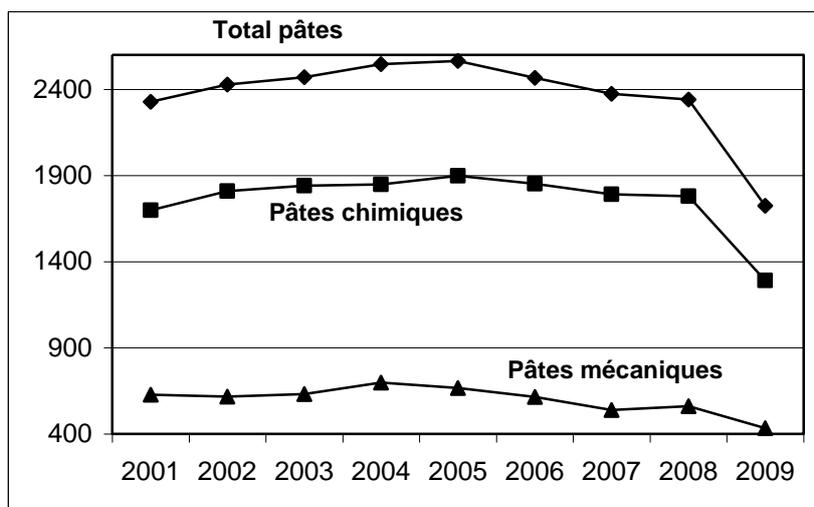
Principaux pays producteurs de pâte à papier en Europe (2009)

Pays	Production (Kt)
Suède	11 467
Finlande	8 735
Portugal	2 552
Allemagne	2 552
France	1 725
Espagne	1 725
Norvège	1 690
Autriche	1 546
Autres	3 990

Source : CEPI

La production française souffre de la concurrence d'autres régions dans lesquelles les unités de production sont plus importantes et offrent de meilleures économies d'échelle. Le nombre d'usines de production de pâte a baissé de 19 en 1998 à 12 en 2010. Les pâtes chimiques dominent largement la production française mais présentent aussi les baisses de volumes les plus importantes.

Evolution récente de la production française de pâtes à papier (Kt)



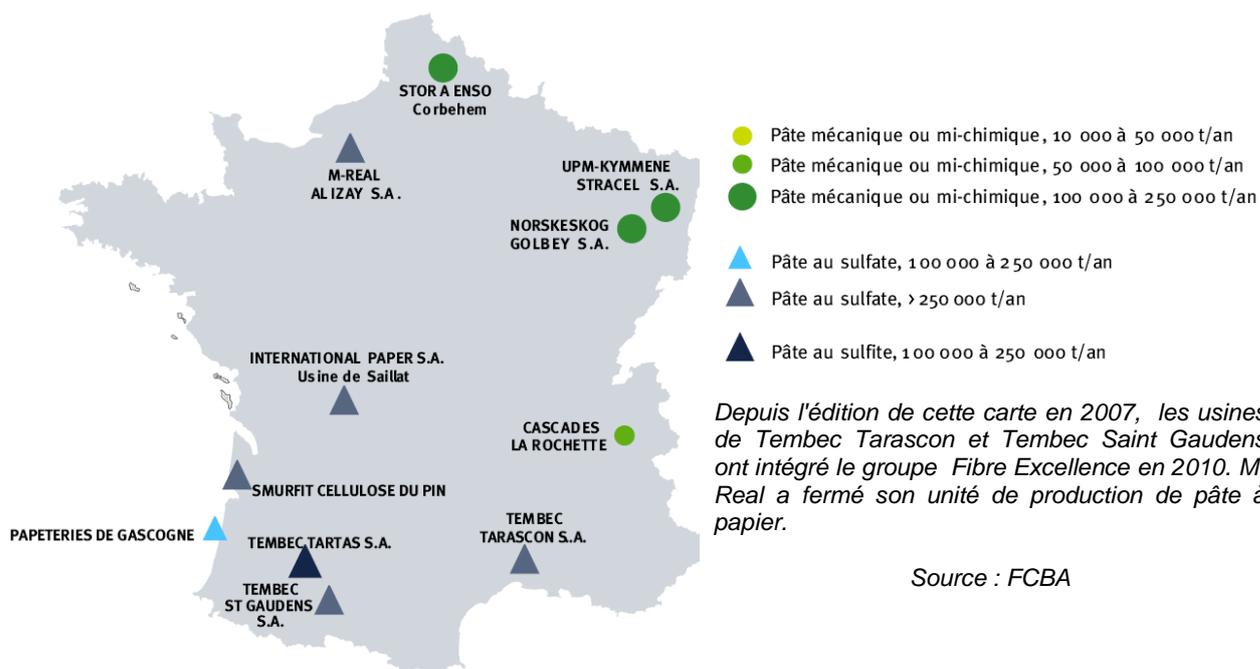
Source : Copacel

La consommation de bois pour la production de pâte de bois a été de 8.3 millions de tonnes en 2008 et de 6.3 M t en 2009.

Evolution récente de la production et des échanges de pâtes à papier en France

Rubrique	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Nombre d'usines	17	17	16	15	14	12
Production de pâtes (Kt)	2547	2564	2466	2375	2340	1724
Importations (Kt)	2098	2048	1949	1863	1763	1745
Exportations (Kt)	595	517	519	527	469	407
Consommation de bois pour la production (Kt)	9036	9374	8820	8327	8310	6259

Répartition des usines de production de pâtes de cellulose en France



Source : FCBA

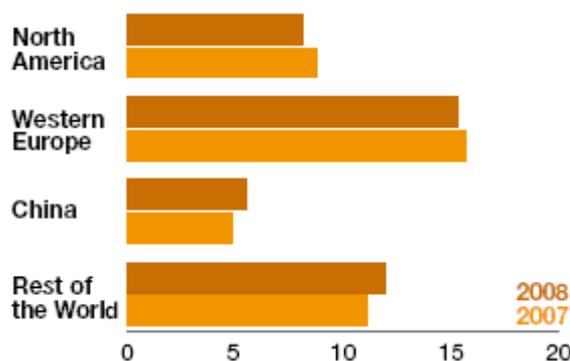
La pâte à papier "marchande", commercialisée en l'état, fait l'objet de cotations qui font office de référence. Le cours de la NBSK "Northern Bleached Softwood Kraft", pâte chimique kraft de résineux américains, côté en dollars, est celui le plus fréquemment utilisé pour suivre l'évolution des marchés. Les prix de la pâte à papier sont par nature cycliques car les capacités de production et la demande s'adaptent l'un à l'autre avec un décalage dans le temps. **En 2010, les cours se sont fortement redressés, dépassant les 955 \$/t en juin.** Le commerce mondial de pâte représente quelques 50 millions de tonnes.

Evolution récente du cours de la pâte à papier NBSK (\$ US par tonne), avant la forte remontée de 2010



Source : PricewaterhouseCoopers LLP à partir de RISI-PPI

Commerce mondial de pâte à papier (millions de tonnes)



Source : PricewaterhouseCoopers LLP à partir de RISI-PPI

II.4.4- LES INDUSTRIELS DE LA FILIERE PAPETIERE ET DU RAFFINAGE DE SES COPRODUITS

L'industrie papetière est en restructuration et en concentration régulière à l'échelle mondiale. Certains industriels commercialisent avant tout des produits élaborés (papiers, cartons). C'est le cas du leader mondial nord-américain **International Paper**, de **Stora Enso** (Suède) et **d'UPM-Kymmene** (Finlande), etc. A l'inverse, certains acteurs sont de gros vendeurs de pâte comme **Fibria** (Brésil), **Weyerhaeuser** (USA), **Arauco** (Chili), **Tembec** (Canada), **Södra** (Suède)...

Hormis le groupe **Gascogne**, les producteurs de pâte de cellulose actifs en France ont pour actionnaires des groupes étrangers.

➤ **Pâtes mécaniques et thermomécaniques**

- **Cascades** (groupe Cascades, Canada), à La Rochette (73).
- **UPM-Kymmene France** (Groupe UPM, Finlande) à Stracel (67).
- **Norske Skog** (groupe Norske Skogindustrier, Norvège) à Golbey (88).
- **Stora Enso** (groupe finno-suédois) à Corbehem (62).

➤ **Pâtes chimiques**

- **Fibre Excellence** (Société Paper Excellence BV (Pays Bas), groupe Asia Pulp and Paper - Sinar Mas, Indonésie). Deux usines (rachetées en 2010 à Tembec) : à Saint-Gaudens (31) utilisant le procédé kraft sur bois de feuillus et Tarascon (13) utilisant le procédé kraft sur bois de résineux. Saint Gaudens produit 270 000 de pâtes et Tarascon 250 000 t.
- **Gascogne Paper** (kraft), Mimizan, (40).
- **International Paper Celimo** (groupe International Paper, USA) à Saillat (87) avec une production de 250 000 tonnes de pâtes.
- **Smurfit Kappa Cellulose du Pin** (groupe Smurfit Kappa, Irlande). Procédé kraft sur bois de résineux, Factice, (33).
- **Tembec** (groupe canadien), Tartas (40), utilisant le procédé bisulfite sur du bois de résineux ; production : 150 000 t de pâtes.

Les fabricants de pâtes chimiques de résineux selon le procédé kraft produisent du tall oil et de l'essence de térébenthine.

Tembec produit et commercialise des lignosulfonates et des tall oil séparés lors d'une étape de l'enrichissement en α -cellulose.

Les acteurs du raffinage des coproduits de fabrication de pâtes sont peu nombreux. En France, la société **DRT** est active dans ce secteur. Elle est la seule entreprise au monde à raffiner tant les produits terpéniques issus de l'essence de térébenthine que ceux issus du tall oil. Quelques autres sociétés raffinent le tall oil : ce sont le nord-américain **Arizona Chemicals** (présent également en Scandinavie) et le finlandais **Forchem Oy** ainsi que le groupe **Kemira**.

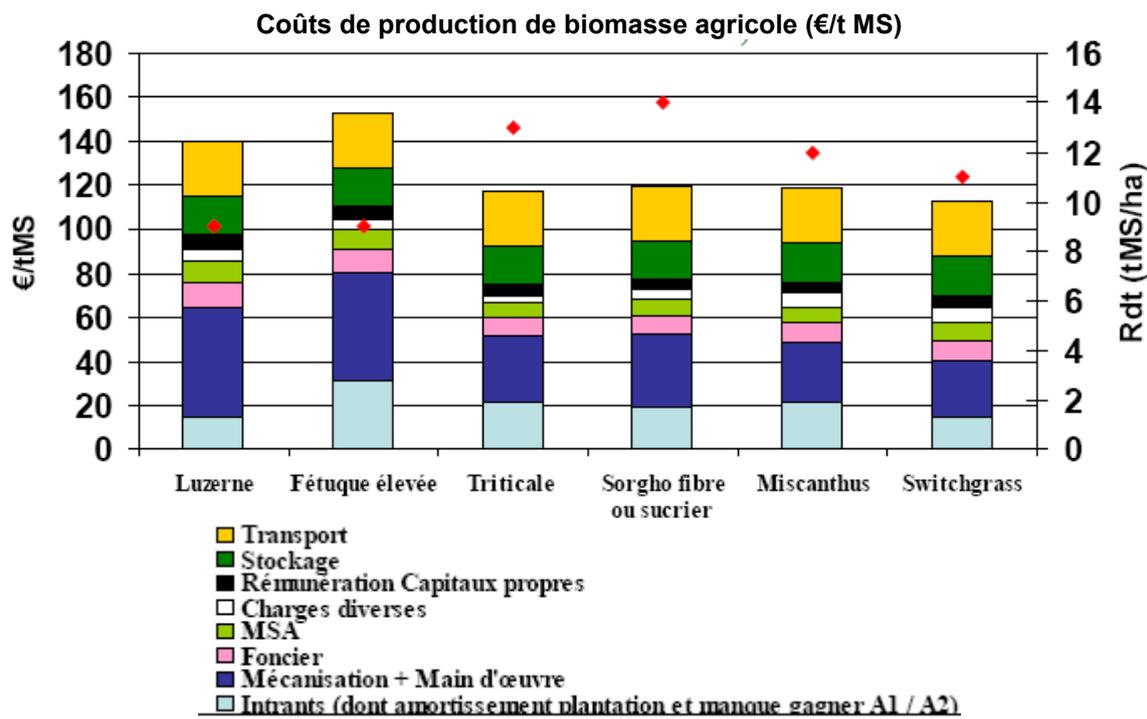
Parmi les entreprises commercialisant des extraits d'écorce, on peut, outre DRT, citer :

- **Berkem** (France), **Biolandes** (France), **Naturex** (France), **Blue California** (USA), **EPO** (Italie). Il n'a pu être vérifié dans le cadre de cette étude si toutes ces entreprises réalisaient elles-mêmes leurs extractions ou commercialisaient les produits d'un tiers.
- Le projet Bioextrac rassemblant le Centre Technique du Papier, **Smurfit**, **Tembec** et **Biolandes** a pour but de développer des extraits végétaux à partir des coproduits de la production de pâte à papier qui seront valorisés par l'entreprise Biolandes.
- Les entreprises commercialisant des tanins végétaux, comme **Omnichem** (groupe **Ajinomoto**) en Belgique et **Silvachimica** en Italie.

II.4.4.5 – COUTS DE MOBILISATION DE LA BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE

Le projet REGIX, brièvement décrit plus haut, apporte des premiers éléments de réponse sur la question du coût de mobilisation de biomasse agricole ou forestière.

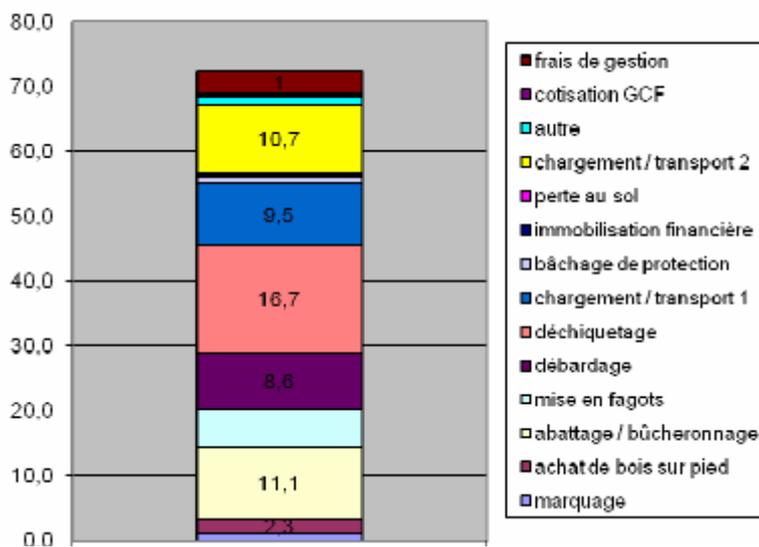
La biomasse agricole revient à 80 – 120 €/t conditionnée sur place, coût auquel il convient d'ajouter le chargement et transport.



Note : les pérennes sont récoltées en fin d'hiver avec un rendement lissé sur 15 ans.
 Source : GIE-Arvalis Onidol

Les plaquettes forestières affichent pour leur part un coût moyen de 72 €/t, variant entre 35 et 100 €/t.

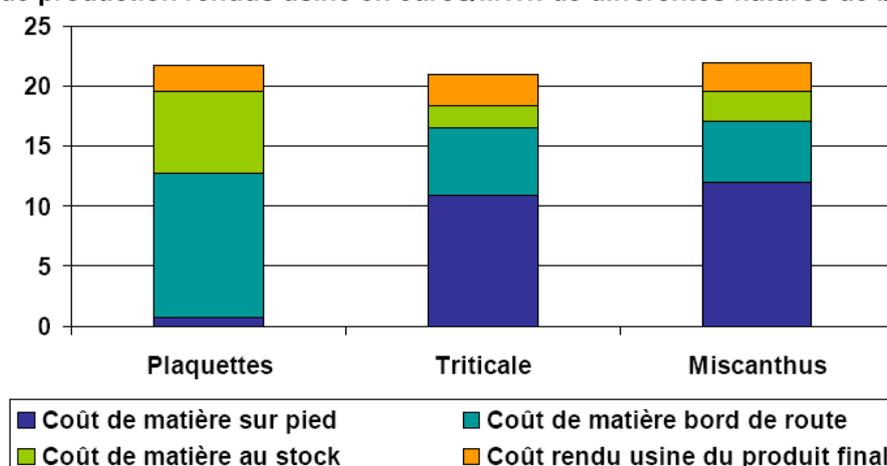
Prix moyen des plaquettes forestières produites dans le cadre de REGIX



Source : UCFF

Exprimés en termes de contenu énergétique, les coûts sont finalement beaucoup plus homogènes, autour de 22-23 €/MWh.

Coûts de production rendus usine en euros/MWh de différentes natures de biomasse



Source : GIE-Arvalis Onidol

II.4.5 – PRINCIPAUX PRODUITS DES FILIERES LIGNO-CELLULOSIQUES

II.4.5.1 - LA CELLULOSE ET SES DERIVES

Les procédés bisulfite et kraft préhydrolysé (PHK) permettent d'obtenir de la cellulose débarrassée des hémicelluloses. Une tonne de bois permet en moyenne l'obtention de 350 kg de cellulose pure. Une cellulose se caractérise par son degré de polymérisation (DP) qui est modulable en fonction des paramètres du blanchiment. Les celluloses de spécialités sont aujourd'hui produites par certains fabricants de pâte puis transformée en leurs dérivés par l'industrie chimique (**Akzo Nobel, Rhodia, Dow Chemicals**, etc.). Les qualités de cellulose étant différentes suivant les applications, les usines de pâte peuvent être spécialisées pour servir préférentiellement les producteurs d'éthers ou d'acétates.

Les éthers cellulosiques : carboxyméthylcellulose, éthylcellulose, hydroxy-éthylcellulose. Ce sont des polymères solubles dans l'eau qui permettent d'ajuster la viscosité de solutions. Ils sont utilisés comme agents rhéologiques (= texturants) dans de nombreuses applications (secteur Pharmacie, Cosmétique, Alimentaire, Béton - Matériaux de construction, Vernis-peintures, Papeterie, Adhésifs, Lessives...). L'usine **Tembec** de Tartas produit tout particulièrement des pâtes de celluloses pour la production d'éthers.

Les esters de cellulose se classent en deux catégories :

- Les **nitrocelluloses** ont des applications différentes en fonction du taux de nitration de la cellulose. Elles sont utilisées pour leurs propriétés "énergétiques" (dans des explosifs civils et militaires) mais aussi dans les laques, encres et vernis pour leurs propriétés filmogènes (qualité de "brillant" des vernis cellulosiques). Ces dernières applications progressent en Asie mais régressent en Europe car elles génèrent des composés organiques volatils.
- Les **acétates ou butyrates de cellulose** sont solubles dans les solvants organiques comme l'acétone. Ils peuvent être régénérés sous forme de fils (applications en fibres textiles et en filtres à cigarettes) ou de films (couvertures de livres, anciens "transparents" pour projecteurs, mais aussi filtres polarisants pour écrans LCD). Les acétates de cellulose sont également utilisés dans la production de thermoplastiques pour des applications variées. Les filtres à cigarettes représentent environ 80 % des applications des acétates de cellulose, produits par des entreprises comme **Rhodia**.

La Viscose. Traitée par une solution alcaline puis par du disulfure de carbone, la cellulose peut être transformée en xanthate de cellulose hydrosoluble. En conditions acides, la cellulose peut être régénérée sous forme de fils (**Rayonne, Viscose** pour des applications dans les textiles mais aussi en non tissés, y compris les éponges de cellulose et les garnitures périodiques ou encre dans les cables de renforcement des pneumatiques) ou de films (**Cellophane**). La Chine est un important producteur et consommateur de viscose.

La cellulose "Lyocell" est une autre forme de cellulose régénérée qui est dissoute directement, re-précipitée et forcée à travers une filière pour produire des fibres de haute qualité pour le textile ou les non-tissés. Le Lyocell est fabriqué par la société autrichienne **Lenzing**.

Les celluloses microcristallines sont utilisées pour leurs propriétés de liants dans les excipients pharmaceutiques et la nutraceutique.

La répartition approximative des volumes de cellulose dans ses applications est la suivante :

Répartition de la production mondiale des différents dérivés de la cellulose

Applications	Volumes approximatifs x 1000 tonnes
Viscose	+ / - 2 500
Acétates de cellulose	700
Ethers	450 + / - 2 à 300 en Chine
Nitrocellulose	100
Cellulose microcristalline	100
Total	+ / - 4 000

II.4.5.2- ESSENCE DE TEREBENTHINE ou ESSENCE DE PAPETERIE

Issu de la volatilisation de molécules légères du bois de résineux lors du pré-étuvage du procédé kraft, l'essence de térébenthine peut également provenir du gemmage des pins, dans les pays à faible coût de main d'œuvre où elle reste pratiquée.

La production française d'essence de térébenthine peut être estimée entre 7 et 8 Kt.

L'essence de térébenthine contient des terpènes de 3 grands groupes, séparés par distillation :

- L'Alpha Pinène,
- Le Béta Pinène,
- Les autres composants dont le Delta 3 Carène.

Suivant l'origine et les essences de bois, les proportions respectives de ces différentes fractions sont très variables.

Les terpènes de résineux ont été historiquement utilisés comme solvants mais ils trouvent aujourd'hui leurs principaux débouchés dans la parfumerie. Les terpènes sont utilisés sous forme d'alcools, d'esters ou hydrocarbonés. La plupart des molécules obtenues peuvent être également produites à partir de la pétrochimie. La concurrence entre les origines végétales et pétrolières est donc directe, son intensité variant avec les cours du pétrole.

Dans le monde, seuls deux autres raffineurs (nord américains) sont intégrés, et travaillent, comme **DRT**, sur l'ensemble de la chaîne, de la distillation complète jusqu'à la production par transformation chimique de dérivés de terpènes. Les autres industriels n'interviennent que sur une fraction des produits de la distillation.

Le traitement des essences de papeterie comprend la désulfuration du produit. Les distillations à mettre en œuvre sont des opérations délicates, les écarts de température d'ébullition des différentes molécules à séparer étant très faibles. L'ensemble de la technologie

à mettre en œuvre, l'importance des savoir faire et des investissements nécessaires limitent très fortement le nombre d'acteurs industriels actifs dans ce secteur.

Quelques dérivés de l'essence de térébenthine (*some turpentine derivatives*)

Fractions	Catégories de produits	Exemples de molécules	Marchés
α pinène	Hydrocarbures	α pinène, Dipentène Paracymène	Parfumerie, (pour le camphre : utilisations dans les cérémonies religieuses, en Inde)
α pinène	Alcools terpéniques	Dihydromyrcenol, Menthanol, Sanderol, Terpinéol, Pinol.	
α pinène	Produits camphrés	Camphre (camphor)	
α pinène	Esters	Acétate de menthanyle, Acétate de terepényle	
β pinène	Hydrocarbures	β pinène, Myrcène	
β pinène	Alcools terpéniques	Citronellol, Géraniol, Nerol, Nopol	
β pinène	Esters	Acétate de géranyle, Acétate de nopyle	
β pinène	Aldéhydes/cétones	Dérambrène (= Iso-E)	
α pinène et β pinène	Résines polyterpéniques	Résines tackifiantes	Colles et adhésifs, chewin gum, ...
Δ 3 carène et α pinène	Résines terpènes phénoliques		

Certaines molécules sont des commodités à faible valeur ajoutée avec un marché bien établi de plusieurs milliers de tonnes. Le géraniol représente ainsi, un marché de 15 Kt, alimenté par 4-5 acteurs. Le géraniol de synthèse, obtenu à partir d'isobutène et d'acétone par **BASF** (notamment), est en concurrence avec ceux qu'extrait **DRT** d'essences de papeterie ou d'essence de gemme. D'autres molécules sont des spécialités, avec parfois de très fortes valeurs ajoutées mais des marchés de petits volumes.

Les prix des dérivés de la térébenthine sont en forte hausse depuis plusieurs années, la demande restant en croissance en dépit du contexte économique général et la ressource étant limitante. Quelques ordres de grandeur de prix observés à la mi 2010 peuvent être signalés :

- Essence de térébenthine : 4-4.5 \$/gallon = (≈ 1 \$/l)
- α pinène : 4 \$/kg
- Pinol : 4.5 \$/kg
- Dihydromercénol : 9 \$/kg.

II.4.5.3 - LE TALL OIL ET SES DERIVES

Le tall oil est un autre coproduit de la production de papier Kraft à partir de bois de résineux. Il représente environ 3 % de la composition de la matière sèche d'un bois de pin. 30 à 50 kg de tall oil sont produits par tonne de pâte à papier.

La production annuelle nord américaine de tall oil est d'environ 500 Kt alors qu'elle avoisine 400-500 Kt en Scandinavie. En France, la production peut être estimée entre 20 et 30 Kt.

Le tall oil présente la composition générale suivante :

Composition d'un Tall oil typique – origine USA

Composés	% en poids
Acides résiniques	42
Acides gras	48
Insaponifiables	8.5
Eau	0.8
Insolubles dans le toluène	0.1

Source : *Encyclopedia of Chemical Technology*

La dénomination d'"acides résiniques" (également dénommé Colophane) rassemble différentes molécules proches de l'acide abiétique C₁₉H₂₉COOH) :

Exemple de composition de la fraction "acides résiniques" ou Colophane d'un tall oil

Composés	% en poids
Acide abiétique	35.4
Acide deshydroabiétique	27.4
Acide palustrique/lévopimarique	10.1
Acide isopimarique	5.6
Acide dihydroabiétique	4.7
Acides pimariques	4.6
Autres	12.2

Source : *Encyclopedia of Chemical Technology*

Les acides gras dominant dans le tall oil ne sont pas différents de ceux de nombreuses huiles végétales. En revanche, leur répartition varie suivant les espèces forestières et donc selon les régions d'origine.

Exemples de composition en acide gras (% du total) de tall oil

Composés	Tall oil "typique"*	Origine nord américaine**	Origine scandinave**
Acide oléique C18:1	48.5	46	30
Acide linoléique C18:2	43.1	36	45
Acide pinoléique C18:3	3.5	2	9
Acides stéarique et palmitique C18:0 et C16:0	2.1	2.5	2.5
Acide ecosénoïque	1.1		
Autres	1.7		

Source : * *Encyclopedia of Chemical Technology*, ** : *The chemistry of oils and fats. F. Gunstone.*

Process : Le tall oil est présent dans la liqueur noire sous forme de savons. L'acidification de ces savons permet de les séparer de la liqueur noire et d'obtenir le tall oil brut (crude tall oil). Les raffineurs achètent le tall oil brut acidifié ou parfois la liqueur noire dont ils extraient le tall oil eux-mêmes, souvent sur le site même de la papeterie.

Les prix du tall oil brut sont fortement corrélés à ceux du pétrole. En effet, si ce dernier atteint des valeurs trop élevés, les producteurs de pâte à papier brûlent leur tall oil pour éviter des achats de combustible coûteux et le paiement des taxes carbone associées.

Le développement de projets de valorisation énergétique du tall oil, comme celui intitulé SunPine en Suède risque de fortement déstabiliser un marché dont l'offre est limitante par rapport à la ressource. Selon ce projet, 90 000 tonnes des 450 000 tonnes de tall oil scandinave seront à termes utilisés pour produire du biodiesel, ce qui générera de fortes tensions sur le

marché du tall oil tout en ayant un impact dérisoire en termes de volumes de substitution de carburants diesel.

Les produits extraits du tall oil et leurs dérivés

Les raffineurs traitant du tall oil sont très peu nombreux. En France, seule l'entreprise DRT est présente sur cette activité.

Le fractionnement du tall oil se fait par distillation à haute température et fournit différentes coupes :

- Les acides gras (tall oil fatty acids)
- Le tall oil distillé (distilled tall oil)
- La fraction d'acides résiniques (tall oil rosin)
- La poix de tall oil (tall oil pitch), dont on extrait des phytostérols (β sitostérol).

Les applications des dérivés du tall oil sont résumées dans le tableau ci-dessous.

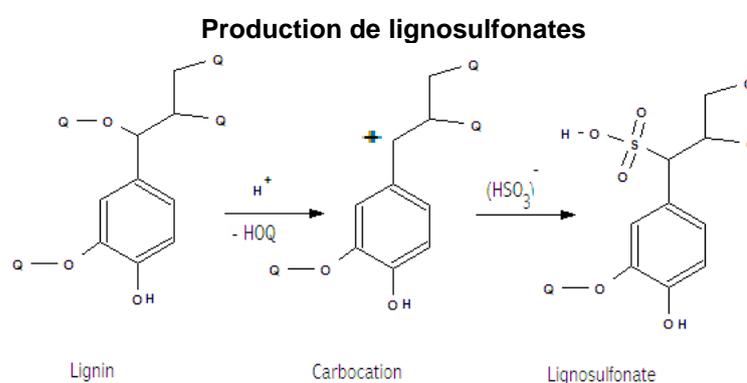
Les dérivés du tall oil et leurs usages

Fraction d'origine	Catégories de produits	Propriétés	Marchés
Acides gras	acides oléique et linoléique	acides gras à chaînes en C18.	Huiles industrielles, huiles de coupe, lubrifiants
	esters d'acides gras		Encres, lubrifiants
Tall oil distillé		mélange d'acides gras et d'acides résiniques	Huiles industrielles, savons, émulsifiants industriels, encres, bitumes
Tall oil distillé et acides résiniques	Résines polyesters hydroxylées	Résines tackifiantes pour polyuréthanes	Polyuréthanes
Poix de tall oil	Poix de tall oil	Dopes acides pour bitumes	Bitumes, revêtements routiers
Poix de tall oil	β Sitostérol	Inhibiteurs de cholestérol, Anti-inflammatoire pour la peau	Pharmacie Diététique - Nutraceutique
Colophane de tall oil	Colophanes acides		Pigments
	Savons de colophane		Caoutchoucs
	Esters de colophanes		Encres, colles et adhésifs, cosmétique, marquage routier
	Résines phénoliques modifiées		Vernis, encres, peintures.
	Résinates		Encres
	Résines polyesters hydroxylées	Résines tackifiantes	

II.4.5.4 – AUTRES COPRODUITS DES INDUSTRIES PAPETIERES

Les lignosulfonates sont des **coproduits de la production de pâte à papier issus du procédé au bisulfite**. Ils sont commercialisés sous forme liquide, à 50 % de matière sèche, ou en poudre. Ils ont des usages variés dans les applications suivantes :

- béton (agents dispersants, plastifiants, retardateurs de prise)
- nutrition animale (cohésion des aliments granulés),
- industries du cuir et de la tannerie (agents tannants),
- papeterie (en compétition avec l'amidon, dans ses fonctions de liant),
- industrie des panneaux de bois (liant non toxique),
- divers (agent d'agglomération d'engrais, dispersant, émulsifiants et mouillants pour produits phytosanitaires, ...).

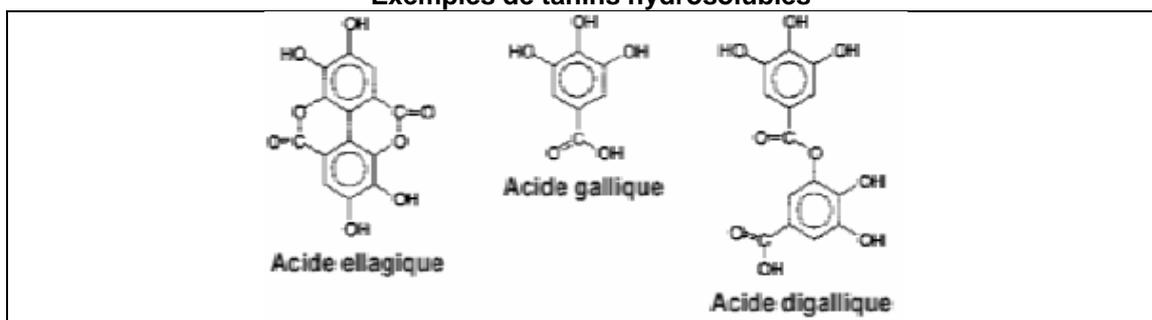


Les sulfonates de lignine peuvent être des précurseurs de la **vanilline**.

Les sucres présents dans les liqueurs résiduelles peuvent être fermentés et transformés en **éthanol**. **Tembec** produit ainsi, dans une de ses usines, de l'éthanol de haute pureté à partir des hexoses présents dans les liqueurs. Cet éthanol est destiné à des applications dans la cosmétique, les détergents, les produits alimentaires ...

Les tanins. Ils rassemblent une famille diversifiée de molécules polyphénoliques. Les bois de chêne ou de châtaignier sont particulièrement riches en tanins. Leur extraction au cours des processus de la papeterie fait l'objet de travaux de R&D mais reste encore sans application commerciale. Des entreprises spécialisées extraient des tanins de chênes et châtaigniers, français ou italiens, ainsi que ceux d'arbres exotiques comme le Quebracho (*Scinopsis sp.*) d'Amérique du Sud et de certains vrais acacias tropicaux (mimosacées). Les galls de chênes, les feuilles ou les gousses d'autres végétaux sont également des sources de tanins. Ces molécules conservent la majorité de leurs applications dans la tannerie (qui consomme en global encore plusieurs dizaines de milliers de tonnes par an) mais ont d'autres usages dans la production de boissons et de vins, la pharmacie, la cosmétique, (quelques dizaines à centaines de kg par an) ainsi que dans les secteurs textiles ou de traitement du métal.

Exemples de tanins hydrosolubles



Les procyanidines extraits d'écorce de pin sont des polyphénols dont les applications se développent dans la nutraceutique et la cosmétique. Ce sont des produits onéreux sous forme concentrée (plus de 1000 € / kg). Les origines géographiques des extraits présents sur le marché sont principalement le pin des Landes mais aussi des pins chinois.

Les Lignanes (Hydroxymatairesinol =HMR) et d'autres flavonoïdes sont présents à des taux élevés dans les nœuds résineux (raccords de branches au tronc). Les nœuds de bois représentent 2 à 3 % des volumes de bois traités et ne peuvent être transformés en pâte. Un triage mécanique des nœuds est possible avant la cuisson. La valorisation de leurs composants spécifiques est une piste intéressante, objet de diverses recherches.

II.4.5.5 – LA PRODUCTION DE BIOCARBURANTS DE SECONDE GENERATION

Les bioraffineries de seconde génération traiteront des matières premières lignocellulosiques pour produire en priorité des biocarburants de nature diverse. Les molécules obtenues ou des coproduits pourront être valorisés comme intermédiaires de synthèse pour la chimie.

Rappelons ici brièvement les différentes pistes explorées aujourd'hui :

Celles de la voie dite thermochimique. Elles nécessitent un apport d'énergie thermique qui peut être important et ne préservent pas la structure initiale de la biomasse.

La gazéification de la biomasse consiste à élever progressivement la température de la matière avec une quantité limitée et soigneusement contrôlée d'oxygène ou d'air. Elle permet d'obtenir du gaz de synthèse (syngas), composé de monoxyde et de dioxyde de carbone, d'hydrogène, d'eau, de méthane, d'azote et d'impuretés parmi lesquelles des goudrons. Les procédés sont nombreux et la composition du gaz obtenu est variable. A température élevée (800-1000°C) et à pression atmosphérique, le monoxyde de carbone et l'hydrogène dominent. A température plus basse (400-500°C), on privilégie la formation de méthane.

La séparation du monoxyde de carbone et de l'hydrogène suivie d'une réaction de Fischer Tropsch permet d'obtenir des chaînes hydrocarbonées de longueurs variables (compatibles avec l'essence ou le diesel) et de l'eau.

Parmi les nombreux projets mettant en œuvre cette technologie, on peut citer :

- **Le projet français BioTfuel**, soutenu par l'ADEME et la région Picardie et validé en 2009. Il réunit l'Institut français du pétrole (IFP), le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), Sofiproteol (Établissement Financier de la Filière des Huiles et Protéines), le pétrolier Total et le groupe industriel allemand Uhde. Le projet a pour objectif de mettre au point un procédé complet, depuis la préparation de la biomasse, sa torréfaction, sa gazéification, l'épuration des gaz et la synthèse de Fischer Tropsch. Le démonstrateur

reste à une échelle modeste et produira annuellement 200 000 à 300 000 litres de biocarburants.

- **Le projet du groupe papetier finlandais UPM** qui étudie pour son site de Stracel (proximité de Strasbourg) la possibilité de développer une production de biocarburants par gazéification de rémanents forestiers. UPM a développé aux USA avec le **Gas Technology Institute** la technologie nécessaire. Des travaux pilotes ont été conduits depuis plusieurs années, y compris sur des matières premières d'origine européenne. L'étude d'impact est en cours.
- Le projet du **CEA** (Commissariat à l'Énergie Atomique), d'**Air Liquide** et du groupe **CNIM** (Constructions Industrielles de la Méditerranée) à Bure-Saudron.
- Les développements originaux de l'entreprise nord-américaine **Coskata** qui réalise des **fermentations microbiennes à partir de gaz de synthèse** pour produire de l'éthanol. Les biotechnologies se substitueraient ainsi au procédé très coûteux en énergie de Fischer Tropsch. Le pétrolier français **Total** est entré au capital de Coskata en 2010. Toujours aux USA, **Ineos New Planet Bioenergy** (filiale d'**Ineos**) dispose d'une technologie similaire.
- Les projets de **Choren** en Allemagne, du nord-américain **ClearFuels Technologies**, du canadien **Enerkem** ou du danois **Haldor Topsoe**.

La pyrolyse de la biomasse consiste également à élever la température de celle-ci mais en l'absence d'air. C'est historiquement le procédé de fabrication du charbon de bois (à température d'environ 350-400°C et à faible vitesse de chauffe). A des températures élevées, appliquées pendant une durée courte, d'importantes proportions d'huiles et goudrons sont produites (le pyrolysat), compatibles avec du carburant diesel.

Les projets sont moins nombreux. Citons celui du **Renewable Energy Institute** aux USA.

La voie biochimique privilégie la fragmentation des polymères de la matière vivante puis leur conversion par des enzymes et l'action de microorganismes. Des prétraitements physiques ou physico-chimiques sont nécessaires. Classiquement, des cellulases et des hémicellulases (cf. IV.4.1.1) sont utilisées mais de nombreux développements sont en cours pour disposer de souches microbiennes capables d'utiliser directement la cellulose et les hémicelluloses comme substrat (cf. IV.4.1.1).

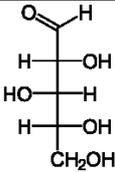
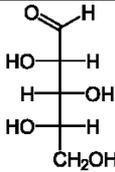
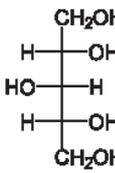
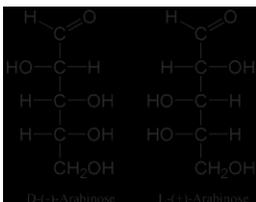
Parmi les nombreux projets mettant en œuvre la voie biologique, on peut citer :

- **Le projet français FUTUROL** qui réunit, sur le site de Pomacle- Bazancourt, de nombreux partenaires : *Agro industrie Recherches et Développements (ARD), Confédération Générale des Planteurs de Betterave (CGB), Champagne Céréales, Crédit Agricole du Nord-Est, IFP, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Lesaffre, Office National des Forêts (ONF), Tereos, Total et Unigrains*. Ce projet, d'une durée de 8 à 10 ans, va consister à créer ex nihilo un pilote industriel qui sera opérationnel fin 2010-début 2011. Futurol intègre la problématique de la mobilisation et de la collecte de la biomasse lignocellulosique dans toute sa diversité.
- Les travaux mis en œuvre par les majors du secteur des enzymes comme **Novozymes** (collaborations avec des entreprises de différentes nationalités comme **Lignol, PRAJ, COFCO, SINOPEC**, mais aussi avec plusieurs centres de recherche) et **Genencor** (partenariat avec **DuPont** pour produire de l'éthanol cellulosique).

- Les différents projets mis en œuvre soit par des start up soit par des industriels déjà producteurs d'éthanol de première génération pour développer de l'éthanol cellulosique. Ils sont nombreux. On peut citer : **Abengoa** (aux USA, à partir de switchgrass et de résidus de bois), **logen** en collaboration avec **Shell** (Canada), **Mascoma** (USA), **Poet** (USA), **Range fuel** (USA), **Verenium** (USA), **Zechem** (USA), etc.
- Les travaux déjà évoqués de **Tereos** avec la société **Deinove** pour produire directement de l'éthanol à partir des fractions lignocellulosiques du blé, en mettant en œuvre certaines souches de deinocoques.
- Les différents projets de production de butanol ou d'isobutanol par fermentation (cf. III.5), certains étant délibérément orientés vers la valorisation de la biomasse lignocellulosique.

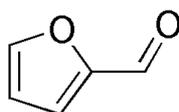
II.4.5.6 – LES DERIVES DU XYLOSE ET DE L'ARABINOSE

Le xylose et l'arabinose sont des constituants des hémicelluloses et peuvent être obtenus par fragmentation de celles-ci par voie chimique (hydrolyse acide) et/ou biochimique (action d'hémicellulases). Le xylitol et l'arabitol (= arabinitol) sont obtenus par hydrogénation du xylose et de l'arabinose. Ils ont été classés dans le "top 10" des molécules plateformes de l'étude US DOE de 2004. La mise à jour de 2009 les a confirmés dans cette position. Ils avaient également fait partie de la sélection de l'étude européenne BREW de 2006.

 D-Xylose	 L-Xylose	 xylitol	 D-Arabinose L-Arabinose	 Arabitol = arabinitol
xylose		xylitol	arabinose	
			Arabitol = arabinitol	

De nombreux dérivés potentiels de ce groupe de molécules peuvent être listés. On retrouvait dans l'étude de 2004 le propylène glycol, l'éthylène glycol mais aussi l'acide lactique et le même le glycérol !

A ce jour, les dérivés les plus attractifs du xylose sont aujourd'hui les furanes hydroxylés comme le furfural. La production mondiale est de 2 à 300 000 tonnes. Elle est obtenue à partir de biomasse riche en pentosanes par des entreprises comme le belge **Transfuran Chemicals**. Le furfural a de nombreux dérivés parmi lesquels on retrouve l'alcool furfurylique (applications comme solvant et comme intermédiaires de synthèse de résines et de plastiques) mais aussi les autres dérivés des furanes évoqués au § II.1.5.3.2, comme le Tétrahydrofurane (THF).



Furfural



Alcool furfurylique

Le xylose peut être également utilisé pour la production de tensioactifs non ioniques.

II.4.5.7 – VERS UNE CHIMIE DES LIGNINES

Les lignines restent la fraction la moins connue de la matière lignocellulosique. Traditionnellement brûlées ou valorisées sous forme de lignosulfonates par l'industrie papetière, elles offrent des potentiels d'application variés mais aussi la possibilité de produire – à terme - un ensemble important de dérivés aromatiques.

Une étude du Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) pour l'US DOE a été publiée en 2007 (*Top Value-Added Chemicals from Biomass – Volume II – Results of screening for potential candidates from biorefinery lignin*). Elle classe ainsi les possibilités d'usage de la lignine en trois catégories :

- La production de chaleur, de carburants et de gaz de synthèse (potentialités à court terme).
- La valorisation des macromolécules de lignine (à moyen terme).
- La production de dérivés aromatiques et de monomères divers (à long terme).

Nous ne reviendrons pas sur la première classe d'usages, déjà évoquée précédemment. Les lignines présentent de nombreux atouts pour leur usage dans les matériaux par :

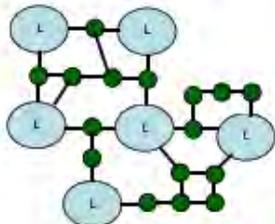
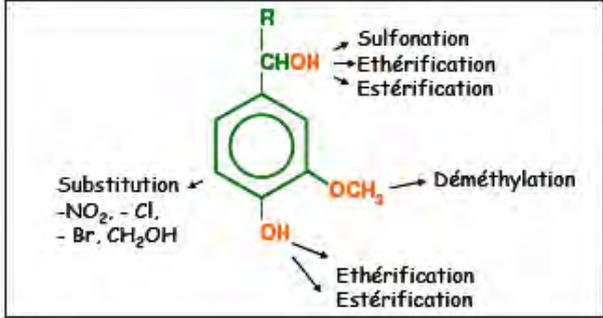
- leur aptitude à la réticulation et au greffage, pour se substituer au phénol dans des adhésifs,
- leur capacité à "hydrophober" des matériaux biodégradables en greffant des composés aromatiques sur leurs sucres
- leurs propriétés antioxydantes pour stabiliser des thermoplastiques.

Usages potentiels de lignines dans les matériaux

➤ Groupements fonctionnels : OH, COOH, C=O, CHO, OCH₃, SO₃

➤ Liaisons : C=C, C-O-C, C-C

→ Réticulation
→ Fonctionnalisation
→ Copolymérisation

⇒ Elaboration d'adhésifs de type phénol-formaldéhyde

⇒ Elaboration de mousses poreuses par réticulation à l'épichlorhydrine

⇒ Hydrophobation de matériaux biodégradables par irradiation

Source : Stéphanie Baumberger - AgroParisTech

Le PNNL envisage également l'usage de lignines pour la production de fibres de carbone en substitution du polyacrylonitrile. La purification à bas coût de la lignine devra être préalablement maîtrisée.

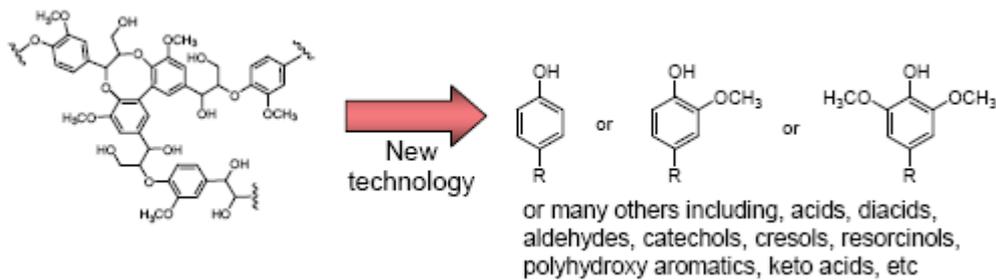


Source : PNNL pour US DOE, 2007

L'étude du PNNL présente deux alternatives prospectives en ce qui concerne les dérivés des lignines dans la chimie des aromatiques :

- (1) La production – par des technologies à développer - de molécules préservant la structure de la lignine. Il faudra dans ce cas développer les applications et les marchés.

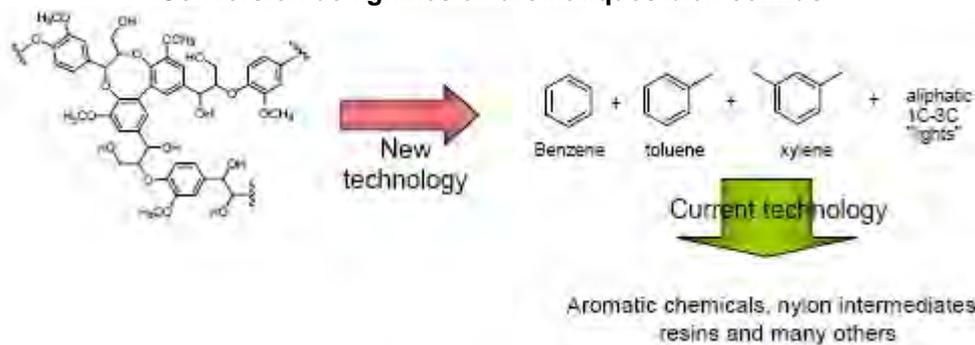
La production de molécules plateformes respectant la structure de la lignine



Source : PNNL pour US DOE, 2007

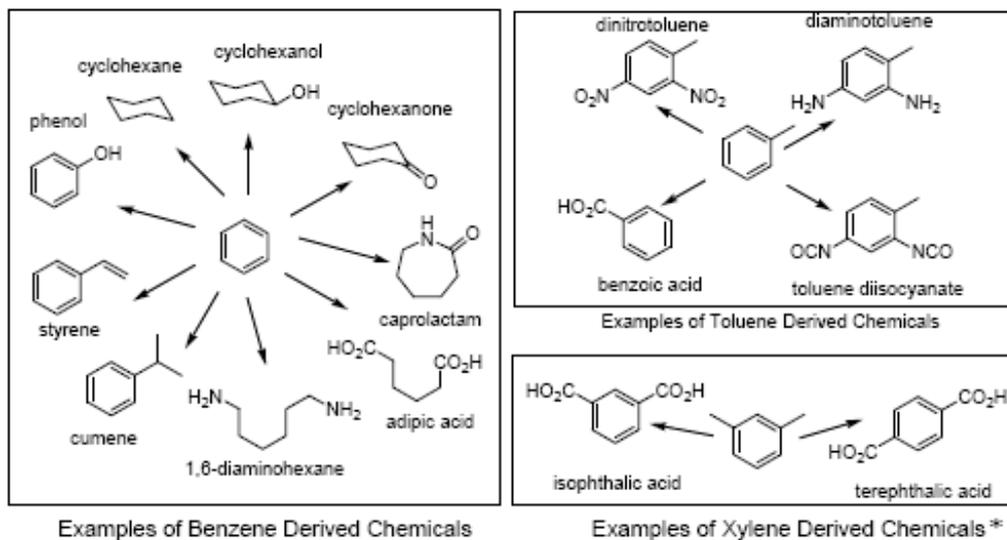
(2) La conversion de lignines en benzène, toluène et xylène (BTX), selon des technologies qui restent à développer. On obtiendrait alors l'accès à la vaste famille des aromatiques issus de la pétrochimie dont les applications et les marchés sont parfaitement connus.

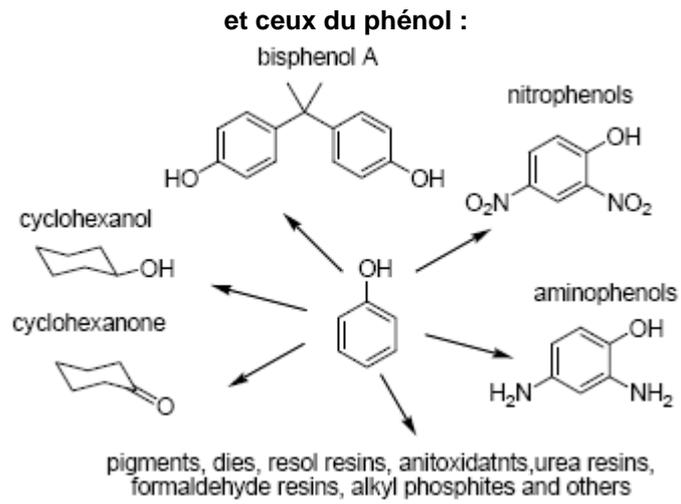
Conversion de lignines en aromatiques bien connus



Source : PNNL pour US DOE, 2007

Rappels sur les dérivés des BTX (Benzène, Toluène, Xylène)





Source : PNNL pour US DOE, 2007

II.4.6 - FORCES, FAIBLESSES, PERSPECTIVES DE LA FILIERE FRANÇAISE

La filière papetière est issue d'une industrie ancienne. Celle qui reste active en France affronte la concurrence de nouvelles unités de très grande taille qui disposent de fortes économies d'échelles. Elles sont localisées en Asie, en Amérique latine ou dans l'Est de l'Europe. Le maintien d'une industrie des pâtes de cellulose dans notre pays dépend donc toujours plus de la valeur ajoutée de ses produits. Ceux-ci doivent donc en permanence se sophistiquer, en valorisant des résultats d'une recherche et développement qui devrait être plus active et mieux encouragée. Une des problématiques du secteur papetier française est qu'il appartient en majorité à des groupes internationaux dont les centres de décision et les unités de recherche sont situés loin de notre pays. La chimie de la cellulose offre ainsi des perspectives de valeur ajoutée intéressante et dispose d'un savoir faire industriel présent en France mais ne fait pas l'objet de recherches suffisamment actives à l'échelle nationale.

Les coproduits classiques de la papeterie (tall oil, essences de térébenthines, lignosulfonates) représentent des tonnages limités. Leur valorisation peut progresser, d'autant plus que les molécules homologues issues de la pétrochimie deviendront plus coûteuses, mais les ressources nationales sont insuffisantes. En aval de la filière, la société **DRT** ne peut se développer qu'en allant rechercher de nouveaux approvisionnements sur d'autres continents.

Les usines de pâte à papier produisent depuis toujours de l'énergie. Le risque que certaines soient confinées à terme au rôle de centrales thermiques électriques, fonctionnant à partir de "bois énergie" n'est pas à exclure. Cela serait regrettable pour une industrie qui offre un autre potentiel de valeur ajoutée.

Bois-papier et bois-cellulose, bois-matériau, bois-carburant, bois-énergie... Ces différents débouchés de la forêt sont-ils condamnés à s'exclure ? Quelles sont leurs compatibilités, selon quelle vision et avec quels objectifs à long terme ? Quelles sont les activités ayant le meilleur impact sur l'environnement ? Celles le plus génératrices d'emploi ? Celles favorisant notre commerce extérieur ? Le paysage reste mal défini et les tiraillements sont vifs entre les différentes corporations concernées. Une concertation d'ensemble est nécessaire qui n'a pas encore eu lieu. La réponse, on le pressent, prendra en compte des réalités territoriales mais la réflexion doit être nationale et collective. Le devenir des différentes filières ne peut être abandonné aux seules lois du marché alors que plusieurs des secteurs concernés bénéficient de soutiens publics directs ou indirects.

La ressource en paille est à la fois importante et limitée en France. Nous vivons dans un grand pays céréalier mais les pailles produites ont le plus souvent déjà un usage. La fraction réellement disponible est déjà convoitée, comme le bois, pour produire des combustibles, des matériaux, des biocarburants et peut être quelques intermédiaires pour la chimie. Il sera là aussi nécessaire de définir, avec toutes les parties prenantes, quel pourront être les meilleurs équilibres entre les différents usages, au niveau national et local.

Les cultures énergétiques nouvelles ont parfois été présentées comme miraculeuses par certains de leurs promoteurs. Ces plantes ont certes une croissance rapide et une végétation exubérante mais, comme toutes les plantes en C4, il leur faut suffisamment d'eau et des bonnes terres pour exprimer leur potentiel. Des travaux comme le programme REGIX apportent les premiers éléments qui permettront de définir leur juste positionnement dans la production de biomasse lignocellulosique dans nos différentes conditions pédoclimatiques.

Différents projets de recherche et développement ont été engagés en France sur la production de biocarburants de seconde génération. Ils restent peu nombreux et avec des moyens modestes, en comparaison de ce qui est mis en œuvre aux Etats-Unis. Trop peu de sociétés de biotechnologies explorent dans notre pays les possibilités de fermentations directes de la cellulose et des hémicelluloses. Notre savoir faire en matière de chimie des lignines mérite d'être évalué en détail.

Analyse des forces – faiblesses / opportunités – menaces de la filière française

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> - La France a de grandes ressources forestières, gérées durablement. - Un gisement important de ressources agricoles (coproduits ou cultures dédiées). - L'industrie papetière française est ancienne et dispose d'un savoir-faire industriel et logistique important. - Un savoir faire disponible dans la chimie de la cellulose. - Plusieurs projets explorent en France les différentes technologies de seconde génération (thermochimique, biologique). - Présence en France d'une des rares entreprises bioraffinant les coproduits de la papeterie (DRT). 	<ul style="list-style-type: none"> - Une grande part de nos ressources forestières reste mal ou non exploitée. - Faible compétitivité de notre industrie papetière. Sa R&D en France est de plus en plus réduite (groupes actionnaires étrangers concentrant leurs moyens hors de France). - Concurrence d'usage forte et pouvant être destructrice entre les usages pour la chaleur, les matériaux (y compris le papier) et demain les carburants et la chimie. Pas de concertation organisée entre toutes les parties prenantes. - Expérience encore très limitée des nouvelles cultures énergétiques en France. - Peu de sociétés de biotechnologies en France actives sur la fermentation de la lignocellulose.

Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> - Volonté politique de développer les biocarburants de seconde génération. - Hausse des coûts du pétrole et des dérivés pétrochimiques favorisant les produits de substitution. - Progrès des outils biotechnologiques permettant à terme de fermenter directement la cellulose et les hémicelluloses. 	<ul style="list-style-type: none"> - Compétition croissante de très grosses unités étrangères dans le secteur papetier. - L'indispensable continuité entre la 1^{ère} et la 2^{nde} génération de biocarburants est encore mal comprise par nos décideurs politiques. - Forte concurrence des nord américains développant massivement des technologies de valorisation de la biomasse lignocellulosique.

II.4.7 - RECOMMANDATIONS

- **Mettre en place un groupe actif de concertation de toutes les parties prenantes**, actuelles ou futures, concernées par la production et l'utilisation des ressources lignocellulosiques. Définir la prospective de développement et la répartition souhaitable des différents usages pour préserver les intérêts stratégiques de notre pays.
- **Poursuivre des programmes en continuité de REGIX** en leur donnant une vocation plus large (matières premières lignocellulosiques pour des usages dans les combustibles, les carburants, les matériaux composites et la chimie). Développer une évaluation réaliste de la ressource nationale mobilisable.
- Communiquer sur la continuité entre les biocarburants et les bioraffineries de première et de seconde génération en mettant en évidence l'importance majeure des capacités de mobilisation et de pré transformation de la biomasse forestière et agricole déjà disponible dans notre pays.
- Renforcer les projets pilote engagés dans le développement de procédés de seconde génération pour être compétitifs, en France et en Europe, avec ce qui est engagé outre atlantique.
- Appuyer de façon ciblée les projets innovants de recherche biotechnologique sur la fermentation des matières lignocellulosiques.
- **Evaluer notre savoir faire en chimie des lignines et appuyer le cas échéant une courte sélection de projets porteurs.**

III – QUELQUES BIOMOLECULES COMMUNES A PLUSIEURS FILIERES

Différentes molécules que l'on pouvait, en 2005, rattacher à une seule filière, sont désormais produites par au moins deux des quatre filières précédemment décrites. Une telle évolution est appelée à se poursuivre. Rappelons en effet que l'amidon et la cellulose sont tous deux des polymères de glucose. De nombreux microorganismes peuvent utiliser le glucose ou le saccharose comme source carbonée. Certains composés en C3 peuvent enfin être obtenus aussi bien à partir du glycérol issu des filières oléagineuses que de sucres originaires des filières précédentes.

III.1 - L'ETHANOL (C2)

L'**alcool éthylique** ("l'alcool") et l'**éthanol** (y compris le bioéthanol) désignent strictement la même molécule mais pas le même produit en termes d'usage, de niveau de purification, de catégorie réglementaire et fiscale. Le terme de bioéthanol est ainsi le plus souvent réservé en France aux productions agréées pour l'incorporation aux biocarburants (telles qu'elles ou sous forme d'ETBE) alors que l'on parle d'alcool pour les autres applications (alcool agricole ou de synthèse). Nous utiliserons ici les termes d'éthanol ou de bioéthanol en ne distinguant plus précisément les produits selon leur statut que lorsque cela sera nécessaire.

Molécule d'éthanol



L'**éthanol de synthèse** est obtenu par hydratation catalytique de l'éthylène. Sa production est en régression avec l'essor du bioéthanol.

III.1.1 – OBTENTION DU BIOETHANOL

De nombreux végétaux ou déchets végétaux peuvent être utilisés pour produire de l'éthanol. Trois grandes étapes se retrouvent dans tous les procédés : prétraitement et hydrolyse, fermentation et distillation. La levure *Saccharomyces cerevisiae* transforme naturellement des sucres en C6 ou du saccharose en éthanol. Des jus de betterave ou de canne, des mélasses ou du sucre peuvent être ainsi utilisés comme substrat.

La production d'éthanol à partir de grains de céréales peut se faire selon deux voies : soit en fermentant le produit d'une hydrolyse d'un lait d'amidon (glucose), soit en travaillant directement sur des broyats de grains ayant subi une liquéfaction et une saccharification.

L'enjeu des bioraffineries de seconde génération est de produire de l'éthanol à partir de matières lignocellulosiques. L'hydrolyse de la cellulose par des cellulases produit du glucose fermentescible. Pour gagner en productivité et mieux valoriser la biomasse, des souches microbiennes sont développées qui sont capables d'utiliser du glucose mais aussi des sucres en C5, issus de l'hydrolase des hémicelluloses par des hémicellulases. D'autres projets visent l'obtention de souches capables d'hydrolyser elles-mêmes la cellulose et les hémicelluloses et permettant ainsi de se dispenser de l'utilisation d'enzymes.

Après fermentation, l'éthanol est distillé puis au besoin rectifié (deuxième distillation de purification) et déshydraté dans le cas d'un usage comme carburant.

L'éthanol peut être mélangé directement à l'essence dans des proportions variables suivant les caractéristiques de moteur du parc de véhicules concernés. Il peut être également converti en ETBE (Ethyl Tertio Butyl Ether), par réaction avec de l'isobutène. L'ETBE a eu les faveurs des

pétroliers français car il permettait de valoriser une coupe pétrolière, ne pose pas les problèmes spécifiques de stockage et de transport de l'éthanol (dont il fallait éviter la réhydratation) et peut être incorporé sans difficulté aux formules d'essence courantes.

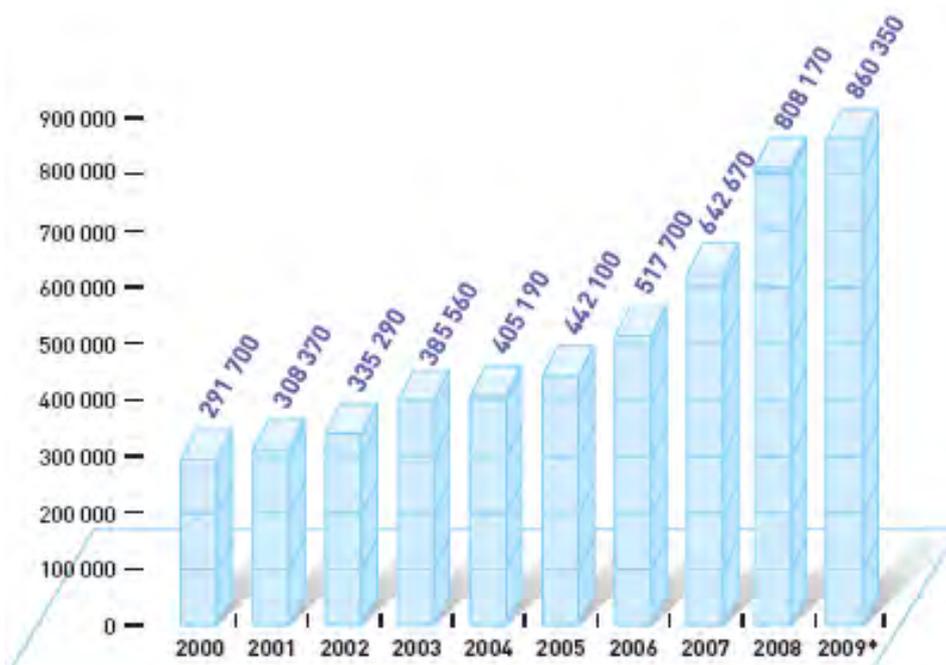
III.1.2 – LA PRODUCTION DE BIOETHANOL DANS LE MONDE

La production mondiale de bioéthanol est dominée par celle issue du traitement de l'amidon de maïs nord-américain, suivie par celle obtenue à partir de sucre de canne brésilien. En France et en Europe, le bioéthanol est issu de la betterave mais aussi du blé et du maïs. De nombreux projets de recherche et développement visent à obtenir de l'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique. L'éthanol pourra ainsi dans l'avenir être produit à partir d'une très grande diversité de matières premières végétales.

Le bioéthanol est aujourd'hui produit essentiellement pour ses applications dans les carburants. Des projets significatifs de production d'intermédiaires de synthèse en C2 sont développés à partir d'éthanol de canne au Brésil et seront décrits plus loin.

La croissance de la production de bioéthanol a été considérable ces dernières années, en relation directe avec les programmes nationaux de développement des biocarburants. On s'approchera en 2010 des 100 millions de m³ (1000 millions d'hl) dont la majeure partie sera issue de maïs et produite aux Etats-Unis (41 Mm³ en 2009, 45 Mm³ en 2010). Le Brésil a fabriqué quelques 27.4 millions de m³ en 2009 et devrait produire 31.5 Mm³ en 2010 (+ 15 %).

Evolution de la production mondiale d'alcool (y compris de bioéthanol) en x 1000 hl



Source : CEDUS – Memo statistique - D'après F.O. Licht.

Répartition de la production mondiale

Les principaux pays producteurs de bioéthanol sont listés dans le tableau ci-dessous.

Les principaux pays producteurs d'éthanol (millions d'hectolitres)

	2006	2009
USA	196.9	395
Brésil	178.3	278
UE	34.0	60.3
Chine	39.0	38.5
Inde	17.8	16.5
Canada	3.7	12
Thaïlande	3.9	7
Russie	6.1	5.3
Monde	517.7	860.4

Source : CEDUS – Memo statistique - D'après F.O. Licht.

Il y aurait aux Etats-Unis en 2010, 201 unités de production d'éthanol avec une capacité installée ou en construction de 57 Mm³. L'objectif fédéral est d'atteindre une production de 136 Mm³.

Si, la canne à sucre (son jus sucré ou - dans le futur – sa plante entière) demeurera la matière première du bioéthanol au Brésil, les Etats-Unis anticipent une nécessaire diversification des ressources en biomasse utilisées. Les objectifs de production d'éthanol de maïs étant pratiquement atteints, ce sont les cultures dédiées et les résidus de culture et d'exploitation forestière qui devront prendre une place importante, sous réserve de maîtrise des technologies de deuxième génération.

Production de biocarburants (mM³) en 2022 aux Etats-Unis : prévisions d'usages de différentes matières premières

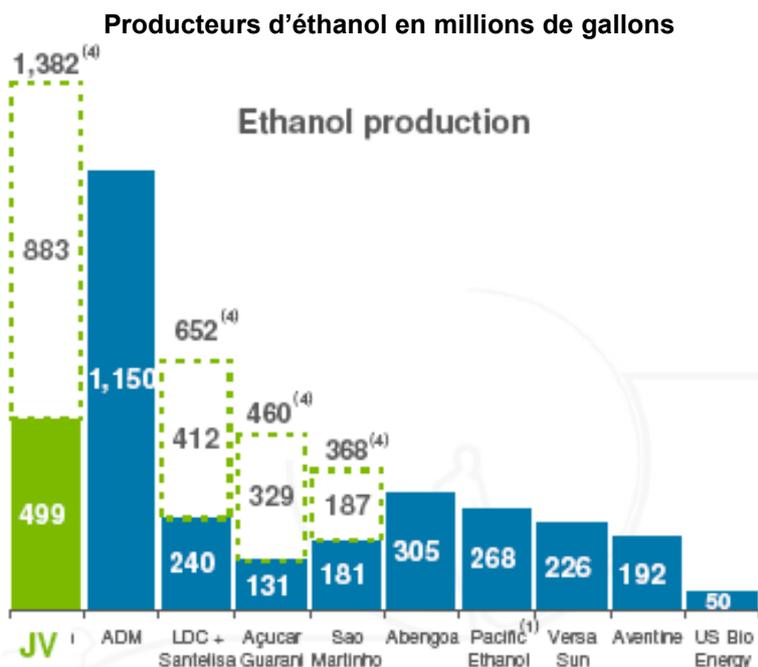
	Prévisions EPA*	Prévisions USDA**
Cultures dédiées (sorgho et graminées pérennes comme le switchgrass)	29.9	50.7
Huile de colza, soja et de maïs pour le biodiesel	5.1	1.9
Résidus de cultures (raffes de maïs, pailles, bagasse)	20.8	16.3
Résidus d'exploitation forestière	0.4	10.6
Ethanol de maïs	57	57
Déchets solides municipaux et divers	9.8	?
Graisses animales	1.4	Non considéré
Algues	0.4	Non considéré
Importations	8.3	?
Total	103.2	85.8

Source : d'après USDA – juin 2010

* EPA = Environmental Protection Agency = Agence de protection de l'environnement des Etats-Unis..

** USDA = United States Department of Agriculture = Ministère de l'Agriculture des Etats-Unis.

Le premier producteur mondial de bioéthanol est le groupe **ADM** (Archer Daniels Midland Company). Le brésilien **Cosan** a présenté début 2010 dans le graphique ci-dessous, les ambitions de production de la joint venture qu'il a créée avec **Shell**. Les données évoluent rapidement car ADM lance cette année de nouvelles unités et passe d'une capacité de production totale de 20 à 60 Mhl. De son côté, le groupe nord-américain **Poet** développe lui-aussi rapidement ses productions. Au Brésil, **Tereos**, actionnaire d'**Açúcar Guarani** renforce ses activités. Il en est de même de **LDC-SEV (groupe Louis Dreyfus)**, etc



Note : 1 million de gallons = 38 000 hl 1000 millions de gallons = 38 Mhl = 3.8 Mm³

En vert, les capacités de la joint venture Cosan-Shell

Les pointillés correspondent aux volumes de sucre produits par les entreprises, exprimés en équivalent éthanol.

Source : Cosan

L'Union Européenne connaît elle aussi un fort développement de sa production, de façon à atteindre les objectifs de taux d'incorporation des biocarburants dans l'essence. La France est le premier producteur, suivie par l'Allemagne et l'Espagne.

L'Union a importé 2 millions d'hectolitres de bioéthanol en 2002 et 12.8 Mhl en 2008 auxquels il faut ajouter près de 6 Mhl apparaissant sous d'autres nomenclatures. Le Brésil est, de loin, le premier fournisseur de l'UE (selon les propres statistiques de ce pays, 14.7 Mhl auraient été exportées vers l'UE en 2008).

Les exportations d'éthanol vers des pays tiers sont en baisse régulière (508 000 hl en 2008).

Les usages d'alcool agricole en Europe ont été en 2008 de 53.5 millions d'hectolitres (Mhl), répartis en carburant (29.1 Mhl), alimentaire (11.9 Mhl), industriel 8.5 Mhl) et divers (4 Mhl).

Evolution récente de la production d'alcool de bioéthanol en Europe (x 1000 hl)

	2006	2007	2008	2009
France	8 500	11 500	15 453	18 500
Allemagne	7 550	7 000	8 150	10 500
Espagne	4 782	5 733	5 439	5 900
UK	2 800	4 868	3 500	5 800
Pologne	2 790	1 979	1 900	4 000
Autres	7 598	8 147	10 933	15 620
Total UE	34 020	39 227	45 375	60 320

Source : CEDUS - A partir de F.O. Licht et Commission Européenne.

En France, l'éthanol produit reste majoritairement d'origine betteravière mais la proportion issue de céréales est en forte croissance. En 2008, les volumes de bioéthanol incorporés dans l'essence ont été de 8.6 Mhl (683 Kt) dont 2.8 Mhl en incorporation directe (219.4 Kt) et 5.9 Mhl

(467 Kt) dans de l'ETBE, assurant un taux effectif de 5.55 % (en PCI), légèrement en dessous de l'objectif de 5.75 %.

Production d'alcool en France (en milliers d'hectolitres)

	2205-06	2006-07	2007-08	2008-09
Betteravière	5 232	6 438	9051	8 467
Céréalière	1 433	1 509	2885	6 571
Vinique	857	1 138	709	700
Synthèse	1 030	1 151	3	-
Autres	32	36	148	274
Total	8 594	10 272	12 796	16 012
Dont bioéthanol		5 400	7 900	10 300

Source: CEDUS – Mémo statistiques, à partir de CGB, SNPAA.

Rappelons qu'en France, les biocarburants sont soutenus par deux mesures :

- Des objectifs d'incorporation dans les carburants (6.25 % du contenu énergétique total des carburants en 2009, 7 % en 2010), assortis d'une taxe globale sur les activités polluantes (TGAP) payée par les distributeurs de carburants en cas de non respect des objectifs.
- Une exonération partielle de la taxe intérieure sur la consommation (TIC) qui est en évolution défavorable. La TIC pour l'essence est de 0.58 €/hl. Celle du bioéthanol était de 25.92 €/hl en 2006-2007. Elle a été de 37.92 €/hl en 2009 et va s'élever à 40.92 €/hl en 2010. Plus aucune exemption prévue en 2012 alors que l'essence est favorisée par son contenu énergétique plus élevé par unité de volume.

Selon la CGB, la France aurait importé en 2008 plus de 10 % de sa consommation d'éthanol sous diverse nomenclatures à faible taux de douane.

Les principaux producteurs de bioéthanol carburant français sont listés dans le tableau ci-dessous.

Principaux producteurs de bioéthanol carburant en France

Industriel	Sites	Mise en route	Matière première	Capacité de production	Agréments 2010
Tereos	Origny (Aisne)	10/2006	Betteraves	240 000 t	70 000 t
Tereos	Lillebonne (Seine Maritime)	6/2007	Céréales	240 000 t	160 500 t
Cristal Union	Bazancourt (Marne)	1ère tranche 6/2007	Betteraves / glucose	120 000 t	167 500 t
		T2 : 02 / 2009	Céréales	160 000 t	
Abengoa	Lacq (Pyrénées Atlantiques)	2007 09 / 2008	Vinique Céréales	40 000 t 160 000 t	120 000 t
Roquette Frères	Beinheim (Bas Rhin)	04 / 2008	Céréales	160 000 t	95 000 t

Source : SNPAA

Productivité des différentes cultures

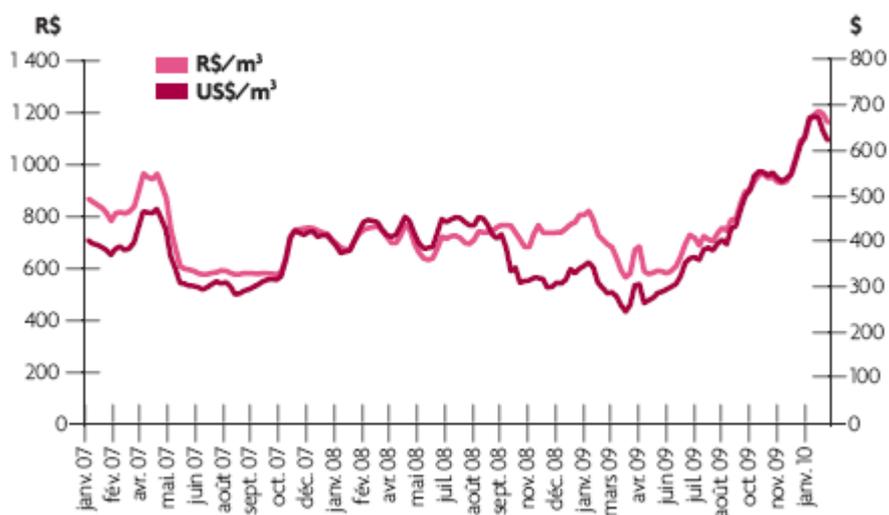
Il est difficile de comparer des modèles d'agriculture sous des climats très différents et avec des niveaux d'intensification – et donc de coûts de revient – variés. Il reste néanmoins intéressant d'examiner l'usage des terres que nécessite la production d'éthanol selon les modèles actuels.

Production d'éthanol à l'hectare de différentes cultures

Culture	l éthanol / ha	Commentaires
Canne à sucre	7500 (→ 9000 ?)	Les promoteurs des cannes à sucre OGM visent 12 000 l/ha !
Betterave	6500-7500 (→ 8500 ?)	Progression régulière des rendements en France.
Maïs	3500 -4500	
Blé	3000	
Sorgho sucré	4500	
Plantations lignocellulosiques	-	Objectif de 9000 l/ha

Le prix de l'éthanol dans l'Union européenne s'aligne largement sur celui au départ du Brésil auquel s'ajoutent le fret et les droits de douane.

COURS DE L'ÉTHANOL HYDRATÉ AU BRÉSIL (Esalq)



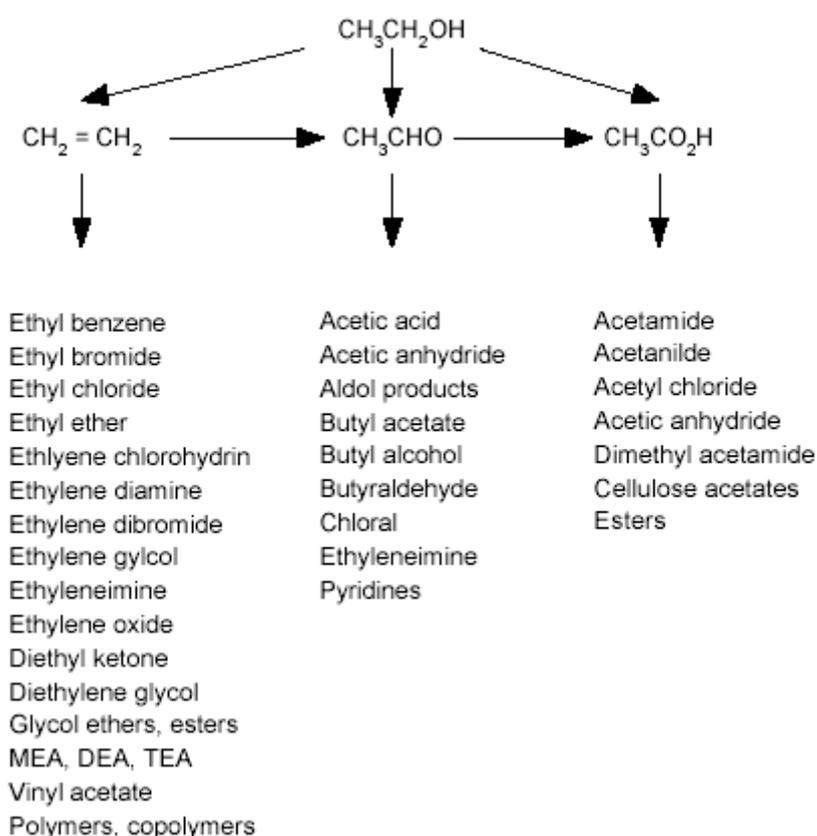
Source : Tereos – rapport annuel 2008-2009

III.1.3 – LES DERIVES DE L'ETHANOL

Dans l'étude de l'US DOE de 2004, l'éthanol n'était pas considéré comme une molécule plateforme. Avant cette époque, le Brésil avait pourtant déjà envisagé le développement d'une industrie valorisant l'éthanol comme précurseur de nombreux intermédiaires de synthèse. Dans leur mise à jour de 2009, Bozell et Petersen ont non seulement intégré l'éthanol à leur liste des "top 10" mais lui ont affecté la meilleure note pour tous leurs critères de classification (cf. IV.1).

Hormis par ses usages traditionnels dans l'alimentaire, la pharmacie et les solvants industriels, l'essor de la production d'éthanol végétal est assuré par les politiques de soutien aux biocarburants. Des productions massives ont été mises en place, avec des chaînes logistiques éprouvées et des procédés dont les coûts de revient sont régulièrement améliorés. Dans un tel contexte, face à la volatilité et la hausse structurelle du prix du pétrole, il est naturel que différents industriels engagent des projets de production d'intermédiaires chimiques à partir de bioéthanol.

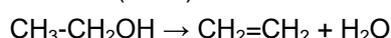
Intermédiaires de synthèse pouvant être produites à partir de l'éthanol.



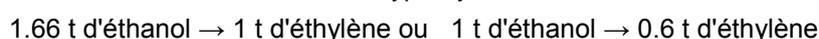
Source : Agriculture Canada.

L'éthanol comme précurseur de l'éthylène

Par déshydratation catalytique de l'éthanol à des températures d'environ 300°C , on peut obtenir de l'éthylène avec des bons rendements (99 %).



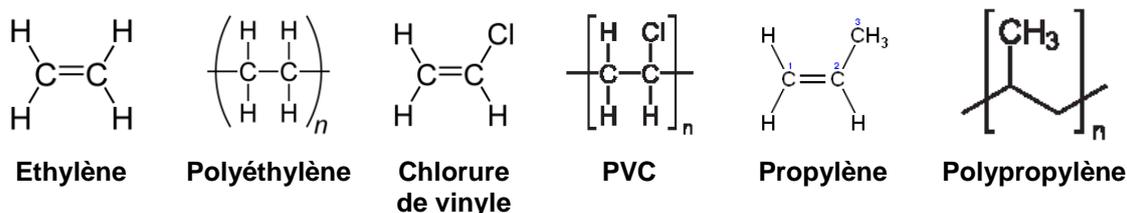
Les ratios de matière illustrent bien les pertes de masse associées à la conversion d'une molécule oxydée, à une molécule réduite, de type hydrocarbure :



A partir d'éthylène biosourcé, la production de tous ses dérivés en C2 peut être mise en œuvre selon les procédés classiques de la pétrochimie.

Les projets industriels qui se concrétisent sont encore en nombre restreints. Ils sont encore tous positionnés au Brésil, à proximité de la ressource, et se veulent répondre à des demandes bien identifiées de produits biosourcés.

- **Le groupe belge Solvay va fabriquer du PVC (polychlorure de vinyle) à partir d'éthylène obtenu par déshydratation de l'éthanol de canne à sucre dans son unité intégrée brésilienne (Solvay Indupa), à Santo André.** La capacité de production de bioéthylène sera de 60 000 tonnes/an, ce qui permet de produire 130 000 t de monomère de chlorure de vinyle. Le site a une capacité totale de production de 360 Kt et un tiers de celle-ci deviendra donc biosourcée. Le brésilien **Copersucar** gèrera l'approvisionnement de Solvay en éthanol.
- Le pétrochimiste brésilien Braskem a mené des travaux actifs sur la production de polyéthylène biosourcé depuis 2007. **Braskem construit actuellement une usine de capacité de 200 000 t/an d'éthylène, qui sera fabriquée à partir de bioéthanol.** L'unité est positionnée le site de Triunfo et devrait être opérationnelle dans les mois à venir. Elle produira à la fois du polyéthylène à haute et à basse densité.
- En 2007, **Dow** et le groupe sucrier brésilien **Crystalsev** avaient annoncé le projet de créer une entreprise commune pour produire du polyéthylène à base d'éthanol de canne à sucre. Depuis cette date, la crise économique est survenue. Dow semble avoir d'autres priorités. Crystalsev et son actionnaire endetté Santelisa Vale ont pour leur part été rachetés par le groupe français **Louis Dreyfus**.



Pour l'usine en projet de Braskem d'une capacité de production de 200 000 tonnes annuelles, les données de production par heure devraient être de l'ordre de grandeur suivant :

$$41.5 \text{ t éthanol} \rightarrow 25 \text{ t d'éthylène}$$

333 000 t d'éthanol seront nécessaires au fonctionnement annuel de l'usine.

La capacité mondiale de production d'éthylène est d'environ 150 millions de tonnes. Le prix (spot) du produit a varié ces dernières années entre 1 et 1.4 €/kg. La production mondiale de polyéthylène est d'environ 70 Mt, avec un prix qui a évolué entre 1.25 et 1.65 €/kg ces dernières années. Le prix du PVC a évolué pour sa part ces dernières années entre 0.7 et 1.2 €/t.

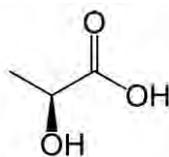
Autres projets valorisant de l'éthanol végétal

Braskem et **Novozymes** ont annoncé fin 2009 le lancement d'un projet de développement de la production de **polypropylène** à partir de canne à sucre pour une durée d'au moins 5 ans.

Le volume du marché mondial du polypropylène a été de 44 millions de tonnes en 2008 pour une valeur de 66 millions de \$ US. Le prix du produit a varié entre 1.1 et 1.25 €/kg ces dernières années.

III.2 - L'ACIDE LACTIQUE (C3)

Acide lactique



L'acide lactique est obtenu par fermentation du glucose mais aussi du saccharose. C'est donc un produit commun aux filières amidon et sucre, bien que les tonnages issus du glucose de maïs dominent encore le marché. L'acide lactique pourra à terme être également obtenu par fermentation des produits de fragmentation de la cellulose. La production d'acide lactique est largement dominée par l'entreprise néerlandaise **Purac** (200 000 tonnes/an). Le nord-américain **Cargill – Natureworks**, fabrique pour sa part de l'acide lactique comme intermédiaire de la production du polymère PLA (= poly lactic acid), avec 140 000 t de capacité industrielle. L'entreprise belge **Galactic** est le troisième opérateur et produit 70 Kt. Le marché mondial aurait un volume de 350 à 400 000 tonnes, en croissance régulière, de l'ordre de 7 % par an, le développement du PLA expliquant une part importante de celle-ci.

L'acide lactique existe sous forme de deux isomères optiques L(+) et D(-) qui sont présents en proportions identiques dans les productions obtenues par voie synthétique. L'acide lactique naturellement présent dans les être vivants est la forme L(+).

Plusieurs microorganismes (bactéries - notamment des bactéries lactiques comme les *Lactobacillus* - mais aussi des champignons filamenteux) produisent de l'acide lactique à partir de glucose ou de saccharose. Les procédés et les souches utilisées font partie des secrets industriels des entreprises. Certaines souches microbiennes peuvent être également sélectionnées pour produire l'isomère D.

Lors de la production d'acide lactique par fermentation, il est nécessaire de neutraliser le milieu obtenu pour ne pas inhiber la réaction. Du carbonate de calcium est généralement utilisé. Par la suite, le lactate de calcium obtenu est traité à l'acide sulfurique pour obtenir de l'acide lactique, le coproduit étant du sulfate de calcium (gypse). L'introduction de l'acide sulfurique dans le système dégrade les résultats d'analyse du cycle de vie de l'acide lactique et des solutions alternatives sont recherchées.

L'acide lactique est une molécule en C3 dont les propriétés sont étroitement liées à sa fonction carboxylique et à sa fonction alcool.

La principale utilisation de l'acide lactique reste celle de conservateur alimentaire. La molécule est également transformée en différents dérivés :

- Le **lactate d'éthyle**, un solvant utilisé comme agent nettoyant dans l'électronique.
- Le **lactate de 2 ethylhexyl**, une molécule plus lourde qui a des applications en fort développement dans l'agrochimie pour remplacer certains solvants.
- D'autres produits comme les lactates de propyle ou de butyle, utilisés comme de nouveaux solvants.
- Et bien entendu le **PLA**, décrit plus bas.

L'acide lactique peut être une molécule plateforme pour la production :

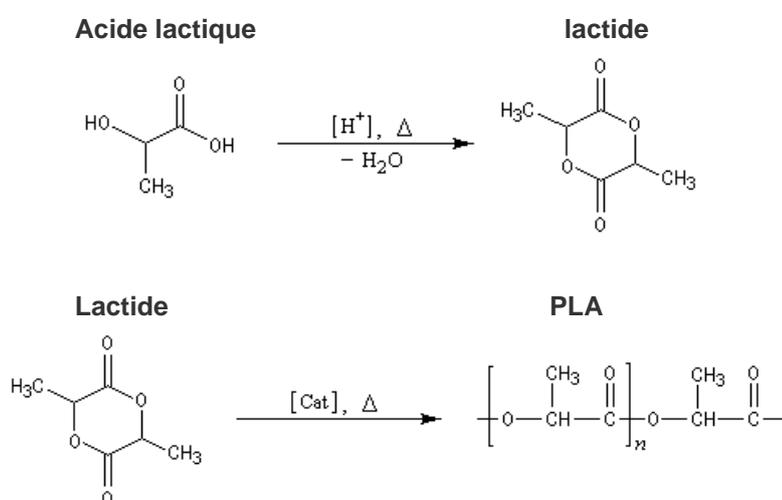
- d'**acide acrylique** au marché considérable (1.2 Mt avec un prix qui a varié entre 1.1 \$/kg et 2.45 \$/kg ces dernières années).
- de **1,2 propanediol** ou **mono propylène glycol** (une commodité, utilisée comme émulsifiant alimentaire, solvant pharmaceutique, humectant en cosmétique, antigel, etc..... Son prix a évolué ces dernières années entre 0.8 et

1.3 €/kg en Europe). A noter que des projets de production directe de 1,2 propanediol par fermentation de glucose ou de glycérol sont en cours de développement (**ADM, Metabolic Explorer**).

- d'acide pyruvique.

Le développement de ces dérivés à partir d'acide lactique dépendra directement du prix du baril pétrole. A 100 \$/baril, la production d'acide acrylique deviendrait rentable et à 130 \$/baril, celle du 1,2 propanediol pourrait être attractive.

Le PLA ou poly lactic acid est un polymère composé d'acide lactique dont la production se réalise par la cyclisation de deux acides lactiques en lactides, suivie de la polymérisation de ceux-ci après ouverture des cycles.



La production industrielle à grande échelle a été initiée en 2003 par **Cargill** et sa filiale **Natureworks** qui dispose de capacités de production de 140 000 tonnes et vend son PLA sous la marque Ingeo®. De nouveaux acteurs apparaissent sur le marché du PLA, un produit pour lequel les questions de propriété industrielle sont un thème complexe. **CSM/Purac** a ainsi annoncé, en mars 2010, le début de la construction à Rayong, en Thaïlande, d'une unité de 75 000 tonnes de L et D lactides, pour un investissement de 45 millions d'euros. Elle devrait être opérationnelle mi 2011. La joint venture **Futerro**, entre **Galactic** et **Total**, dispose déjà de capacités de production de 2000 t. Il existerait quelques autres projets industriels significatifs, principalement en Asie mais aussi en Allemagne. D'autres entreprises produisent de petites quantités de PLA, souvent pour des applications médicales.

Diverses prévisions du marché potentiel du PLA à l'horizon 2020 réalisées ces dernières années donnent lieu à des chiffres qui vont de 1.5 à 30 millions de tonnes ! L'enjeu industriel est bien entendu d'abaisser le coût de production de l'acide lactique et d'obtenir ainsi un PLA compétitif avec le polyéthylène. Un prix de 2.5 \$/kg semble accessible. Les concurrences d'usage avec d'autres plastiques biosourcés actuellement en développement ne sont guère prises en compte dans les projections annoncées.

Prévisions de la demande mondiale pour l'acide lactique et le PLA (Kt)

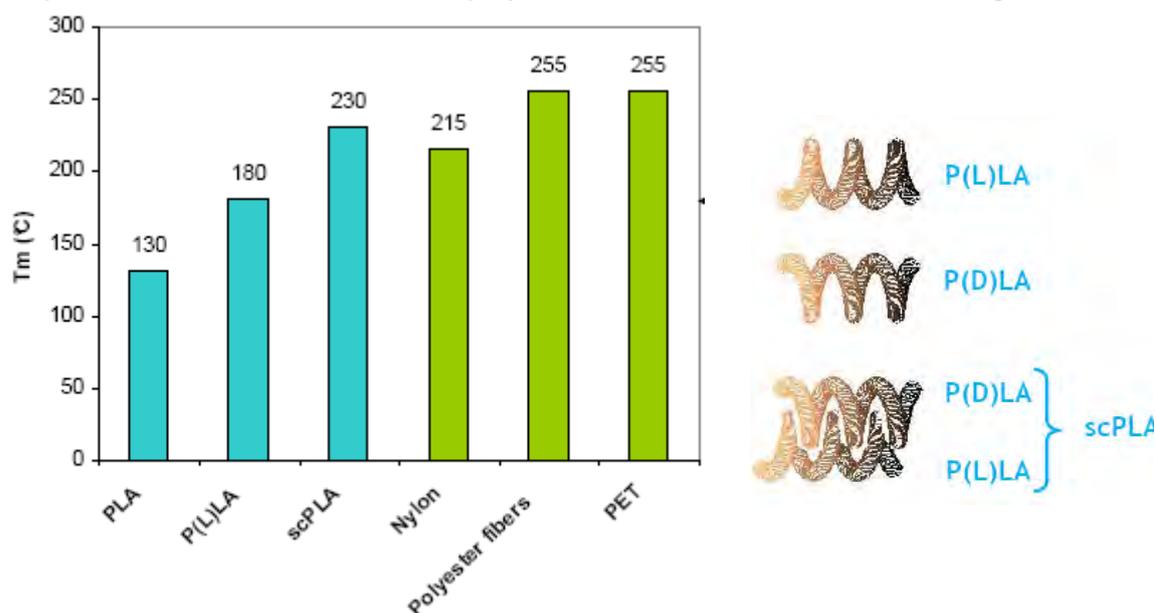
	2008	2015	2020
Acide lactique hors PLA	260	415	525
Acide lactique pour le PLA	108	540	1215
Total acide lactique	368	955	1740
PLA	80	400	640-900

Source : Galactic

Le PLA est un polyester thermoplastique qui peut être utilisé en films, fibres, emballages thermoformés, revêtements. Il a de bonnes propriétés de transparence. Natureworks/Cargill fait la promotion des performances environnementale et de l'analyse du cycle de vie de son produit.

Les propriétés du PLA dépendent toutefois de sa composition en isomère L et D d'acide lactique. Le PLA de première génération, issu de monomère L, a un point de fusion bas, de 180°C. Il en est de même pour un polymère du monomère D. Un PLA issu d'une mixture des deux isomères n'aurait un point de fusion que de 140 à 150°C ! En revanche, un mélange approprié de polymères L et D – fabriqués donc séparément - permet d'obtenir du PLA, dit de deuxième génération, dont le point de fusion peut dépasser 230°C. Les deux polymères ont des orientations d'hélices inversées et s'incrustent l'un dans l'autre, formant un ensemble plus stable.

Températures de fusion de différents polymères – Intérêt des PLA de seconde génération



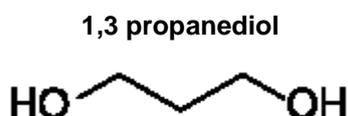
Le PLA est biocompostable mais seulement dans des conditions industrielles (biodégradabilité lente). Les industriels du secteur comme **Galactic** et **Cargill** développent donc des procédés de recyclage permettant une nouvelle production d'acide lactique à partir du PLA à des coûts acceptables.

Les coûts de revient et les valeurs de marché de l'acide lactique, des lactides et du PLA leur permettent de voyager et la logique industrielle consiste à les produire là où la matière première et les autres éléments de coûts sont les plus compétitifs.

III.3 - LE 1,3 PROPANEDIOL (C3)

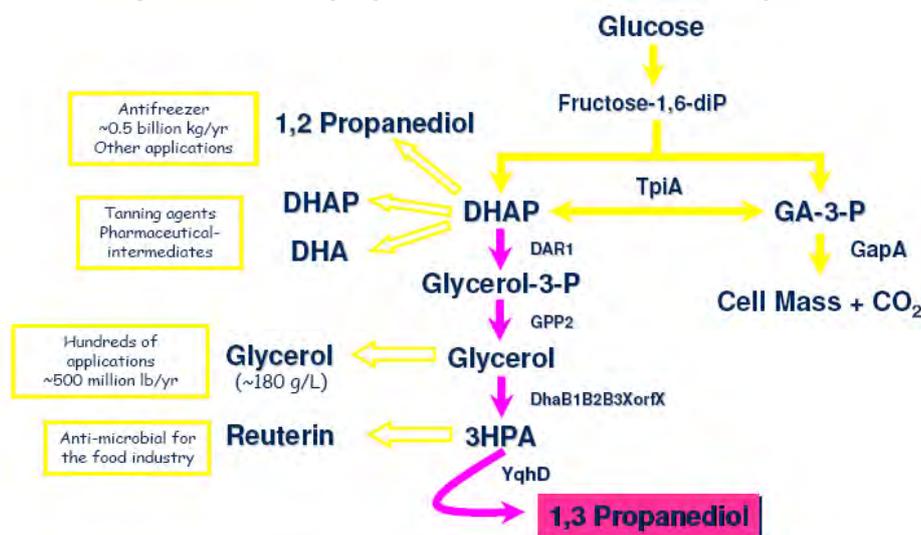
Le 1,3 propanediol ou PDO est une molécule dont la version d'origine pétrochimique est produite à partir d'oxyde d'éthylène par le groupe **Shell** dans une unité de capacité de 70 000 tonnes.

La production de PDO biosourcé peut s'effectuer par fermentation du glucose mais pourrait l'être aussi à partir de glycérol.



Genencor a développé une longue collaboration avec DuPont pour élaborer une souche d'*E. coli*, comportant des gènes issus de deux autres microorganismes (levure et *Klebsiella*), qui assure la bioconversion du glucose en 1,3 propanediol. Pour exploiter la technologie, DuPont a créé avec l'amidonier **Tate & Lyle** une joint venture **Dupont Tate & Lyle Bio Products LLC** qui a construit une unité industrielle de 45 000 t dans le Tennessee (USA). Celle-ci a réalisé ses premières productions commerciales en 2008. Ses capacités sont en extension de 35 % en cette année 2010. La matière première du PDO de DuPont Tate and Lyle est le glucose de maïs.

La voie de synthèse du 1,3 propanediol dans l'*E. coli* modifié par Genencor



Source : Genencor

La société française **Metabolic Explorer** disposerait d'une technologie performante pour produire du PDO à partir de **glycérol**. Celle-ci ne fait pas encore l'objet de partenariat et de valorisation industrielle.

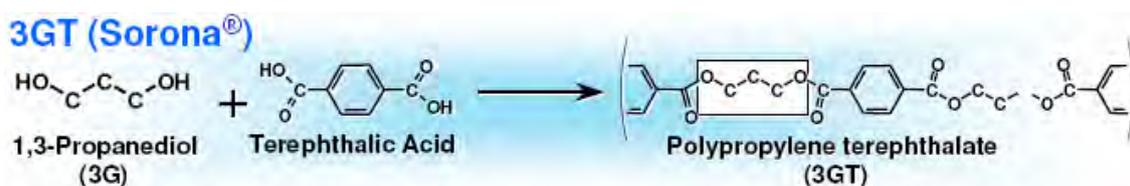
Le polytriméthylène téréphtalate ou PTT

Le 1,3 propanediol peut être polymérisé avec de l'acide téréphtalique pour former un polyester saturé, le Polytriméthylène téréphtalate (PTT). Les fibres de PTT ont une plus grande élasticité et une meilleure résistance que les fibres polyesters obtenues avec d'autres diols (Polyéthylène

téréphtalate = PET, à base d'éthylène glycol ou Polybutylène téréphtalate = PBT, à base de butyl glycol). En outre le PTT concurrence le nylon dans le secteur de la tapisserie avec une sensation plus douce au toucher.

Le produit a été commercialisé à partir de 1998 par **Shell**. Il a des applications variées en film, comme résine et comme fibre textile (particulièrement dans les tapis et les moquettes). Le groupe Shell commercialise son PTT d'origine pétrochimique sous la marque Corterra® alors que DuPont vend son produit issu de PDO renouvelable sous les marques Sorona® (fibres) et Biomax® PTT (applications dans l'emballage).

Les ventes de la fibre polymère Sorona® à base de PTT de Du Pont progressent rapidement et sont attendues à un niveau de 200 millions de \$ US en 2010.



Source : Genencor

III.4 – LES ISOPRENOIDES ISSUS DE FERMENTATION

Les terpènes ou isoprénoides ont été abordés une première fois dans cette étude, dans le chapitre consacré aux filières lignocellulosiques. Ce sont en effet des molécules présentes dans les arbres résineux et exploitées directement à partir du gemmage de pins ou comme coproduits de l'industrie de la pâte à papier. Les terpènes sont en réalité produits par de très nombreuses espèces végétales, annuelles, arbustives, ou arborées mais aussi par certaines bactéries.

Les isoprénoides ont des structures plus ou moins complexes, issues de la condensation de molécules à 5 atomes de carbone de type isoprène. A partir de molécules du métabolisme de base, deux voies, désignées par le nom de certains intermédiaires, permettent la production d'un précurseur commun aux différents terpènes, l'isopentényl diphosphate (IDP).

- La voie dite mévalonique ou du mevalonate (MVA pathway), en 6 étapes, à partir de l'acétyl-CoA.
- La voie désignée du DXP (1-Déoxy-D-Xylulose-5-Phosphate) mais aussi du MEP (2-C-méthyl-D-érythritol-4-phosphate) , à partir de l'acide pyruvique et du glycéraldéhyde-3-P (G3P).

L'IDP (isopentényl di-phosphate)



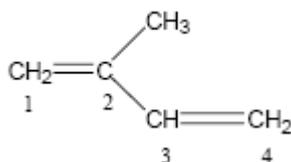
L'IDP peut être transformé en isoprène ou faire alors l'objet de condensations successives pour générer des molécules terpéniques de différentes tailles, dont la structure de base comprend donc un multiple de 5 carbones.

D'intéressantes innovations, en cours de développement, consistent à introduire les éléments de voies métaboliques végétales concernées dans des microorganismes bactériens bien maîtrisés (comme *Escherichia coli*) ou des levures. On peut ainsi produire par fermentation des terpènes à partir de sucre ou de glucose.

Les terpènes sont des hydrocarbures qui peuvent avoir des applications massives comme biomatériaux ou comme biocarburants.

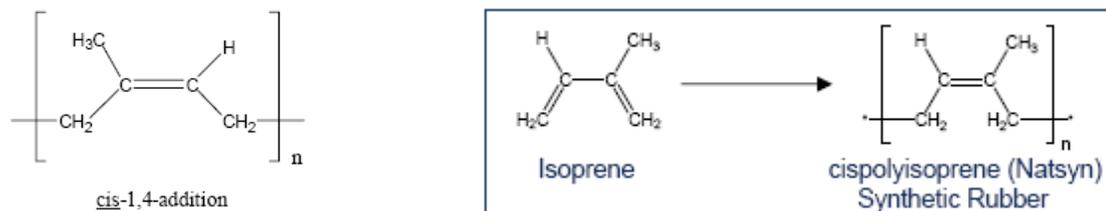
III.4.1 - LA PRODUCTION D'ISOPRENE

Le monomère du polyisoprène, l'élastomère proche du caoutchouc naturel utilisé notamment pour la production de pneumatiques est l'isoprène :



Le caoutchouc naturel (NR = Natural Rubber), issu du latex de l'hévéa, est principalement composé par des chaînes de poly(cis-1,4-isoprène) avec des groupements terminaux dont la nature exacte n'est pas entièrement connue. Le polyisoprène d'origine pétrochimique (IR =

Isoprene Rubber) est obtenu par valorisation de coproduits en C5 de la production d'éthylène. Les procédés mis en œuvre permettent de maximiser la production de poly(cis-1,4-isoprène).



Genencor (groupe Danisco) et le fabricant de pneumatiques **Goodyear** ont engagé un partenariat pour produire du bio-isoprène par fermentation.

La base de l'analyse stratégique de Goodyear est la suivante : les besoins du groupe en caoutchouc, synthétique comme naturels, sont en forte croissance et constituent chacun un quart de ses consommations en matières premières. Les cours des produits d'origine fossiles sont en hausse structurelle et la production mondiale de caoutchouc d'hévéa n'offre pas des perspectives suffisantes de croissance.

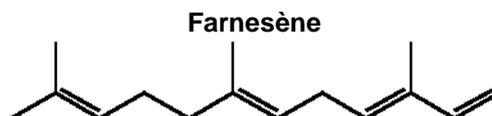
Quand à Genencor, l'entreprise souhaite développer son activité d'ingénierie métabolique et, à cette occasion, faire évoluer sa position dans la chaîne de valeur des bioproduits, en assurant elle-même la production du bioisoprène tant pour Goodyear que pour d'autres clients et d'autres applications. L'isoprène est produit sous forme de gaz, ce qui facilite considérablement sa purification.

Des fabrications pilotes de Bio-Isoprène seraient déjà effectives mais les productions commerciales ne sont pas attendues avant 2013. Le marché cible qui est celui de l'isoprène de haute qualité (cis-polyisoprène) représenterait plus de 850 000 tonnes de produit pour une valeur de 1 à 1.5 milliards d'euros. Il s'inscrit dans le marché plus vaste de près de 5 millions de tonnes des applications potentielles de l'isoprène.

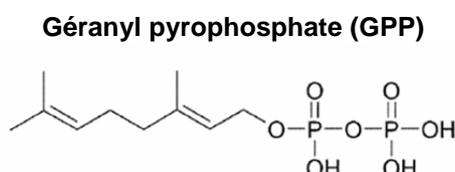
III.4.2 – LA PRODUCTION DE TERPENES BIOCARBURANTS

La société nord-américaine **Amyris Biotechnologies Inc.** a acquis une forte expertise des carburants et développe des technologies de production par fermentation (à partir de sucres), de certaines molécules terpéniques utilisables directement comme carburant diesel, carburant pour moteurs à essence ou carburants d'avion.

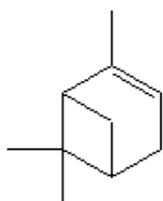
Il s'agit principalement d'isoprénoïdes en C15, de type farnésène, pour la substitution directe au gazoil après hydrogénation, et de dérivés en C10 du géranyl pyrophosphate (GPP) : des pinènes pouvant être hydrogénés en tétraméthylcyclohexane, substituable ou incorporable à l'essence.



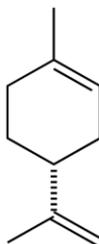
Le farnésène, en C15 peut être synthétisé dans un microorganisme à partir de l'IPP par l'action d'une farnésène synthase. Il est par la suite hydrogénable en **farnésane**.



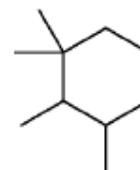
Le géranyl pyrophosphate (GPP), en C10, peut être obtenu en une étape métabolique à partir de l'IPP (l'enzyme nécessaire est la Géranyl diphosphate synthase).



α pinène, pouvant être produit par les levures modifiées d'Amyris.



Le **limonène**, un autre terpène en C10 pouvant être produit dans les levures modifiées d'Amyris.



Une des formes isomériques du **tétraméthylcyclohexane** en C10, pouvant être produit par hydrogénation de terpènes en C10.

Pour valoriser ces technologies, la filiale brésilienne d'Amyris a conclu plusieurs partenariats fin 2009 avec d'importants producteurs de sucre, actifs dans le pays : le groupe international **Bunge**, l'entreprise brésilienne **Cosan**, et **Açúcar Guarani**, la filiale brésilienne du groupe coopératif français **Tereos**. Le même mois, Amyris a pris une participation dans l'unité de production d'éthanol Boa Vista du groupe **São Martinho** et va construire sur le site son premier atelier de fabrication de farnésène, d'une capacité annuelle de 100 000 m³.

Aux Etats Unis, Amyris s'est vu décerné une subvention de 25 millions de dollars du ministère de l'énergie des Etats-Unis pour produire de biodiesel à partir de sorgho sucré. Amyris est également actif en Australie.

Le 23 juin 2010, l'annonce d'une prise de participation du groupe pétrolier français **Total** de 17 % au capital d'Amyris démontre une nouvelle fois l'intérêt que suscitent les technologies développées par l'entreprise nord-américaine. D'autres annonces se sont succédé peu après avec la signature de partenariats avec l'italien spécialiste du PET **M&G – Mossi & Ghisolfi** qui travaille sur des projets de carburants de seconde génération. Plus original encore et à l'écart des biocarburants, un accord a été conclu avec **Procter and Gamble** pour développer des produits de spécialités parmi les gammes de ce groupe

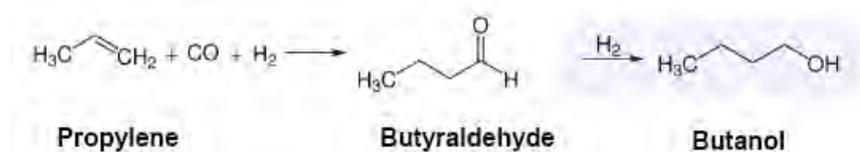
III.5 - BUTANOL, ISOBUTANOL, ISOBUTENE

Ces molécules ont en commun d'être toutes en C4 et d'avoir des applications possibles dans le domaine des carburants. Leurs propriétés sont toutefois différentes : le butanol (= n ou 1, butanol) et l'isobutanol sont des alcools, l'un sous forme de chaîne linéaire, l'autre ramifié, alors que l'isobutène est un hydrocarbure.

L'émergence des projets de production de ces 3 molécules est largement portée par les volontés publiques et industrielles de développement de biocarburants de seconde génération, valorisant à terme un vaste panel de matières premières lignocellulosiques. En 2005, ces 3 molécules n'étaient pas des pistes très mobilisatrices alors qu'aujourd'hui le nombre d'entreprises actives sur la mise au point de procédés de production efficaces est important. En comparaison de l'éthanol, le butanol et l'isobutanol présentent plusieurs avantages : plus forte densité énergétique ; moins hydrophiles ; meilleures comptabilités, tant avec les infrastructures de stockage/transport des carburants qu'avec les moteurs automobiles courants ; pressions de vapeur moins élevées ; moins corrosifs. **L'isobutanol est particulièrement compatible avec le carburant diesel alors que le butanol est miscible avec l'essence.**

Produits aujourd'hui de la pétrochimie, ces 3 molécules sont également importantes par les volumes leurs usages ou ceux de leurs dérivés dans les solvants, vernis, peintures et polymères de type élastomère ou thermoplastiques.

Le butanol est classiquement produit à partir de propylène selon l'"oxo process". Le produit a des usages directs de solvant dans les vernis, peintures et adhésifs. Ses dérivés (acétate de butyle, métacrylate de butyle, phtalate de dibutyle [*dont les usages sont désormais restreints*]) ont des applications variées (solvants pour laques et vernis mais aussi arôme alimentaire "pomme" en ce qui concerne l'acétate de butyle, thermoplastiques pour les polyacrylates, plastifiants pour les phtalates, etc.). La demande mondiale de butanol est estimée entre 3.5 à 4 millions de tonnes pour une valeur de près de 4 milliards d'euros. Le cours du produit a évolué ces dernières années entre 750 et 1200 €/t. Les principaux producteurs sont **BASF, Dow, Cel-Oxeno, Kyowa**, etc. Pour sa part, l'acétate de butyle a eu des évolutions de prix assez similaires ces dernières années, dans la fourchette de 850 à 1170 €/t.



Le n-butanol est naturellement un des produits des fermentations dites ABE (acétone-butanol-éthanol) de *Clostridium acetobutylicum*. Des unités chinoises importantes produiraient encore du butanol en mettant en œuvre ce modèle de fermentation. Les projets récents utilisent des souches sélectionnées, mutantes ou OGM permettant une production spécifique de butanol, un des facteurs limitant étant sa toxicité pour les microorganismes concernés. Des souches plus tolérantes et des procédés d'extraction en continu ou semi-continu sont donc nécessaires. Le développement des projets de production de butanol est souvent lié à celui de biocarburants de seconde génération, la biomasse lignocellulosique étant la matière première cible à moyen terme.

L'isobutanol (=2-méthylpropane-1-ol) est un isomère ramifié du butanol présentant des propriétés légèrement différentes.

L'isobutanol est également utilisé comme solvant dans les vernis, peintures, etc. Ses dérivés sont homologues de ceux du butanol (acétate d'isobutyle utilisé comme solvant pour les peintures et laques mais aussi pour ses propriétés aromatiques en parfumerie, Di-isobutyl Phtalate (DIBP) aux propriétés de plastifiant).

L'isobutanol est également un produit naturel de la fermentation des glucides. Ses voies de biosynthèse sont toutefois différentes de celles du butanol.

Propriétés comparatives de l'isobutanol, du butanol et de l'éthanol pour les carburants

Molécules	Iso butanol	n-butanol	Ethanol
Densité à 20°C	0.802	0.810	0.794
T°C ébullition à pression ambiante	108	118	78
Solubilité dans l'eau à 20°C (g/l)	85	77	miscible
Pression de vapeur à 20°C (hPa)	5.6	5.6	
RON (Research Octane Number)		96	107
Compatibilité	Gasoil	Essence	(Essence)

De nombreuses entreprises de biotechnologies – certaines de création très récente - se sont positionnées sur la production de butanol par fermentation. Il n'est pas toujours clair si leur cible est uniquement le n-butanol ou si l'isobutanol fait également partie de leurs objectifs. Ce ne sont pourtant pas les mêmes voies métaboliques qui sont en jeu.

Les barrières à franchir sont en revanche similaires : les produits de la réaction sont inhibiteurs des souches qui les produisent, les rendements doivent être accrus avec plus de flexibilité sur les matières premières de fermentation, les souches doivent être rendues plus robustes et les procédés de séparation et de purification plus efficaces pour permettre à terme des fermentations continues.

Principales entreprises actives sur le butanol ou l'isobutanol

Entreprise	Pays	Molécule	Plateforme technologique	Etat d'avancement
Arbor fuels	USA	butanol	Levure. Valorisation de biomasse cellulosique.	?
Butamax*	UK	Isobutanol et butanol ?	<i>Clostridium</i> et <i>E. coli</i> modifiés.	2013 : commercial
Butalco	Suisse	butanol ?	Levure OGM métabolisant les C6 et C5 – valorisation de biomasse lignocellulosique.	?
Butyl Fuel	USA	butanol	<i>Clostridium</i> OGM et mutants	?
Cobalt Biofuels	USA	butanol	Souche <i>Clostridium</i> non OGM	2010 : pilote 2012 : commercial
Gevo	USA	Isobutanol (+ butanol ?)	<i>E coli</i> ? Levure modifiée pour le métabolisme de la valine ?	2010 : pilote 2011 : commercial
Green Biologics	UK	butanol	<i>Clostridium</i> OGM	Démonstration en Inde en construction
Met Ex	France	butanol	<i>Clostridium acetobutylicum</i> OGM	Prépilote industriel en 2009
Syngas Biofuels	USA	butanol	Fermentation de gaz de synthèse obtenu par catalyse thermochimique	?
Tetra Vitae	USA	butanol	Souche <i>Clostridium beijerinckii</i> non OGM	Pilote 10 000 l en 2010
Autres projets	Chine	butanol	Fermentation ABE de <i>Clostridium</i> sélectionnés → GMO	Productions ABE importantes

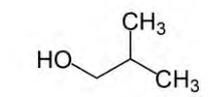
D'après Pomotum pour le NREL – USA - mars 2010, modifié.

* Butamax est une joint venture entre DuPont et BP.

L'isobutène ou isobutylène pourrait être obtenu par fermentation directement sous forme gazeuse et facile à purifier, (technologie de la start up française **Global Bioenergies**). Il existe en effet des possibilités d'obtenir de l'isobutène à partir de molécules du métabolisme cellulaire en très peu d'étapes de réactions biologiques L'isobutène peut être également fabriqué par déshydratation de l'isobutanol (c'est la voie retenue par l'entreprise nord américaine **Gevo**).

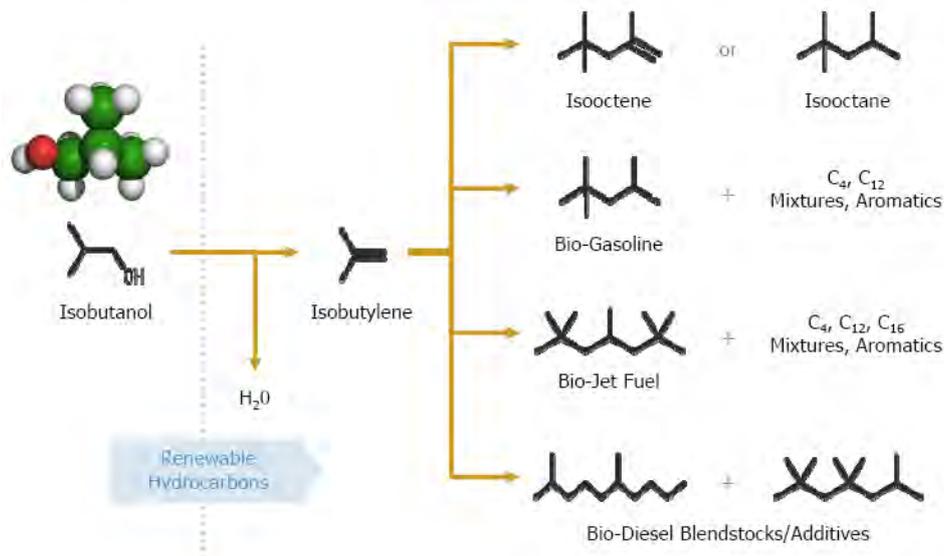
L'isobutène est une base de fabrication d'additifs de carburants oxygénés comme le MTBE (éther méthyl-tertiobutyle = $H_3C-O-C(CH_3)_3$, par réaction avec le méthanol) et l'ETBE (éther éthyl-tertiobutyle $H_3C-CH_2-O-C(CH_3)_3$), par réaction avec l'éthanol.

L'isobutène est également le monomère du polyisobutylène (= polyisobutène, PIB) qui a des applications comme caoutchouc synthétique (usage notamment en revêtement intérieur de pneumatiques, etc.) mais aussi comme additif de lubrifiant. L'entreprise allemande **Lanxess**, leader mondial du caoutchouc synthétique a démontré son intérêt pour la technologie de Gevo en entrant à son capital mi 2010.

Molécule	Formule	Production par voie pétrochimique	Marché	Applications	Production par fermentation
n – butanol = 1, butanol		Propylène (Oxo Proces)	3.5-4 Mt 3.5-4 M€ (0.75-1.2 €/kg)	Solvant, additif de l'essence. Dérivés : acétate de butyle (solvant, arôme), polyacrylate de butyle (thermoplastique), phtalate de dibutyle.	Clostridium acetobutylicum modifiés, Levures modifiées.
Isobutanol $C_4H_{10}O$		Carbonylation du propylène (via hydroformylation)	455 Kt ?	Solvant, additif de carburants diesel. Acétate d'isobutyle, (solvant, arôme), phtalate de diisobutyle = DIBP (plastifiants), additif de peintures,	Levures. E. coli modifiées ? Autres ?
Isobutène = isobutylène		Déshydrogénation catalytique de l'isobutane. Déshydratation de l'isobutanol.	3 Mt ?	Précurseur de l'ETBE et du MTBE (additifs donneurs d'oxygènes pour carburants). Monomère du PIB (élastomère). Précurseur possible du P-xylène, d'isooctène, etc.	Production directe sous forme gazeuse. Déshydratation de bio isobutanol.

Selon Gevo, le marché potentiel de l'isobutanol dans la chimie se décline en 455 Kt (usages directs de la molécule), 3 Mt pour produire de l'isobutène et de 33 Mt pour produire du P-xylène ! Côté biocarburants, les marchés potentiels laissent rêveurs : près de 500 millions de tonnes... Le volume des marchés ne sera donc pas le facteur limitant !

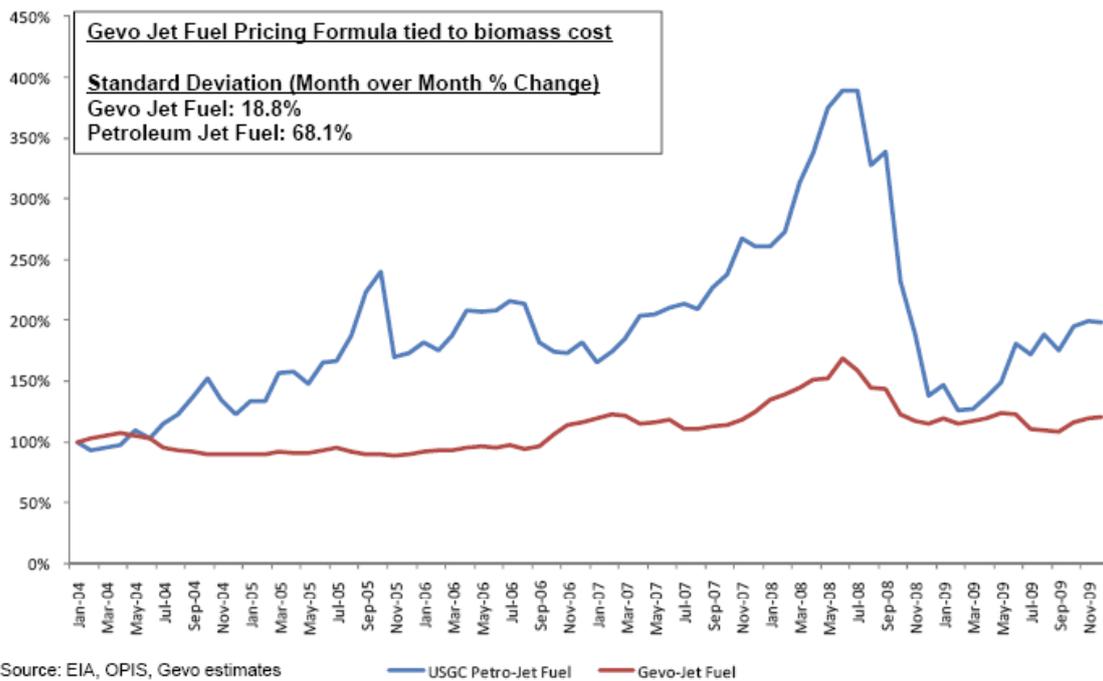
Isobutanol, isobutène et leurs dérivés dans les carburants



Source : Gevo, 2010.

Gevo a réalisé une simulation rétrospective de prix de carburants pour avion, fabriqué à partir d'isobutanol d'amidon de maïs et obtenus selon sa technologie (figure ci-dessous). La comparaison avec les cours réels du kérosène démontre encore la meilleure stabilité des prix des matières premières végétales mais sans intégrer les modifications des règles du marché qu'entraîneront le développement de leurs usages massifs comme source d'énergie et les possibles spéculations associées.

Simulation (rétrospective) d'évolution du prix de l'isobutanol de Gevo, obtenu à partir d'amidon de maïs en comparaison de l'évolution du prix du kérosène



IV - ELEMENTS TRANSVERSAUX

Dans ce chapitre seront présentés différents éléments transversaux saillants, concernant tant le développement de la chimie du végétal que celui des bioraffineries et des ensembles industriels qu'elles constituent.

IV.1 – LE DEVENIR DES TOP 10 BUILDING BLOCK CHEMICALS DE 2004

En 2004 le Ministère de l'Energie des Etats-Unis (US DOE) avait fait réaliser une étude, intitulée "**Top Value Added Chemicals From Biomass - Volume I: Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas**", ayant pour objectif de lister les molécules pouvant être dérivées de la biomasse et présentant un potentiel particulier comme plateformes pour l'industrie chimique. Seuls les molécules issues des sucres et de gaz de synthèse avaient été prises en considération dans cette première étude.

300 molécules avaient été passées en revue et fait l'objet de premières évaluations. Celles-ci n'avaient pas permis de réduire suffisamment le nombre de molécules "candidates". En analogie avec les classifications issues de la pétrochimie autour de 8-9 molécules plateformes, les biomolécules avaient été classées, selon leur nombre de carbones, en "**building blocks**" qui avaient été évalués de façon itérative, selon un nouvel ensemble de critères, incluant les coûts estimés de la matière première et du procédé de production, la complexité technique des meilleurs procédés de production disponibles, le nombre de fonctionnalités et la multiplicité des dérivés, les usages actuels dans la chimie courante, les prix de vente et les marchés potentiels.

50 puis 30 molécules (les "top 30") ont ainsi été sélectionnées. Elles ont toutes des fonctionnalités multiples leur permettant de générer de nombreux dérivés, le potentiel d'être produit aussi bien à partir de lignocellulose que d'amidon, ne sont pas des molécules aromatiques dérivées de la lignine et n'étaient pas encore - en 2004- des commodités établies.

Une deuxième itération a permis de réduire la liste à **14 molécules** figurant dans un tableau de 12 lignes, compte tenu du caractère apparenté de certaines molécules. Ainsi a été constituée la liste des fameux "top 10" qui n'ont donc jamais été exactement au nombre de 10 !

Le projet européen BREW était spécifiquement consacré à l'étude de l'impact des biotechnologies blanches. Son rapport final de septembre 2006 a présenté l'analyse comparative de différents produits, choisis selon les critères suivants :

- Substances produites en quantités importantes, à partir de la biomasse, en mettant en œuvre des biotechnologies.
- Commodités issues aujourd'hui de ressources fossiles mais offrant des perspectives d'être produites à partir de la biomasse, avec des procédés impliquant la mise en œuvre de biotechnologies.
- Nouvelles molécules biosourcées présentant des analogies fonctionnelles avec celles de la pétrochimie.
- Molécules plateformes potentielles biosourcées, pouvant être à l'origine de nombreux dérivés et avec la perspective d'être produites en quantités importantes.

27 molécules plateformes, "émergentes, issues des biotechnologies", ont été par la suite sélectionnées selon une liste ajustée de critères :

- Potentiel de substitution fonctionnel à des substances pétrochimiques de la molécule ou de ses dérivés.
- Diversité des dérivés pouvant être obtenus à partir de la molécule, en relation avec ses fonctionnalités propres.

- Intérêt stratégique, en relation avec les perspectives de marché et les autres facteurs du développement futur de la molécule.
- Complexité technique des voies de synthèse de la molécule à partir de la biomasse et de l'obtention de ses dérivés.

Fin 2009, près de six ans après le premier rapport DOE, deux de ses auteurs (Bozell et Petersen) ont revisité la liste précédente, à l'aide des 9 critères suivants :

- (1) Abondance de la littérature (et donc de la recherche amont) sur la molécule.
- (2) Molécule dont la production est associée à une technologie applicable à de nombreux produits.
- (3) Potentiel de substitution directe à des molécules pétrochimiques.
- (4) Technologie de fabrication du produit applicable à des volumes importants.
- (5) Fort potentiel comme plateforme (= avec de nombreux dérivés).
- (6) Productions pilotes ou industrielles en cours de développement.
- (7) Molécule déjà commercialisée.
- (8) Produit pouvant constituer une molécule de base ("building block") de bioraffineries.
- (9) Production commerciale à partir de sources de carbone renouvelables bien établie.

Comparaison des trois études

La comparaison des 3 listes obtenues de molécules est réalisée dans le tableau de la page suivante. Les 9 critères de Bozell et Petersen étant exprimés sous forme de "+", "++" ou "+++", nous avons pris la liberté de compter le "nombre de croix" que totalisait chaque molécule et d'affecter ainsi une note sur 27 à chacune des substances prises en compte.

Le tableau comporte finalement 38 molécules. Il appelle plusieurs commentaires :

- (1) **Seules 5 molécules : le glycérol, l'acide 3-hydroxypropionique (tous deux en C3), l'acide succinique (C4), l'acide levulinique (C5) et le sorbitol (C6), ont été retenues dans les 3 études.**
- (2) **L'éthanol**, dont la production à partir de la biomasse est connue depuis les temps les plus anciens, n'apparaît pas dans l'étude DOE 2004. Le bioéthanol était alors considéré comme un biocarburant mais pas comme une plateforme pour produire des intermédiaires chimiques importants. La concrétisation de projets de production de polyéthylène (**Braskem**) et de PVC (**Solvay**), au Brésil, incite à intégrer l'éthanol et ses dérivés – via la chimie de l'éthylène - dans la liste actualisée des "top 10" (ils sont cette fois 13 !). D'ignoré en 2004, l'éthanol devient l'une des 3 molécules les mieux notées dans l'étude 2009 !
- (3) **Le glycérol** est une des rares molécules élues dans les 3 études. Elle obtient le même "score" maximum, que l'éthanol en 2009. Il est vrai que le développement du biodiesel de 1^{ère} génération a permis d'augmenter d'autant les volumes de glycérol et d'en faire baisser les prix. Les dérivés actuels (épichlorhydrine) et potentiels (PDO, etc.) sont nombreux mais la disponibilité du produit reste à long terme difficile à prévoir car, contrairement à l'éthanol, le glycérol ne sera pas un produit des filières lignocellulosiques. Sera-t-il dans un avenir - encore plus hypothétique - un coproduit massif des biocarburants de 3^{ème} génération, issu des microalgues ? Ou un coproduit d'une oléochimie large, rajeunie par le renchérissement des matières premières d'origine fossiles ? A l'extrême, produira-t-on, dans un avenir à définir, du glycérol à partir de sucres de la biomasse lignocellulosique ?
- (4) **Le 3-HPA** (acide hydroxypropionique) est également une molécule confirmée dans son intérêt d'une étude à l'autre. Le projet le plus visible reste celui de **Cargill** et de **Novozymes** mais reste une démarche de longue haleine (elle était déjà annoncée en 2005).

C	Nature	Molécule	DOE 04	BREW 06	Bozell 09	Origine biomasse	Etat développement	Applications	Producteurs
2	Ac c	Acide acétique	-	+	-		-		
2	Alcool	Ethanol	-	+	27	Sucre, amidon (cellulose)	Commodité	Biocarburant, (PE, PVC)	ADM, Cargill, Tereos, etc.
3		Ac. acrylique	-	+	-	Glycérol, sucres	R&D		Arkema, OPX,
3	Alc	Glycérol	Top 10	+	27	Huiles, co-produit biodiesel	Commodité	Epichlorhydrine, (HPA,PDO)	Sofiproteol, ADM, Cargill
3	Ac car	3 HPA	Top 10	+	16	Amidon, (glycérol)	R&D industrielle	Acrylates, PDO	Cargill-Novozymes
3	Ac car	Ac. lactique	Top 30	+	17	Amidon, sucre	Commodité-	Alimentaire, solvants, PLA	Purac, Cargill, Galactic, etc.
3	Ac car	Acide malonique	Top 30	-	-				?
3	Alcool	1,3 propanediol (PDO)	-	+	-	Amidon maïs (glycérol)	Commercial	Polymères et divers	DuPont (Met Ex)
3	Ac car	Acide propionique	Top 30	-	-		Commercial		BASF
3	Ac am	Serine	Top 30	-	-				
4		Acetoin	Top 30	-	-				
4	Ac am	Ac. aspartique	Top 10	+	-	Mélasses	-	Agroalimentaire	
4	Alc	1-butanol	-	+	-	Sucres, lignocellulose	R&D	Carburant	Arbor, Cobalt, Met Ex, etc.
4	Alcool	1,4 - butanediol	-	+	-	Glucose (xylose)	R&D	Solvants, polymères, GBL	Genomatica
4	Ac car	Ac. fumarique	Top 10	+	-	Amidon, sucres	-		
4		3-hydroxybutyrolactone	Top 30		-				
4		Ac malique	Top 30		-				
4	Ac car	Ac. succinique	Top 10	+	17	Amidon	Pré commercial		Bio Amber, Roquette, Purac
4	Ac am	Thréonine	Top 30	-	-	Sucre, amidon	Commodité	Feed	ADM, Ajinomoto
5	Alc	Arabinitol	Top 30	-	-				
5	Furane	Furfural	Top 30	+	18	Xylose (hémicellulose)	Commercial		Transfuran chemicals
5	Ac am	Ac. glutamique	Top 10	-	-		Commercial		
5		Isoprène	-	-	20	Sucre, amidon	R&D, pilote	Pneumatiques, carburants	Genencor, Amyris
5	Ac car	Ac. itaconique	Top 10	+	-	Amidon	Commercial		Itaconix
5	Ac car	Ac. levulinique	Top 10	+	21	Sucres, (lignocellulose)			Technologie Biofine/Biometix
5	Ac am	Proline	Top 30	-	-				
5	Alcool	Xylose, xylitol	Top 10	-	19	Hémicelluloses	Commercial	Furanes	
5		Ac. xylonique	Top 30	-	-				
6		Ac aconitique	Top 30	-	-				
6		Acide adipique	-	+	-	Huiles	R&D	Polyamide 6.6 (=Nylon 6.6)	Projet Verdezyne
6		Ac citrique	Top 30	-	-		Commercial	Alimentaire	ADM, Cargill
6	Furane	2,5 FDCA	Top 10	-	14	Fructose (amidon)	R&D	Polymères, carburants	Avantium
6	Ac car	Ac. glucarique	Top 10	-	-	Glucose	R&D		Rivertop Renewables
6	Ose	Glucose	-	+	-	Amidon, (sucre, cellulose)	Commodité	Chimie du glucose	Majorité des amidonniers
6	Furane	HMF	-	+	14	Glucose (amidon)	Commercial	Plastiques, caburants	
6		Levoglucosan	Top 30	-	-				
6	Ac am	Lysine	Top 30	-	-	Mélasses	Commercial	Feed, pharma	ADM, Ajinomoto
6		Sorbitol	Top 10	+	27	Amidon	Commodité	Food, pharma, isosorbide	Nombreux amidonniers

- (5) **L'acide lactique**, un produit ancien et connu pour ses nombreux dérivés, était déjà identifié comme le précurseur du PLA en 2004 mais n'avait pas fait partie de la sélection finale des "top 10". Le PLA est une réelle innovation avec un potentiel d'amélioration de ses caractéristiques, ce qui stimule l'intérêt pour l'acide lactique.
- (6) **L'acide succinique** est présent sur les 3 listes et la multiplication des projets industriels en phase d'aboutissement témoigne d'une recherche industrielle active. Le développement de marchés significatifs (et donc la bonne tenue des coûts industriels) reste le challenge à venir.
- (7) **L'acide levulinique** est également présent dans les 3 listes successives. Il est séduisant par son caractère de plateforme mais ne semble faire encore l'objet de développements industriels importants, restant donc une molécule du futur, probablement associé aux développements de bioraffineries de seconde génération.
- (8) **Le Furfural**, est un furane en C5. C'est lui aussi une molécule dont l'avenir de masse dépendra du succès des technologies de traitement de la biomasse lignocellulosique. Il est produit par conversion chimique du xylose.
- (9) **Le FCDA**, est un autre furane mais en C6, et apparenté à l'HMF. Produit par conversion chimique du fructose avec des rendements qui progressent, il présente de nombreux dérivés, dans les polymères et les additifs
- (10) **L'isoprène** n'apparaît que dans l'étude la plus récente. Le projet de **Genencor/Goodyear** n'a été annoncé que fin 2008. Ceci démontre que les analyses prospectives d'experts peuvent ignorer totalement des pistes à l'impact potentiel considérable.
- (11) Devenus prudents avec l'exemple de l'isoprène, Bozell et Petersen ont intégré une treizième catégorie de produits dans leurs nouveaux "top 10", nommée **"other hydrocarbons"** (autres hydrocarbures), beaucoup moins précisément définie que les 12 autres et que nous n'avons pas fait figurer dans le tableau précédent. Les projets comme ceux d'**Amyris**, de production de biocarburants d'origine terpénique, pourraient être rattachés à la plateforme isoprène car l'IPP (isopentényl diphosphate), précurseur direct de l'isoprène, est la base de l'ingénierie métabolique mise en œuvre.
- (12) **L'HMF (hydroxyméthyl furfural)** en C6, présente les mêmes perspectives que le FCDA dont il est proche. Il est aujourd'hui issu du glucose par conversion chimique.
- (13) Le **sorbitol** fait partie du groupe de molécules sur lesquelles l'avis est constamment positif. Il dispose d'une base importante d'applications agroalimentaires et pharmaceutiques et le développement de ses dérivés pour l'industrie est actif avec en particulier l'**isosorbide** et ses nouveaux dérivés dans les polymères.
- (14) Plusieurs molécules ont disparu dans la liste des "top 10" de 2009, en comparaison de celle de 2004. C'est le cas notamment des acides aspartique, glutamique, itaconique qui font l'objet de productions commerciales parfois anciennes mais que les auteurs n'ont plus considéré comme suffisamment porteurs d'avenir pour l'industrie chimique.

Au-delà de ces commentaires spécifiques, on peut globalement conclure que la prospective n'est ni aisée, ni fiable, étant susceptible d'évolutions rapides. On peut se satisfaire de voir aboutir les projets sur l'acide succinique mais s'inquiéter de réaliser que l'éthanol ou l'isoprène avaient été ignorés, il y a six ans. Les études concernées restent organisées par des chercheurs et des experts, avec les éléments dont ils disposent, les industriels se gardant bien de communiquer sur les sujets encore exploratoires. Tout cela témoigne de l'ébullition innovatrice en cours mais probablement aussi des prises de risques stratégiques auxquelles sont contraintes les entreprises convaincues de la nécessité de se positionner dans ce secteur. Les projets n'aboutissent que si des industriels significatifs prennent le relais des chercheurs et des start up et réalisent les investissements nécessaires.

IV.2 - SUBSTITUTION AUX PRODUITS FOSSILES, HOMOLOGIE, ANALOGIE

Dans le développement des bioraffineries ou des grands projets de chimie du végétal, **deux approches complémentaires** sont menées en parallèle, le plus souvent par des acteurs différents :

- **La première consiste à préférer les marchés et les applications existantes.** L'enjeu est alors de bio-sourcer et de "verdir" des molécules identiques à celles produites par la pétrochimie, autrement dit des **hydrocarbures** et leurs dérivés. Le challenge est technologique mais surtout économique. La molécule biosourcée doit pouvoir être compétitive avec son homologue d'origine fossile. Aucun industriel ne semble en effet construire sa stratégie sur l'espérance d'un premium durable sur les prix d'intermédiaires biosourcés. En revanche, le pari est engagé que la hausse structurelle du cours des matières pétrolières se poursuivra dans des délais suffisamment courts et n'entraînera pas le prix des matières premières végétales trop fortement dans son sillage...
- **La seconde approche privilégie le développement d'une nouvelle chimie**, ayant pour base les composés de la biomasse tels qu'ils sont, c'est-à-dire sous forme largement **oxygénée**. L'enjeu de performance technologique de la production est un peu moins audacieux car il n'y a plus de pertes de masse inhérentes à des réactions de réduction. Il est en revanche nécessaire de développer des nouvelles applications et des marchés pour des produits encore peu connus des industriels de la fin de la chaîne.

Les productions d'éthylène et de ses dérivés à partir de l'éthanol (projets **Braskem, Solvay**), ou d'épichlorhydrine à partir de glycérol (projet **Solvay**), se positionnent clairement au sein de la première approche. Bien que les molécules produites soient originales, la technologie d'**Amyris** comme le projet de **Genencor / Goodyear** sur l'isoprène consistent également à réduire de la biomasse oxygénée en hydrocarbures terpéniques.

	Ethanol	→	Ethylène	
	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{OH}$	→	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	
	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	→	C_2H_4	
Masse moléculaire	46.07		28.05	(- 39 %)
	Glycérol	→	Epichlorhydrine	
	$\text{HOCH}_2\text{-CHOH-CH}_2\text{OH}$	→	$\text{CH}_2\text{-CH-CH}_2\text{Cl}$ O	
	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$		$\text{C}_3\text{H}_5\text{OCl}$	
Masse moléculaire	92.09		92.5 (dont 35 de chlore)	(- 39 % hors Chlore)

A l'opposé, les productions d'isosorbide, d'acide succinique, d'acide lactique, de 1,2 ou 1,3 propanediol et de leurs dérivés, etc. s'inscrivent dans la valorisation d'une biomasse conservant son degré d'oxygénation. De telles molécules peuvent être à l'origine de dérivés aux applications déjà importantes (risque marché faible) ou qu'il faut, au contraire, s'astreindre à développer (risque marché élevé).

Composition en carbone et en oxygène de quelques molécules plateformes

Molécule	Nombre de C	% C massique	% O massique
Ethanol	2	52	35
Ethylène	2	86	0
Glycérol	3	39	52
Acide lactique	3	40	53
1,2 propanediol - MPG	3	47	42
1,3 propanediol	3	47	42
Propylène	3	86	0
Acide succinique	4	41	54
n butanol	4	65	22
Isoprène	5	88	0
Glucose	6	40	53
Isosorbide	6	49	44
Acide oléique	18	77	11

Notons cependant que la biomasse comporte parfois en abondance des molécules peu ou pas du tout oxygénées comme les acides gras des graines oléagineuses ou le latex de l'hévéa.

Les deux approches comportent chacune leurs risques et leur parts d'incertitude. S'il semble clair qu'une utilisation optimale de la biomasse doit valoriser au mieux sa composition, il n'en demeure pas moins que des produits comme les carburants resteront, par nature, peu ou pas oxygénés. C'est en particulier dans le domaine des polymères que la chimie du végétal peut innover et développer des molécules restant proches de leur matière première dans leur composition atomique brute et offrant par la suite des meilleurs rendements massiques de production.

IV.3 – L'IMPORTANCE DES PARTENARIATS INDUSTRIELS

Les projets innovants de chimie du végétal qui émergent à l'échelle industrielle ne sont pas si nombreux. Leur mise en œuvre nécessite en effet des investissements importants et qu'aient été franchies toutes les étapes des changements d'échelle, particulièrement ardues en ce qui concerne les procédés biotechnologiques. De tels projets mettent généralement en jeu des partenariats rassemblant différents acteurs de la chaîne de valeur.

On peut retrouver ainsi :

- **Un acteur disposant du savoir faire, des capacités logistiques et industrielles nécessaires à la mobilisation à et à la pré-transformation de la biomasse.** Ce peut être un amidonnier, un sucrier / éthanolier, un huilier, ou un producteur de pâte à papier.
- **Une entreprise spécialiste des biotechnologies**, du moins quand ces dernières sont au cœur de nouveaux procédés de conversion. Ce peut être une start up, l'un des deux grands des enzymes (**Novozymes, Genencor-Danisco**) mais aussi une division spécialisée d'un grand groupe (**Cargill, Du Pont**) qui peuvent être mobilisés.
- **Un industriel de la chimie** qui sait transformer et valoriser sur ses marchés la molécule obtenue.

Dans la pratique, les ménages à trois restent plus difficiles à gérer que les couples, les partenariats observés s'initient fréquemment autour de deux acteurs, avant que l'évolution du projet ne conduise à rechercher le maillon manquant. Quand la conversion de la biomolécule en intermédiaire de synthèse se fait selon un procédé chimique, le partenaire biotechnologie n'existe évidemment pas mais peut être remplacé par **un spécialiste des procédés chimiques**.

On peut citer quelques exemples :

Produit	Origine biomasse	Mobilisateur et pré-transformateur de biomasse	Entreprise de biotechnologie	Chimiste ou valorisateur
Acide glycolique	Amidon	Roquette	Met Ex	?
Acide succinique	Amidon	Roquette	Met Ex	DSM
Acide succinique	Amidon	Siclae	Bio Amber	?
Farnésène et dérivés	Sucre	São Martinho, Bunge, Cosan, Tereos,	Amyris	M&G, Procter & Gamble, Shell, Soliance, Total.
3-HPA	Amidon	Cargill	Novozymes	A définir
Isoprène	Sucre	<i>A définir</i>	Genencor	Goodyear
L Méthionine	Amidon	Roquette	Met Ex	Roquette ?
PHA	Amidon	ADM	Metabolix	?
Polypropylène	Ethanol ?	?	Novozymes	Braskem
1,3 Propanediol	Amidon	Tate & Lyle	Du Pont	Du Pont
PVC	Ethanol canne	Copersucar	Sans objet	Solvay

Les bioraffineries les plus anciennes se sont constituées dans des amidonneries, des sucreries, des éthanoleries, des huileries et des usines de pâte à papier. Elles occupent des sites industriels de grande taille, les zones de déchargement et de stockage de matières premières nécessitant des volumes ou des surfaces considérables. Le prétraitement des matières premières met en œuvre des installations et des équipements importants.

Des agroindustriels ont développé sur leur site des ateliers de conversion chimique pour transformer certaines molécules, élargissant leur gamme de produits ainsi que leur positionnement dans la chaîne de valeur de l'industrie chimique.

Les chimistes ne mènent que rarement la démarche inverse qui consisterait à intégrer une partie de leur amont pour mieux le maîtriser. Quand la démarche de produire des molécules biosourcées est leur propre initiative, ils recherchent des partenaires crédibles, capables de les approvisionner, formant au besoin des joint ventures avec ceux-ci.

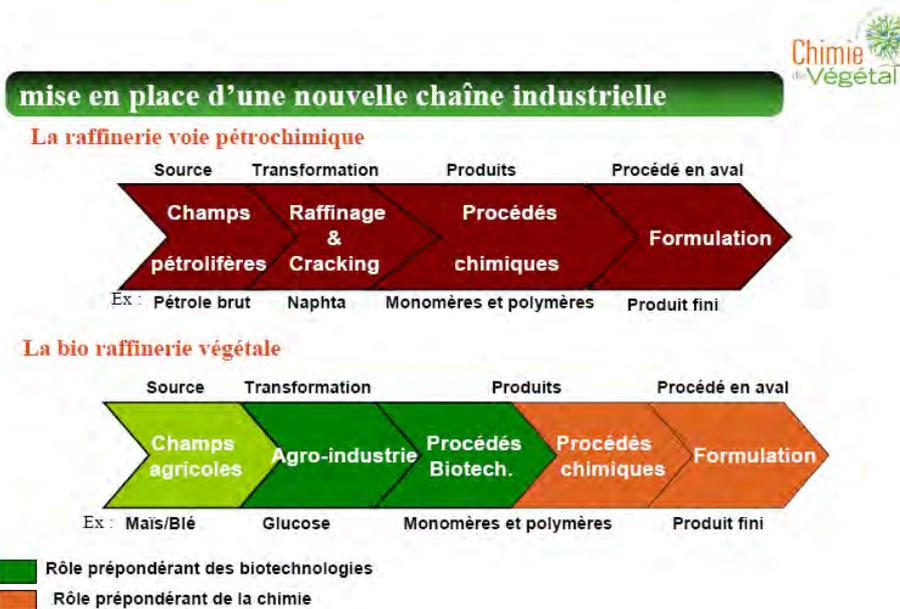
Le développement des biotechnologies industrielles a offert de nouvelles opportunités et certaines bioraffineries se sont dotées d'ateliers supplémentaires. La mise au point des procédés a parfois été finalisée sur place. L'entreprise de biotechnologie n'était alors qu'un fournisseur de services, concédant la licence d'un procédé, livré au stade pilote ou préindustriel.

L'historique des sociétés de biotechnologies commence souvent dans un laboratoire universitaire ayant développé un savoir faire particulier sur certaines souches et certaines voies métaboliques. Des brevets sont déposés qui portent généralement sur ce qui n'est encore qu'une propriété intellectuelle (souches, séquences d'ADN, voies métaboliques exprimées au laboratoire, etc.) et non une propriété industrielle.

Les start up constituées veulent démontrer le potentiel de leur technologie, ce qui en dépit de certaines annonces est toujours long et coûteux. Elles recherchent ainsi des fonds auprès de sociétés d'investissements et des soutiens publics. Les stratégies peuvent alors se différencier. Certaines entreprises se concentrent sur un cœur de métier en amont et se rémunèrent par les royalties des licences qu'elles octroient à des industriels producteurs. D'autres ambitionnent au contraire de capter directement une plus grande part de la valeur ajoutée en réalisant elles-mêmes les premiers changements d'échelles et fournissant des procédés plus élaborés, ou même en voulant passer du statut de fournisseur de technologie à celui de producteur de molécules.

Metabolic Explorer projette ainsi de produire du 1,3 propanediol à l'échelle pilote. Largement doté en capital et intégrant parmi ses actionnaires des industriels majeurs, **Amyris** démarre des fabrications pilote de farnésène avec l'intention de devenir producteur de cette molécule. **Genencor**, un des deux majors de la production d'enzymes industrielles, fait évoluer sa stratégie, avec l'objectif de produire lui-même le bioisoprène qui sera valorisé par **Goodyear** mais aussi dans d'autres applications et par d'autres clients. La filiale de Danisco veut ainsi devenir un acteur à part entière du "bioraffinage" et non un simple fournisseur de services ou de biocatalyseurs du secteur.

La chaîne de valeur de la chimie du végétal



Source : Association de la Chimie du Végétal

IV.4 - BIOTECHNOLOGIES ET BIORAFFINERIES

IV.4.1 – LES OUTILS DES BIOTECHNOLOGIES BLANCHES

L'importance des biotechnologies blanches dans le développement des bioraffineries se manifeste à plusieurs niveaux :

- Pour **fragmenter les macromolécules** issues de la biomasse. Ce sont classiquement des **enzymes** de type hydrolases qui sont utilisées.
- Dans la **production par fermentation de molécules plateformes** (fermentations en milieu liquides).
- Encore marginalement pour la chimie, dans la production de substrats prétraités, par **fermentation en milieu solide**.

IV.4.1.1 - LES ENZYMES ET LA BIOCATALYSE

Les enzymes sont des protéines à fonction de biocatalyseurs, qui sont chacune très spécifiques d'un substrat et d'une réaction. Les enzymes ne sont pas détruites par les réactions qu'elles favorisent mais sont être peu à peu dégradées au cours des process industriels les mettant en œuvre et elles sont perdues en fin de batch. Pour être active, une enzyme nécessite des conditions particulières (concentration en substrat, température, pH) et, dans certains cas, la présence de cofacteurs qui sont des biomolécules organiques ou des ions minéraux. L'usage des enzymes est déjà ancien dans différents secteurs industriels comme ceux du textile (années 1920), des détergents, de l'amidonnerie (années 1950-60) et du papier.

Dans le métabolisme du vivant, les enzymes catalysent des réactions de synthèse et de dégradation très variées. Les applications industrielles d'enzymes privilégient cependant très largement l'usage des hydrolases (amylases, protéases, cellulases, hémicellulases, lipases) fragmentant des macromolécules en plus petits éléments ou en monomères.

Le secteur des enzymes industrielles est très concentré, avec un leadership européen marqué. Deux groupes danois, **Novozymes** et **Danisco**, se partagent les deux tiers du marché (on notera toutefois que la filiale concernée de Danisco, **Genencor** est d'origine Nord-américaine).

La production d'enzymes performantes nécessite un savoir-faire important. Il faut pouvoir identifier des souches dont les enzymes ont les propriétés recherchées (fonction catalytique, pH et température optimales adaptés, stabilité au stockage et aux conditions de process de l'application, besoins réduits en cofacteurs, etc.) puis être en mesure de les produire par fermentation, de les purifier et de les stabiliser. Les technologies de génie génétique permettent aujourd'hui d'exprimer et de réguler l'expression des enzymes recherchées dans les microorganismes les plus appropriés. Celles de l'ingénierie enzymatique permettent de retravailler la séquence en acides aminés de l'enzyme pour, par exemple, améliorer sa stabilité sans modifier son site actif, etc.

Enzymes et hydrolyse de l'amidon

L'hydrolyse de l'amidon comprend deux étapes :

- **La liquéfaction et la gélatinisation** d'une suspension concentrée d'amidon à 70-90°C (mais parfois à plus de 100°C, de façon à dégrader les complexes amidon-lipides présents notamment dans les grains de maïs). Différentes **α -amylases** permettent alors de couper les chaînes d'amylopectine et d'amylose en oligosaccharides (dextrines). Les α -amylases découpent l'amidon, de façon aléatoire, "au milieu" des chaînes. Normalement, les α -amylases ne sont actives qu'en présence de calcium.

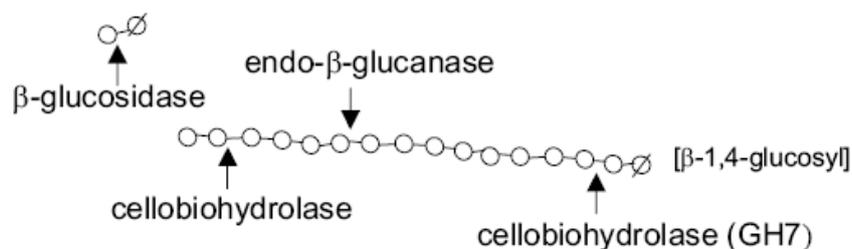
- **La saccharification** qui consiste à hydrolyser les oligosaccharides en monomères de glucose ou en maltose (= di-glucose), en présence de **glucoamylase** ou de **β -amylase** (qui "attaque" les chaînes par leur extrémité).
- Au besoin, la conversion du glucose en fructose par une **glucose isomérase**.

Enzymes et hydrolyse de la lignocellulose

La lignocellulose est un substrat beaucoup plus complexe que l'amidon et sa fragmentation est par la suite plus difficile. Elle comprend de la cellulose, des hémicelluloses, des pectines et, bien entendu, de la lignine. Des traitements physico-chimiques précèdent toujours l'action d'enzymes.

Les **cellulases** constituent une famille d'enzymes capables de couper en différents points les chaînes de glucose liées en $\beta(1 \rightarrow 4)$ qui constituent la cellulose. Elles se classent en **endoglucanases**, coupant les chaînes en leur milieu et capable d'attaquer la cellulose cristalline, en **exoglucanases** lysant l'extrémité des chaînes et β -glucosidases finalisant le découpage en molécules de glucose des oligomères obtenus.

Sites de lyse de la cellulose et enzymes cellulolytiques (simplifié)

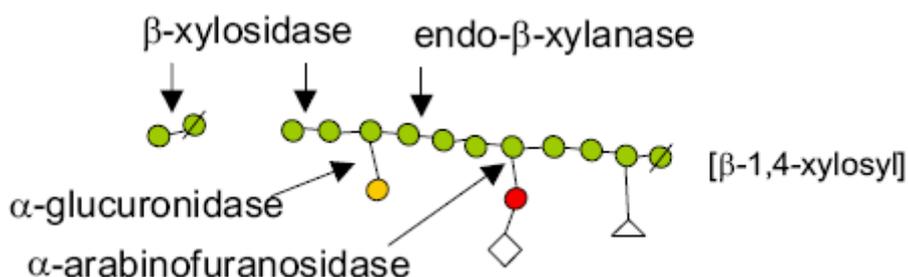


Source : Turner et al, 2007.- *Microbial Cell Factories BioMed Central*.

Les hémicelluloses rassemblent un groupe plus diversifié d'enzymes, aptes à découper les chaînes complexes d'hémicelluloses qui peuvent être composées de pentoses (xylose, arabinose), d'hexoses (glucose, galactose) et de sucres acides. Certaines hémicelluloses attaquent le centre des chaînes, d'autres leurs extrémités et d'autres encore les oligomères issus de l'action des précédentes.

Sites de lyse d'une hémicellulose riche en xylose et hydrolases concernées (simplifié)

(xylose en vert, arabinose en rouge, acide glucuronique en jaune-orangé)



Source : Turner et al, 2007.- *Microbial Cell Factories BioMed Central*

Si des pectinées sont produites et commercialisées, ce n'est pas encore le cas des lignases, les lignines restant hydrolysées en priorité par des traitements thermo-chimiques.

Les industriels producteurs ont la capacité de fabriquer des enzymes purifiées mais l'expérience a montré que ce sont ce que l'on appelle des "cocktails" ou des "complexes" enzymatiques qui sont les plus efficaces dans de nombreuses applications. Cela est particulièrement vrai pour la lyse de la lignocellulose qui ne peut s'effectuer qu'en présence d'activités enzymatiques multiples.

Evolution de l'offre en enzymes pour les bioraffineries

Elle se fait selon plusieurs directions. On observe tout spécialement :

- La mise sur le marché d'activités enzymatiques désormais classiques (hydrolases) mais **mieux adaptées à des conditions de procédés plus agressives** (températures élevées).
- Une offre en forte progression de cocktails de cellulases et d'hémicellulases à des prix attractifs, se positionnant comme des outils du développement des bioraffineries de seconde génération. **Genencor** annonce ainsi que le coût des enzymes ne devra pas dépasser 50 cents de \$ US/gallon d'éthanol lignocellulosique (soit 13 cents/l).

IV.4.1.2 - LA FERMENTATION MICROBIENNE : DU SCREENING DE SOUCHES A L'INGENIERIE METABOLIQUE ET A LA BIOLOGIE SYNTHETIQUE

Les fermentations orientées

Depuis des millénaires, l'homme sélectionne des souches microbiennes (des "ferments") pour différentes transformations de ses aliments. La pratique la plus élémentaire consiste à utiliser les populations microbiennes naturellement présentes dans l'environnement et le substrat. Les fermentations orientées par un simple contrôle des conditions de milieu (nature du substrat, additifs éventuels, aération, etc.) sont encore massivement utilisées (traitement des eaux, méthanisation, ensilage des cultures fourragères pour l'alimentation animale, etc.).

L'exploitation de la diversité naturelle

Celle-ci a été le premier socle des développements récents et reste d'actualité. On peut rechercher des souches particulières pour les utiliser directement dans des procédés de fermentation, sans avoir recours au génie génétique (stratégie de **Deinove** mettant à profit la très grande diversité des déinocoques) ou, au contraire, rechercher dans les espèces microbiennes étudiées les seuls fragments de génome codant des fonctions métaboliques spécifiques. Dans les deux cas, les microorganismes vivants dans des milieux extrêmes font l'objet d'une attention particulière.

La constitution de "bibliothèques" de souches microbiennes variées permet le screening de celles-ci pour leur développement sur certains substrats et la production de certaines molécules, d'autant plus que les outils robotisés de screening de la présence de substances (Criblage à haut débit = High-throughput screening = HTS) se développent et permettent d'évaluer rapidement et à bas coût de très grands nombres de souches.

Les techniques de biologie moléculaire et de génie génétique permettent de surexprimer les gènes d'un même microorganisme mais surtout de faire exprimer des gènes d'une espèce dans une autre et donc de transplanter une étape ou une nouvelle voie métabolique dans une bactérie ou une levure dont on connaît et maîtrise parfaitement le métabolisme de base.

C'est ainsi qu'un petit nombre de microorganismes, très largement étudiés, servent de "plateformes technologiques" ou de "plateformes microbiennes", chaque entreprise en retenant généralement une ou deux. On retrouve parmi celles-ci la bactérie *Escherichia coli* mais aussi des *Clostridium* et des levures *Saccharomyces cerevisiae*. Utilisés depuis longtemps, les brevets tendant à protéger ces espèces microbiennes ou certaines de leurs souches elles-mêmes sont tombées dans le domaine public. Ce sont des séquences d'ADN, leurs expressions dans ces différentes plateformes microbiennes et les applications des souches obtenues dans la production de telle ou telle substance qui font désormais l'objet des propriétés intellectuelles et industrielles revendiquées.

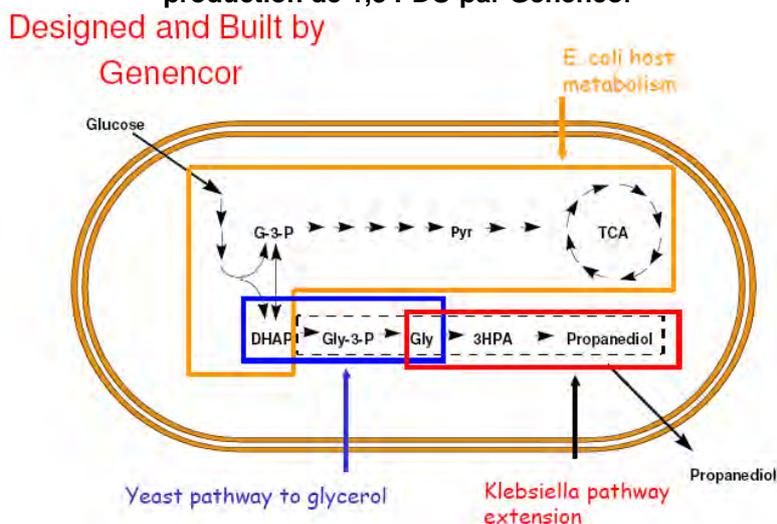
Metabolic Explorer annonce ainsi travailler exclusivement à partir des bactéries *Escherichia coli*, et *Clostridium acetobutylicum*. C'est un *E. coli* largement modifié par **Genencor** qui assure la production de 1,3 Propanediol pour **Du Pont – Tate & Lyle** (cf. figure ci-dessous).

Les brevets d'**Amyris** portent sur l'expression de voies métaboliques de production de terpènes dans différents microorganismes mais semblent préférer la *levure* dans les développements industriels.

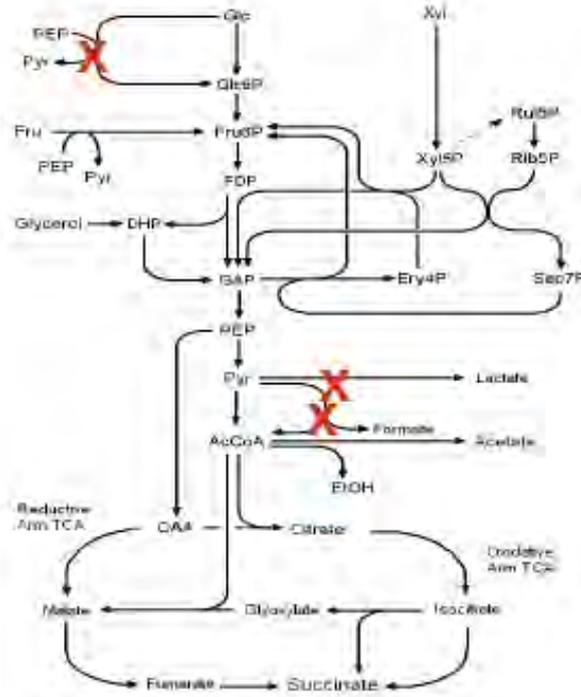
Butalco utilise également *Saccharomyces cerevisiae* pour produire de l'éthanol à partir des sucres en C6 et C5 issus de la fragmentation de la lignocellulose alors qu'Arbor fuels fait produire du butanol à ce microorganisme. **Butyl Fuel, Cobalt Biofuels, Green Biologics** et **Tetra Vitae** utilisent des espèces et souches variées de *Clostridium* pour produire du butanol.

L'ingénierie métabolique consiste finalement à utiliser tous les outils modernes de la biochimie, de la biologie moléculaire et de la microbiologie, pour étudier des voies métaboliques dans des organismes vivants variés, identifier les enzymes et les gènes correspondant puis les faire s'exprimer dans les souches choisies. L'ingénierie métabolique est définie comme "l'amélioration dirigée de la formation d'un produit par la modification spécifique de voies métaboliques ou l'introduction de nouvelles par l'utilisation des technologies de l'ADN recombinant."

Une représentation simplifiée du métabolisme d'*Escherichia coli* "reprogrammé" pour la production de 1,3 PDO par Genencor

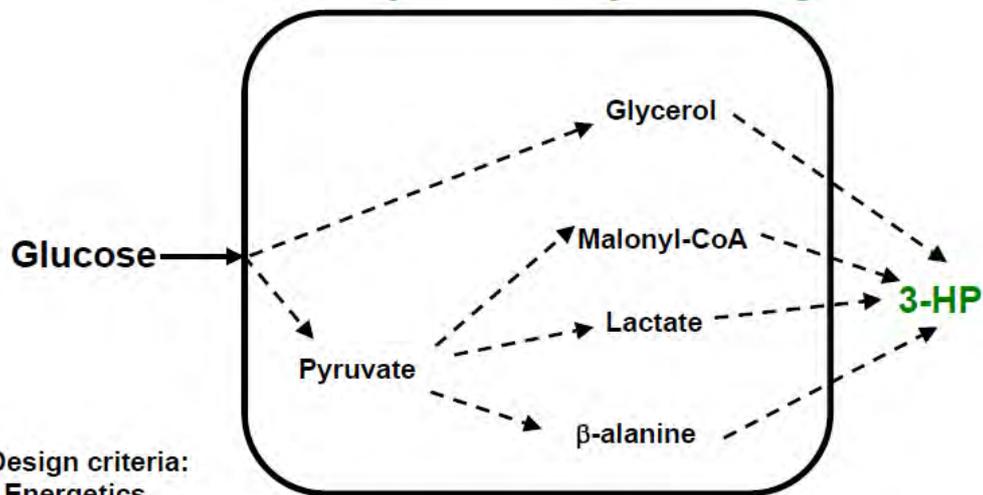


La modification du métabolisme d'Escherichia coli sur un mutant de la souche K12 pour la production d'acide succinique



Source : Bioamber

La production de 3 HPA : quelques éléments de modélisation métabolique

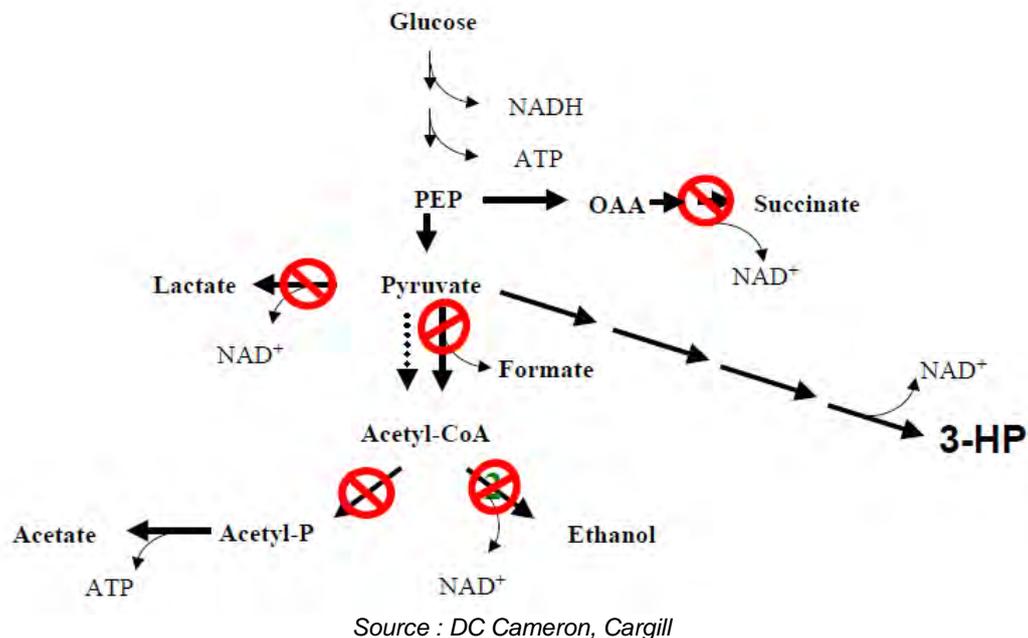


Design criteria:

- Energetics
- Maximum theoretical yield
- Availability of enzymes / genes
- Co-factor requirements of enzymes
- Intellectual property/FTO

Source : DC Cameron, Cargill

Et d'ingénierie métabolique nécessaire (inhibitions de certaines voies)



La biologie synthétique, étape la plus élaborée de l'ingénierie métabolique, consiste à construire – à synthétiser - de toutes pièces un génome microbien, en fonction des seules activités métaboliques que l'on souhaite voir mettre en œuvre par le microorganisme ainsi constitué, *ex nihilo*. Les premiers résultats au laboratoire ne sont que très récents. La sémantique peut être plus souple et la construction de simples fragments de génome fonctionnels est considérée parfois déjà comme de la biologie synthétique.

Le long chemin des développements industriels

Les concepts généraux de l'ingénierie métabolique ou de la biologie synthétique paraissent simples, pour peu qu'ils soient décrits sous une forme vulgarisée. La rapidité des progrès observés au laboratoire donne alors à penser que "tout est possible". Il suffirait de programmer une bactérie ou une levure dans le bon sens, d'ensemencer de celle-ci un gros fermenteur puis de récupérer la production après quelques heures ou quelques jours.

Dans la réalité, les changements d'échelle et les développements industriels des procédés biotechnologiques sont particulièrement longs, fastidieux, risqués et coûteux. Un microorganisme reste un être vivant dont le métabolisme est un assemblage d'un très grand nombre de voie de synthèse et de dégradation organisés selon des équilibres complexes. Un microorganisme produit toujours un ensemble de molécules. Les métabolites excrétés dans le milieu sont souvent inhibiteurs du développement du microorganisme lui-même dès qu'ils atteignent une certaine concentration. La fermentation est donc une opération complexe, tout comme l'ensemble des opérations d'extraction et de purification (downstreaming) qui lui succèdent.

Le développement d'un procédé de production par fermentation, depuis la sélection de la molécule jusqu'au pilote industriel, est décrit par Metabolic Explorer en quatre étapes dont la durée totale variera entre 6.5 et 8 ans. Un projet complet, comprenant l'industrialisation finale du procédé nécessitera donc dix ans ou plus. Ces longs délais et les investissements qui leur sont associés expliquent les besoins de capitaux du secteur et le nombre encore très modeste de projets atteignant l'étape de la production industrielle. Les compétences à mettre en œuvre

IV.4.1.3 - LES PERSPECTIVES DE LA FERMENTATION EN MILIEU SOLIDE.

La fermentation en milieu solide (solid substrate fermentation) est une technologie particulièrement adaptée aux micro-organismes fongiques. Ceux-ci ont en effet des difficultés à développer leur mycélium en milieu liquide car ils en augmentent peu à peu la viscosité, réduisant d'autant la diffusion de l'oxygène. Les bases de la fermentation en milieu solide sont anciennes car celle-ci est traditionnellement utilisée au Japon (fermentation koji) pour la production de saké et de la "sauce de soja". Les technologies modernes sont particulièrement économes en eau et en énergie.

L'entreprise **Lyven**, filiale depuis 2003 de la division Ingrédients du groupe **Soufflet**, a développé une technologie de fermentation en milieu solide en couches épaisses et à rendement élevé.

Soufflet a initié en 2008 le programme **Osyris**, soutenu par les pouvoirs publics (Agence de l'Innovation Industrielle), qui vise à développer de nouveaux procédés de fermentation en milieu solide et de nouveaux produits associés.

La technologie permet en effet de produire des enzymes qui peuvent être ultérieurement purifiés mais aussi - ce qui est plus original - de modifier la composition d'une matière première solide. Celle-ci peut être alors valorisée dans différentes applications. Certaines trouvent leur place alimentation animale car le produit obtenu est enrichie en vitamines et en activités enzymatiques. Les autres applications qui intéressent plus particulièrement cette étude concernent **la production de substrats améliorés pour des fermentations** qui seront mis en œuvre sur des modèles plus classiques. Ce pourront être notamment des fermentations destinées à fabriquer des intermédiaires pour la chimie qui gagneront ainsi en efficacité par l'utilisation de ces substrats prétraités.

IV.4.2 –ROLE DES BIOTECHNOLOGIES DANS LES PROJETS EN COURS

Les biotechnologies constituent des outils puissants ouvrant de larges perspectives mais présentant également, comme cela a été mentionné, des contraintes lourdes en matière de développement. Si l'éventail de molécules pouvant être produites au laboratoire par culture de microorganismes modifiés (ou bientôt créés de toute pièces) s'élargit rapidement, les réalisations industrielles sont encore peu nombreuses. Disposer d'une souche génétiquement et métaboliquement programmée est une chose, la mettre en œuvre dans des conditions industrielles rentables en est une autre. Les biotechnologies et plus particulièrement les technologies de fermentation offrent deux avantages majeurs :

- La possibilité de réaliser en **une seule étape** de fermentation, tout un ensemble de réactions qui devraient être mises en œuvre successivement selon les procédés chimiques classiques.
- Pouvoir travailler sur des **matières premières non purifiées**, à température peu élevée et à pression atmosphérique.

Le développement des biotechnologies ne signifie pas – loin s'en faut – la disparition des procédés chimiques. Une fois les molécules plateformes obtenues à partir de la biomasse, celles-ci devront être convertis ou polymérisés suivant des procédés plus classiques.

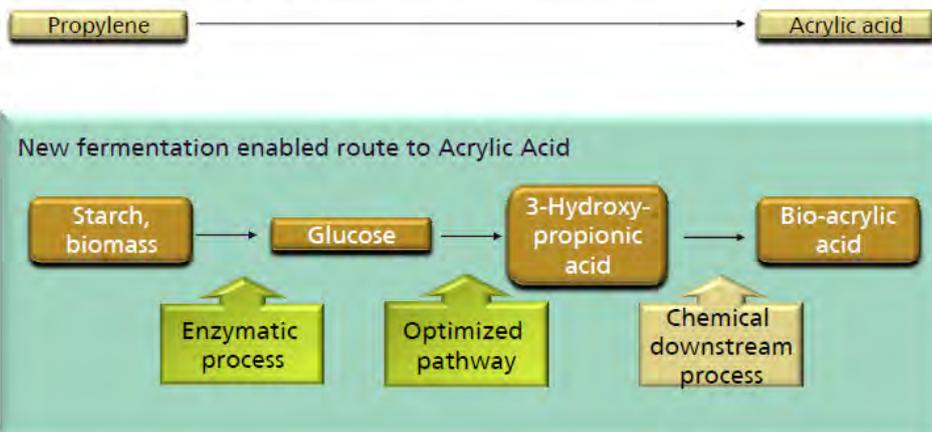
Les deux exemples présentés à la page suivante permettent de mieux appréhender le positionnement des biotechnologies dans les projets industriels en cours. Le premier est celui qui rassemble **Cargill** et **Novozymes** dans la production de 3-HPA et d'acide acrylique à partir d'amidon.

Les biotechnologies interviennent à deux niveaux : par l'utilisation d'enzymes pour fragmenter les macromolécules de la biomasse (en l'occurrence de l'amidon) mais aussi par la mise en

œuvre de procédés de fermentation pour obtenir le 3-HPA à partir du glucose. La production d'acide acrylique à partir de cette molécule se fera selon des procédés chimiques.

Exemple de partenariat entre un mobilisateur de biomasse – amidonnier (Cargill) et un spécialiste des enzymes et de l'ingénierie métabolique (Novozymes).

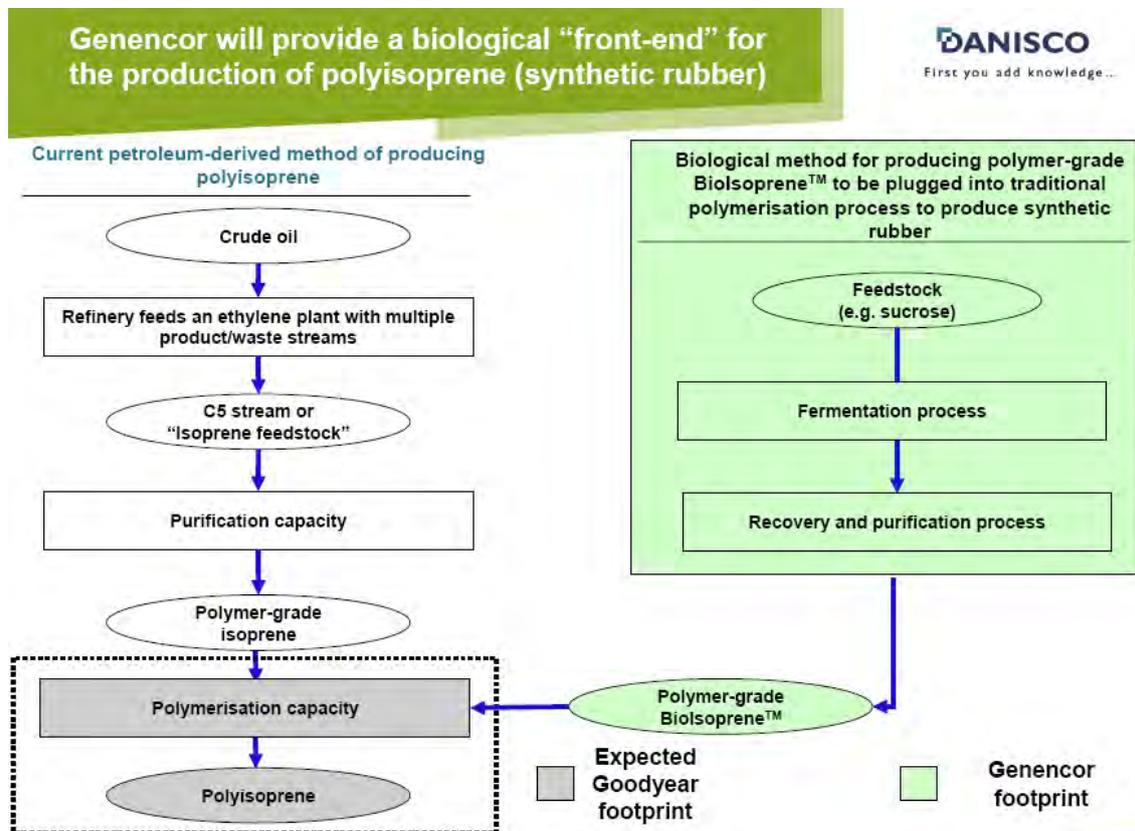
Current petro-route for production of Acrylic Acid:



Source : Novozymes.

Dans le deuxième exemple, la production d'isoprène biosourcé de **Genecor/Danisco** viendra s'intégrer à la production de polyisoprène de **Goodyear**.

Le positionnement des biotechnologies dans la production de polyisoprène biosourcé



Source : Genecor

IV.4.3 –LES BIOTECHNOLOGIES VERTES

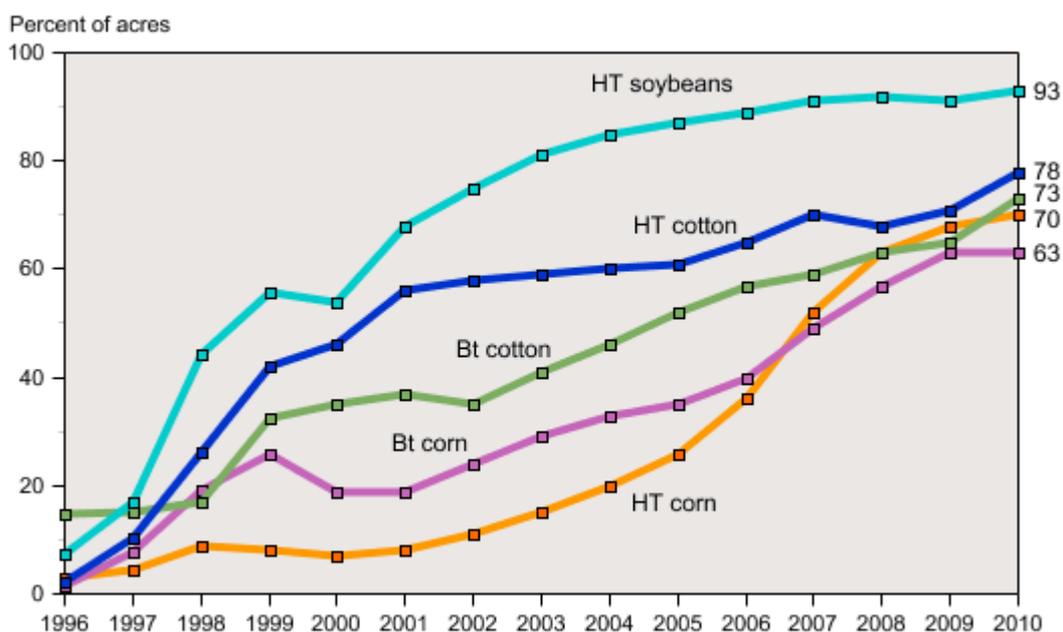
IV.4.3.1 - LA PROGRESSION DES OGM DANS LE MONDE

En 2009, 14 millions d'agriculteurs de 25 pays ont planté 134 millions d'hectares de cultures génétiquement modifiées. Ces chiffres sont en croissance constante. Les USA totalisent 64 Mha, le Brésil 21.4 Mha, l'Argentine 21.3 Mha, l'Inde 8.4 Mha, le Canada 8.2 Mha, la Chine 3.7 Mha. En Europe, l'Espagne, la Pologne, le Portugal, la République Tchèque, la Roumanie et la Slovaquie cultivent des OGM. La France et l'Allemagne, ainsi que quelques autres pays les ont paradoxalement interdits à la culture mais pas à l'importation.

77 % des surfaces mondiales de soja, 49 % de celles du coton, 26 % de celles du maïs et 21 % de celles du colza sont désormais cultivées avec des semences génétiquement modifiées. Aux USA, 85 % du maïs est OGM et le plus souvent porteur de 3 événements de transformation ! Il est impossible de vouloir être présent sur le marché américain des semences de maïs sans disposer de variétés porteuses de résistances aux herbicides et aux insectes. Des développements à grande échelle sont attendus sur le riz et le blé, notamment en Chine.

Les événements de transformation actuellement intégrés à des variétés commerciales concernent essentiellement des caractères agronomiques (résistances à certains herbicides totaux, ayant l'avantage d'être peu dangereux pour l'environnement ; résistances aux insectes ravageurs ou à des virus). Le succès de ces OGM est clairement lié aux éléments de productivité qu'ils apportent à l'agriculteur, en limitant les intrants coûteux et parfois toxiques et en régularisant les rendements. Dans différents cas, les caractères introduits sont essentiels au maintien ou au développement local de la culture, générant parfois les dérives fréquentes de l'agriculture moderne : la plante et la variété la plus rentable font l'objet d'une monoculture, avec tous les risques que celle-ci peut induire à moyen et long terme, tant en termes phytosanitaires (diffusion et concentration de pathogènes fongiques ou bactériens) que pour l'économie locale (qui dépend des cours d'une seule production).

Rapid growth in adoption of genetically engineered crops continues in the U.S.



Data for each crop category include varieties with both HT and Bt (stacked) traits.

Sources: 1996-1999 data are from Fernandez-Cornejo and McBride (2002). Data for 2000-10 are available in the ERS data product, Adoption of Genetically Engineered Crops in the U.S., tables 1-3.

Source : USDA

La position prise par la France et certains pays européens reste étonnante car elle ne prend en compte ni les gains de productivité permis par les OGM, ni les années de retour d'expérience sur les risques réels et supposés, associés aux variétés OGM actuelles. Nos pays importent massivement des productions OGM pour alimenter notre bétail mais s'interdisent de les cultiver et donc de rester dans la course technologique engagée. Le recul acquis sur les OGM est pourtant considérable (plus de 10 années, sur des dizaines de millions d'hectares) et peu de technologies modernes ont été autant éprouvées. Les faiblesses sont identifiées et se résument principalement dans le fait que l'usage d'OGM ne doit pas dispenser d'observer des règles de base d'agronomie (rotation et diversité des cultures). La distorsion de concurrence entre nos producteurs et ceux d'autres continents devient préoccupante et la "peur des OGM", devenue insidieusement culturelle dans la population de certains pays d'Europe, ne laisse pas augurer de décisions politiques pour rattraper les retards de compétitivité qu'accumule notre agriculture.

Nos propres filières agricoles communiquent régulièrement sur le caractère non OGM de nos blés, de nos betteraves, de nos colzas au nom des attentes du consommateur. Celui-ci a pourtant été conditionné par des groupes de pression se nourrissant du développement de peurs obscurantistes. La dialectique de rigueur, faisant une référence permanente au principe de précaution est désastreuse car toute entreprise humaine et tout développement technologique comporteront toujours des risques qui ne doivent pas constituer des entraves quand l'expérience acquise montre qu'ils sont minimes et susceptibles d'être gérés convenablement. Si l'on appliquait à d'autres secteurs d'activité les craintes que nous nous infligeons pour les OGM, nous n'aurions à notre disposition aucun des produits de la révolution industrielle ni, plus près d'aujourd'hui, ceux des nouvelles technologies de la communication.

Dans la compétition que se livrent la canne à sucre et la betterave, les technologies du génie génétique vont rapidement peser dans la balance. La courbe de croissance des rendements de la betterave – non OGM – en France est particulièrement séduisante car elle laisse espérer que le différentiel de compétitivité avec la canne à sucre va aller en se réduisant. C'est une conclusion en réalité naïve car les travaux de développement des applications du génie génétique sur la canne à sucre sont très actifs et le Brésil n'est pas un pays à se priver d'une technologie favorisant la productivité de ses cultures.

IV.4.3.2 - LA BIORAFFINERIE COMMENCE--T-ELLE DANS LA PLANTE CULTIVEE ?

Si le citoyen européen semble s'accommoder que l'on reprogramme le génome ou crée mêmes des microorganismes ex-nihilo pour produire des médicaments ou d'autres molécules en fermenteurs, il reste inquiet que l'on modifie par des outils modernes l'ADN des plantes cultivées.

Au-delà des arguments irrationnels avancés "contre les plantes OGM" mais aussi des contraintes réelles inféodées à leur usage raisonné dans une agriculture durable, **on peut s'interroger s'il est plus performant de modifier une plante pour qu'elle produise une molécule particulière ou s'il convient avant tout d'attendre du végétal la production maximale de biomasse peu différenciée.**

Les végétaux supérieurs sont des organismes beaucoup plus complexes que les bactéries et les levures. Leur productivité dépend de très nombreux facteurs qui vont de l'étendue de leur surface foliaire et de son orientation, à la performance de la migration des assimilés, en passant par l'efficacité des processus métaboliques dans les différents organes. La plante est compartimentée à de nombreux niveaux et ne peut en aucun cas être considérée comme une boîte renfermant une séquence d'activités enzymatiques. Toute modification d'un élément du métabolisme doit s'intégrer à la physiologie d'ensemble du végétal.

Obtenir une variété de plante génétiquement modifiée est beaucoup plus lent que de reprogrammer les voies métaboliques d'une bactérie. Les outils de biologie moléculaire sont pourtant les mêmes ou très voisins. Les techniques de culture in vitro permettent désormais de multiplier rapidement les végétaux. C'est l'évaluation agronomique qui ne peut être raccourcie :

elle implique plusieurs cycles de culture complets de la variété obtenue et donc autant de saisons de plusieurs mois.

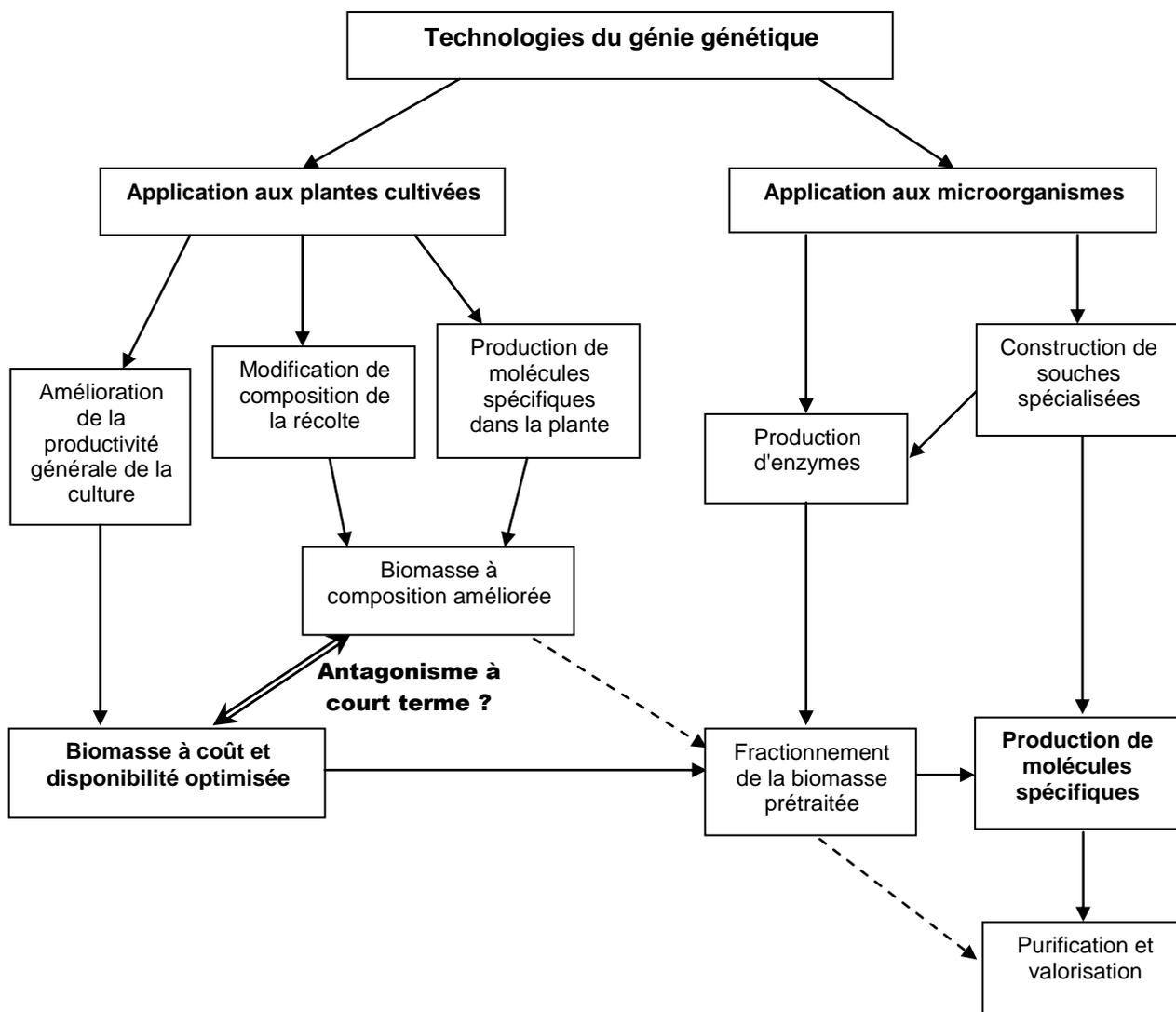
La construction et la mise en œuvre pilote, puis industrielle, de souches microbiennes modifiées semblent donc sur le papier beaucoup plus rapides que le développement de variétés agricoles OGM. Dans la réalité, une dizaine d'années de R&D sont nécessaires dans les deux cas, avant l'aboutissement d'applications commerciales. A ce jour, le potentiel de l'ingénierie métabolique reste plus large sur les microorganismes que sur les végétaux supérieurs. Les investissements à réaliser ne sont toutefois pas du même ordre de grandeur et les changements d'échelle ne représentent pas les mêmes aventures industrielles. Dans un cas, l'usine est la plante : sa modification est complexe car de nombreux paramètres sont en interaction mais son exploitation à grande échelle est simple : la nouvelle variété est semée, cultivée et récoltée. Dans le cas opposé, l'être vivant considéré est simple et relativement aisé à reprogrammer mais il est nécessaire de construire des usines pour exploiter son potentiel. Le génie génétique végétal conserve donc un intérêt important, d'autant plus que l'ingénierie métabolique progressera sur certaines espèces cultivées clés. A court terme, les biotechnologies vertes garderont cependant comme objectifs préférentiels l'amélioration des rendements des récoltes au travers de la résistance aux ravageurs, à la sécheresse, etc.

OGM et amélioration de la composition des récoltes pour les bioraffineries

En ce qui concerne la production spécifique par les plantes de molécules d'intérêt pour la chimie (hors pharmacie), les applications commerciales du génie génétique végétal en sont donc encore à leurs débuts. Comme cela a été expliqué précédemment, le défi est important car il convient de faire produire des molécules particulières à des plantes, de façon compétitive avec les voies alternatives (autres espèces cultivées dans des régions à bas coût de main d'œuvre et sans contraintes environnementales, fermentation de biomasse ou de sucres, etc.). On peut citer quelques exemples :

- **Syngenta** commercialise des maïs dont les grains expriment une activité amylasique microbienne, ce qui facilite leur mise en œuvre et améliore les rendements pour la production d'éthanol.
- La pomme de terre très riche en amylopectine Amflora, de **BASF** n'est pas une innovation récente, la première demande d'autorisation datant de 1996 mais l'approbation par la commission européenne n'a eu lieu qu'en mars 2010. L'abondance des réactions négatives à cette autorisation est symptomatique car les bénéfices ne sont tout simplement pas évoqués par les détracteurs (meilleurs rendements industriels, moindre consommation d'eau et d'énergie).
- **Metabolix** développe des switchgrass produisant du PHA qui peut être extrait de la récolte avant que la biomasse subsistante soit transformée selon des procédés de seconde génération.
- Les colzas de **Calgene** (devenu **Monsanto**) riches en acide laurique ont été développés à la fin des années 1990 et ne sont toujours pas utilisés à grande échelle. La production d'acides gras à chaînes courtes dans les pays tempérés est théoriquement attractive mais doit être compétitive avec l'huile de copra ou de palmiste.

Le positionnement des biotechnologies vertes et blanches : une tentative de synthèse



IV.4.4 – CONCLUSIONS : BIOTECHNOLOGIES ET BIORAFFINERIES

Les biotechnologies vertes et blanches constituent toutes deux des outils offrant de nouvelles perspectives de développement des bioraffineries. Elles ne se substitueront pas aux procédés chimiques quand ceux-ci sont performants et mis en œuvre sur des étapes de conversion précises, de molécule à molécule. Les biotechnologies présentent des coûts de développement et de mise en œuvre importants. Leur introduction dans les procédés industriels nécessite du temps mais prend de plus en plus d'ampleur. Le principal atout des biotechnologies est de permettre de réaliser des séquences de réactions en une seule étape de fermentation, en utilisant des souches microbiennes au métabolisme largement reprogrammé.

Comparaison simplifiée de quelques technologies valorisables dans les bioraffineries

Technologie	Atouts	Faiblesses
Biotechnologies vertes	<ul style="list-style-type: none"> - Productivité et capacités métaboliques des plantes cultivées. - "Simplicité" de la production agricole. 	<ul style="list-style-type: none"> - Complexité de l'ingénierie métabolique sur les plantes supérieures. - Délais d'évaluation agronomique et de multiplication des semences. - Non acceptation de ces technologies dans certains pays d'Europe.
Fermentations – Ingénierie métabolique	<ul style="list-style-type: none"> - Potentiel de l'ingénierie métabolique microbienne et de la biologie synthétique pour produire une molécule spécifique à partir de biomasse hétérogène (substrats non purifiés). Possibilités de réaliser en une étape industrielle plusieurs réactions chimiques successives. - Conditions de process simples (Suspension aqueuse diluée, température 30-40°C, pression atmosphérique). 	<ul style="list-style-type: none"> - Complexité des changements d'échelle lors des développements. - Complexité du pilotage d'une fermentation et du maintien d'une souche. - Complexité des opérations d'extraction et de purifications. - Gestion du confinement de souche OGM ou recombinante.
Traitements enzymatiques	<ul style="list-style-type: none"> - Diversité des enzymes existantes. - Potentiel du génie enzymatique (amélioration des performances) - Réactions facile à mettre en œuvre. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût relativement élevé. - Une enzyme = une étape sur un substrat. - Ne s'automultiplie pas.
Procédés chimiques	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne maîtrise. - Régularité de mise en œuvre. - Purification souvent simplifiées. 	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptés à un substrat homogène. - Consommations souvent importantes en énergie (températures et pressions élevées) et en eau. - Catalyseurs sensibles aux impuretés. - Pouvant être polluants.

IV.5 – BIOCARBURANTS ET CHIMIE DU VEGETAL

Tout comme la pétrochimie est née dans le sillage de la production massive de biocarburants, le développement de la chimie du végétal dépend pour une part importante des progrès technologiques et des réalisations industrielles associés aux biocarburants.

- **La fabrication d'alcool** est ainsi une activité humaine très ancienne mais la production de bioéthanol de première génération à très grande échelle a permis d'optimiser largement les procédés de fermentation nécessaires et d'organiser des filières de mobilisation de la biomasse concernées. Ce n'est qu'à cette condition qu'ont pu émerger les projets actuels de production d'éthylène et de ses dérivés à partir de l'éthanol de canne à sucre au Brésil. Le bioéthanol, qui n'était considéré que comme un biocarburant, est devenu désormais une molécule plateforme pour l'industrie chimique.
- **La production de biodiesel de première génération** a pour sa part stimulé considérablement le renouveau de l'oléochimie. Les développements d'applications nouvelles des esters méthyliques végétaux et des dérivés du glycérol sont en plein essor, grâce aux soutiens ou aux incitations en faveur du biodiesel de première génération. Celui-ci a ainsi un rôle structurant très fort des filières oléagineuses et assure l'émergence de bioraffineries dédiées.
- Plus récents dans le paysage, **les projets de productions de butanol, de terpènes ou d'autres hydrocarbures à partir de biomasse**, selon des procédés biotechnologiques, sont financés par le potentiel qu'ils offrent d'applications dans les biocarburants. Ils bénéficient ainsi de soutiens publics importants et d'investissements directs des géants du secteur pétrolier.
- **Les biocarburants de seconde génération, issus de la biomasse lignocellulosique**, sont encore à l'étape de la recherche ou des pilotes mais sont portés par un immense élan de soutien financier public qui génère de nombreux développements technologiques dont bénéficiera la chimie du végétal. Ils permettront la création de filières de mobilisation de biomasse originales ou de renouveler celles des filières papetières.
- **La troisième génération de biocarburants – ceux qui seront produits à partir de la culture de microalgues** - fait l'objet de perspectives qui dépassent parfois le raisonnable. La filière n'existe pas encore et ses perspectives d'ensemble sont très floues. Les besoins fonciers, ceux en nutriments, les technologies d'extraction, le devenir des coproduits et des résidus riches en azote et en minéraux sont autant de problématiques à appréhender. Il n'empêche ! Dès maintenant, des soutiens financiers importants, publics ou privés, permettent à des entreprises innovantes d'explorer un potentiel nouveau. Les futures cultures de microalgues seront-elles destinées à produire des biocarburants ou des intermédiaires de synthèse à plus forte valeur ajoutée ? L'avenir le dira mais, en tout état de cause, les projets auront été portés par la perspective de produire des carburants.
- Citons pour être complet quelques exceptions notables. **Les filières amidonnères**, poursuivent leur développement d'intermédiaires de synthèse sans que le sort de ces deniers soit nécessairement associé à celui des carburants. Comme toutes les huiles végétales, celle de **ricin** peut être utilisée pour la production de biocarburants mais les usages les plus porteurs de valeur de la petite filière concernée demeurent dans le domaine des biomatériaux.

Dans les choix politiques de développement durable et de politique énergétique, les carburants sont donc un thème clé, plus facilement pris en compte par les décideurs et les investisseurs que ceux des besoins stratégiques de notre industrie chimique et de nos filières agricoles. Les

impulsions publiques fortes et les investissements financiers massifs viendront prioritairement pour soutenir le développement des biocarburants, la chimie du végétal devant fréquemment se positionner dans leur sillage.

L'ensemble des parties prenantes et des décideurs doivent intégrer et assumer ces réalités et en tirer lucidement les conséquences, la toute première étant que la continuité est nécessaire. On ne peut soutenir quelques années les biocarburants de première génération puis les considérer imparfaits et les laisser trop tôt face à la concurrence directe des produits fossiles. Les deuxièmes et les troisièmes générations de biocarburants n'ont de chance de succès que si elles s'inscrivent dans la continuité de la première, celle qui a permis la construction d'outils industriels performants, la structuration et l'amélioration continue des performances de plusieurs filières et des développements technologiques considérables. Le débat sur les usages alimentaires ou non des terres a été excessivement simplifié. **Il n'y a pas de gisement de biomasse dont l'exploitation soit sans incidence sur l'équilibre d'ensemble des besoins de nos sociétés humaines et de la préservation de notre environnement.** Nous serons toujours plus fortement contraints à gérer des ressources limitées, à recycler des produits et à limiter nos gaspillages. Les biocarburants de seconde génération seront inévitablement associés à de nouvelles concurrences d'usages et - parions le - ceux de troisième génération aussi. Gardons nous de dénigrer les acquis récents pour rêver du futur. Dans la transition en cours, la continuité est absolument nécessaire, tant dans le domaine strict des biocarburants que des développements collatéraux de la chimie du végétal.

IV.6 – RISQUES ET BESOINS DE POLITIQUES PUBLIQUES

Comme nous venons de l'évoquer, les développements de carburants, de produits chimiques ou de matériaux à partir de la biomasse, trouvent leur place dans une économie de transition. A une consommation immodérée et souvent polluante de ressources fossiles qui paraissaient inépuisables doit succéder un usage durablement géré de ressources renouvelables, issues de la biomasse.

Si le positionnement exact du peak oil ne fait pas encore l'objet d'un consensus parmi les experts, il est cependant acquis que le cours des ressources fossiles suit une tendance lourde à la hausse et devient plus volatil. Le prix du pétrole est toujours moins prévisible alors qu'il est une référence clé de tous les business plan de projets de chimie du végétal. Fondamentalement, les produits de ce secteur sont en concurrence avec ceux de la pétrochimie.

Bien au delà d'effets connexes liés au développement du bioéthanol, les marchés des matières premières végétales ont également subi et peuvent encore subir des nouvelles secousses. Les populations des pays en développement augmentent rapidement et aspirent, dès que leur niveau de vie augmente, à consommer des aliments plus riches et des protéines animales. Ne soyons pas naïfs, la démographie incontrôlée est la première responsable de la destruction de notre environnement et des tensions sur les prix de nos matières premières agricoles.

Contrairement à ce que l'on lit parfois, les déboisements illégaux de la forêt amazonienne ne sont pas réalisés pour mettre en place des cultures productrices de biocarburants mais pour étendre celles de soja afin de satisfaire les nouveaux besoins de protéines végétales pour l'alimentation du bétail de l'Asie et des autres continents en croissance. En dépit des progrès évoqués dans les chapitres précédents des capacités de production agricole de notre planète, les équilibres sont précaires. Une période de croissance trop rapide pour une économie locale, une mauvaise récolte dans une région agricole importante et les courbes rassurantes de lente diminution du prix des matières premières agricoles se hérissent de pics inquiétants. Notre monde ne connaîtra la sécurité durable de ses besoins, alimentaires, énergétiques et autres, que lorsqu'il gèrera sa démographie et c'est loin d'être le cas.

Le développement des débouchés non alimentaires peut aussi contribuer à réduire la volatilité des prix des produits agricoles, non seulement car il diversifie leurs marchés mais également parce qu'il contribue à stimuler l'augmentation des rendements et élargit l'offre de protéines végétales, abondantes dans les coproduits obtenus. En contrepartie, l'importance économique plus large que peuvent prendre les matières premières agricoles peut accentuer leur attrait comme objet de spéculations et des mécanismes de régulation des excès de ces dernières doivent être développés.

Les ressources lignocellulosiques directement valorisables pour des bioraffineries de seconde génération sont elles-aussi limitées et les concurrences pour leurs usages se développent rapidement. Les arbitrages qui seront nécessaires ne seront pas plus simples à rendre que ceux aujourd'hui nécessaires sur les utilisations des terres et des matières premières agricoles. Le monde a faim de nourriture mais aussi de combustibles, de matériaux, de carburants et de produits chimiques.

Volatilité des cours des matières premières fossiles de référence, besoins croissants des populations, volonté collective de préserver l'environnement, la transition économique nécessaire sera longue et difficile car elle ne consistera en aucun cas en une substitution rapide d'une ressource par une autre. Nous entrons dans une ère de complexité qui doit faire l'objet d'une gestion à la fois très volontariste et conservant suffisamment d'humilité et de flexibilité. Aucune ressource ne peut se substituer au tout pétrole. Le charbon et le gaz vont occuper une place croissante et il faudra apprendre à en faire des usages propres. La biomasse peut devenir une ressource importante pour la production de carburants, de matériaux et de produits chimiques mais elle ne saura couvrir, ni aujourd'hui, ni encore moins demain, la totalité des besoins servis aujourd'hui par la filière pétrolière. Elle devra donc faire l'objet d'une gestion particulièrement avisée.

Les politiques publiques concertées n'ont jamais tant été nécessaires. Elles doivent être durables et avoir de fortes ambitions en termes de développement de filières. A cet égard, l'Europe offre une plus grande continuité de vision que les politiques nationales souvent trop sensibles aux mouvements d'opinion. Les citoyens des pays riches d'Europe ne perçoivent que rarement les mouvements du monde qui se dessinent et les indispensables efforts d'adaptation qui nous incombent. Comme il est facile de refuser les OGM et tout moyen d'augmenter la productivité agricole dans une région du monde qui n'a pas faim et dont l'agriculture est protégée ! Comme nous tardons en revanche à réduire nos consommations énergétiques dans un pays où les prix de l'électricité et du gaz s'écartent régulièrement de ceux du marché mondial. Avec la fausse mauvaise conscience des pays du Nord, nous ne voulons pas que les terres agricoles produisent autre chose que des denrées alimentaires mais nous ne réduisons légèrement nos consommations de carburants que lorsque le prix de ceux-ci augmente trop fortement.

Dans le domaine des biocarburants et de la chimie du végétal, les USA ont pris des orientations fortes qu'ils déclinent sans états d'âme. Leur but s'inscrit tout simplement dans l'objectif d'assurer l'autonomie énergétique nationale, un discours que nous n'osons guère reprendre à notre compte. Les moyens sont en mis en place et les risques acceptés. Plusieurs projets font l'objet de soutiens massifs qui leur permettront d'émerger à l'échelle industrielle.

Dans ces secteurs de valorisation des produits de la biomasse, la cohérence des politiques agricoles, industrielles et énergétiques est indispensable. Le développement de bioraffineries nous permettant de construire une chimie plus durable ne sera possible que si des filières agricoles et forestières sont consolidées, que si des technologies nouvelles efficaces sont inventées et utilisées, que si des investissements industriels importants sont incités et soutenus, que si le recyclage des nouveaux produits est prévu dès leur conception.

IV.7 – EUROPE, USA, BRÉSIL, ASIE

En 2005, le territoire des bioraffineries paraissait centré sur l'Amérique du Nord et sur l'Europe, faute d'une visibilité suffisante sur ce qui pouvait s'initier en Asie.

En 2010, le paysage a changé. Les unités de bioéthanol et de biodiesel se sont multipliées dans les pays ayant mis en place des politiques de soutien à leur production (USA, UE, Canada, Brésil, etc...). Les bioraffineries opérationnelles pour produire des intermédiaires de synthèse pour la chimie sont encore en petits nombre et généralement issues de l'extension sur les mêmes sites d'industries traditionnelles (amidonneries, sucreries, huileries, usines de pâtes à papier).

Si l'innovation amont la plus abondante provient encore des USA, la localisation des nouvelles unités industrielles est choisie selon deux critères :

- Le coût local des matières premières végétales et l'aptitude des filières en place à en mobiliser de grandes quantités.
- Les perspectives régionales de croissance des marchés que pourront servir ces bioraffineries.

Les unités de biocarburants poursuivent ainsi leur développement, à grand renfort d'incitations publiques, en valorisant les matières premières agricoles locales, en Amérique du Nord et en Europe et au Brésil ainsi que dans différents pays asiatiques pour produire des carburants destinés à la consommation nationale mais aussi à l'export.

Les ateliers destinés à fabriquer des intermédiaires de synthèse venant en concurrence frontale de leurs homologues pétroliers sont en construction tout particulièrement au Brésil ou en Thaïlande pour servir des marchés régionaux, en croissance beaucoup plus forte que ceux de l'Europe.

Il est ainsi symptomatique de voir **Solvay** développer la technologie Epicerol® et initier une production en France mais engager peu après la construction d'un atelier dont la capacité est dix fois plus importante en Thaïlande. C'est au Brésil que les premières unités de fabrication de bioéthylène et de leurs dérivés vont voir le jour (**Braskem, Solvay**). C'est encore dans ce même pays que des entreprises comme **Amyris** viennent construire leurs pilotes industriels. La canne reste la matière première la plus abondante et la moins onéreuse pour produire du sucre. Le territoire brésilien offre un potentiel considérable d'expansion pour cette culture, en dehors des régions amazoniennes à protéger. **Purac** va de son côté fabriquer des lactides en Thaïlande. Les volumes de matières premières nécessaires sont d'un ordre de grandeur inférieur à ceux évoqués précédemment et la filière manioc thaïlandaise, bien structurée, peut fournir une matière première bon marché à une usine qui sera implantée à proximité des marchés les plus dynamiques de la planète.

D'autres projets sont positionnés en Chine et en Inde mais restent moins faciles à appréhender dans le cadre de cette étude.

Demeurent sur notre continent et aux USA des projets de molécules innovantes, répondant à des forts critères de durabilité mais dont les marchés doivent être encore créés. Les ateliers nouveaux s'intègrent généralement à des sites agroindustriels préexistants. Ceux affectés à la production de biocarburants de première génération auront un rôle croissant.

Quelle vision du futur pouvons-nous développer puis mettre en œuvre sur notre continent ? Nos atouts et nos handicaps sont multiples. Nos filières agricoles sont productives et structurées. Nos capacités à mobiliser la biomasse agricole sont démontrées. Nous savons gérer durablement nos territoires agricoles et nos forêts. Nos outils industriels de prétransformation sont performants. Notre industrie chimique est la première du monde et nous comptons de nombreux leaders des biotechnologies. Nos consommateurs sont parmi les plus sensibles aux thématiques du développement durable et sont demandeurs de produits biosourcés. Le coût de

nos matières premières agricoles ou forestières reste cependant élevé et nos économies n'ont que des perspectives de croissance faibles. Nos politiques de soutien aux biocarburants sont hésitantes. Notre capacité de recherche et d'innovation industrielle reste, dans son ensemble, inférieure à celle des USA.

Nos développements doivent prendre en compte ces éléments de contexte. Nous devons identifier quelles sont les filières agricoles les plus performantes pour alimenter notre industrie. Avant d'autres régions du monde, nous devons optimiser nos modèles ainsi que notre rentabilité industrielle et nous concentrer sur des produits à forte valeur ajoutée.

IV.8 – DEVELOPPEMENT ET FACTEURS CLES DE SUCCES DES BIORAFFINERIES

Niveau de maturité du secteur

La bioraffinerie idéalisée, répondant à l'un des descriptifs présenté en introduction de cette étude, n'est pas encore une réalité très commune. Il existe des unités industrielles fabricant une large gamme de produits (amidonneries, etc.) mais elles s'approvisionnent le plus souvent en une matière première végétale. De nombreux ateliers de chimie du végétal sont en cours de construction mais ils ont pour objectif de produire une seule molécule, à partir – du moins initialement – d'une source unique de biomasse. La valorisation des coproduits est intégrée dans le modèle économique mais n'a qu'un rôle périphérique.

Avant d'évoquer ce que peuvent être les facteurs clés de succès des bioraffineries, il convient de clarifier un certain nombre de points :

- **La bioraffinerie telle qu'elle a été décrite au début de cette étude correspond à un modèle industriel de secteur à maturité.** Les acteurs sont alors en nombre limités, ils sont en forte concurrence sur les coûts et tous leurs paramètres sont optimisés (approvisionnement, technologie logistique, offre marketing, etc.). A un tel stade de développement, le cumul des investissements réalisés est considérable et constitue une barrière à l'entrée forte pour de nouveaux entrants. C'est ce qui serait nécessaire pour que les bioraffineries puissent *dès maintenant* assurer une compétition viable avec les raffineries pétrolières, pleinement matures dans leur modèle, après 150 ans d'histoire.
- **Selon un autre regard, la chimie (moderne) du végétal est un secteur encore au tout début de son développement.** L'innovation y est forte, apporte des ruptures technologiques mais la production industrielle est loin d'être optimisée. Les coûts restent élevés. Les marchés sont en forte croissance mais encore petits et immatures. Les concurrents sont nombreux.
- Il existe enfin **des unités, positionnées sur des marchés spécifiques, qui raffinent des matières premières issues du végétal depuis de longues années.** Les technologies de base sont stabilisées mais les applications des produits se multiplient ou poursuivent leur développement. Citons l'exemple de **DRT** qui raffine et transforme, selon des procédés chimiques, des substances issues du pin et d'**Arkema** dont l'usine de Marseille poursuit la production d'acide undécylénique à partir d'huile de ricin depuis plusieurs dizaines d'années.

La réalité des usages de la biomasse pour la production de carburants et d'intermédiaires de synthèse est donc un curieux mélange des genres industriels, caractéristique d'une situation de transition. Les acteurs clés sont tant des industries traditionnelles, maîtres de leurs capacités de mobilisation de matière première, de leurs technologies et de leurs marchés, que des start up créées il y a moins de 5 ans ! **Le problème stratégique majeur du secteur reste celui de la compétition avec la filière pétrolière qui ne peut se réaliser avec succès qu'en combinant les innovations de rupture avec un savoir faire industriel éprouvé.** On devine bien que la bioraffinerie du futur doit intégrer ces deux dimensions mais qu'une telle perspective nécessite

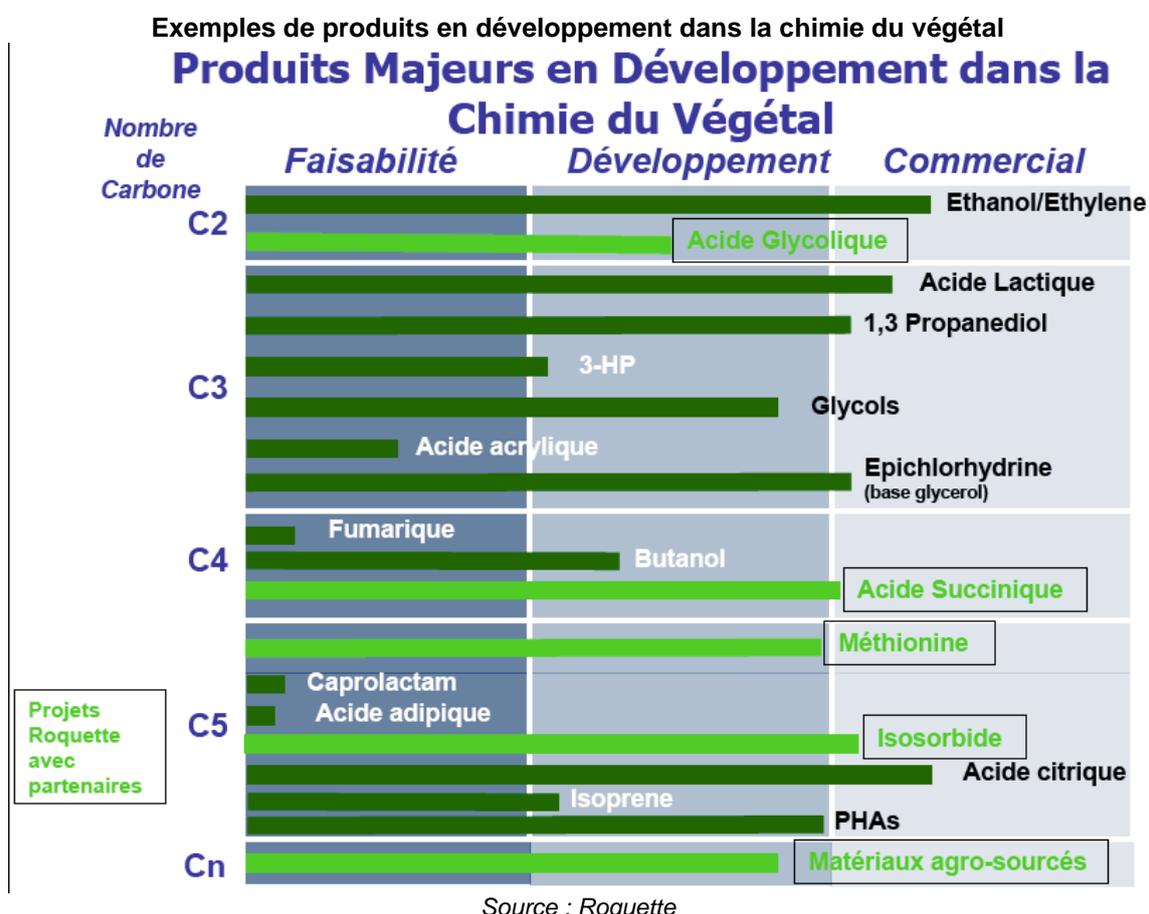
des alliances et que le chemin pour qu'un modèle stabilisé soit établi est encore long. Aucun secteur ne gagne la maturité ni ne peut optimiser son modèle en quelques années, d'où l'importance des défis en cours et de la nécessité déjà évoquée de continuité de politiques de soutien publiques.

Degré d'avancement des projets et molécules du futur

Le schéma suivant, emprunté à l'entreprise **Roquette**, montre la diversité de niveau de développement de différents projets de production d'intermédiaires de synthèse biosourcés.

Parmi les produits au stade commercial le plus avancé, apparaît ici **l'éthanol** dont les technologies de production se sont optimisées. La transformation en éthylène et en ses dérivés implique la construction d'ateliers spécifiques mais pas de développement de technologies particulières car celles-ci sont déjà acquises. L'éthanol est le produit d'unités spécialisées, associées ou non à des bioraffinerie de sucre ou de céréales à vocation plus large.

L'acide citrique a été peu évoqué dans cette étude car ses applications concernent avant tout l'agroalimentaire, la pharmacie et la cosmétique.



Le développement de **l'acide lactique** est, comme on l'a vu, lié à celui du PLA. Le nombre d'acteurs se multiplie, en dépit des barrières à l'entrée que constituent les brevets déposés.

Les productions concurrentes en émergence d'**acide succinique** doivent trouver leurs marchés qui devraient se développer au fur et à mesure que les coûts de revient et les prix sauront baisser. A l'inverse, **l'épichlorhydrine** dispose de marchés bien établis.

A l'inverse, les productions de certaines molécules disposant de forts marchés potentiels sont encore à l'étape de la recherche. C'est le cas de l'**acide adipique**.

Ainsi, la diversité des produits que pourront fabriquer les bioraffineries du futur vont aller en s'élargissant. Notons toutefois que chaque atelier représentera des investissements importants et qu'une fois construits, leur rentabilité dépendra de leur coefficient d'utilisation. L'image de la bioraffinerie totalement flexible adaptant ses productions aux marchés et aux matières premières disponibles n'aura probablement qu'une réalité partielle, tout simplement pour des raisons de l'importance des investissements à réaliser et de leur rentabilité financière. Un outil doit fonctionner à pleines capacités une fois qu'il est disponible et l'expérience passée a souvent consisté à spécialiser une unité sur un produit et une filière d'approvisionnement. Les bioraffineries aujourd'hui diversifiées dans leurs produits sont les fruits de longs développements industriels.

Un autre regard sur les différents modèles de bioraffineries en fonctionnement

Réexaminons sous un autre angle la classification des bioraffineries présentée en introduction. Quelle est la problématique stratégique principale des différentes catégories ? Le tableau ci-dessous propose une vision simplifiée, portée depuis la France et orientée "produits".

Secteurs servis	Exemples	Problématique majeure
Alimentation humaine, animale, chimie, pharmacie.	Amidonneries	- Renforcer la valeur du mix de produits et étendre la position dans la chaîne de valeur.
Alimentation humaine, animale, carburants, chimie.	Huileries avec atelier de production de biodiesel	- Compétitivité du biodiesel avec les carburants fossiles. - Faible part actuelle des débouchés dans la chimie.
Carburants, alimentation animale	Ethanolerie de céréales ou de betterave.	- Compétitivité de l'éthanol produit avec celui de canne et l'essence.
Carburants, énergie	Ethanolerie de canne	- Développer la filière en amont.
Nouveaux biocarburants	Unités de production de butanol, terpènes, hydrocarbures à base de biomasse.	- Valider des procédés à l'échelle industrielle. - Compétitivité avec les carburants fossiles.
Matériaux, énergie, chimie	Usines de production de pâte de cellulose	- Compétitivité des petites unités et valeur ajoutée de leurs produits. - Concurrences d'usage sur la ressource.
Carburants et autres produits de seconde génération	Projets de bioraffineries de seconde génération.	- Validité des procédés industriels. - Mobilisation de la ressource et concurrences d'usage.

Les problèmes stratégiques majeurs que l'on peut formuler pour les différents modèles de bioraffinerie sont étroitement liés à leur niveau de maturité. La technologie est limitante pour les nouveaux produits alors qu'à l'inverse les industries traditionnelles doivent mieux équilibrer leurs positions sur des marchés diversifiés et complémentaires.

Les différents biocarburants sont aujourd'hui dépendants d'incitations leur permettant d'être compétitifs avec leurs homologues d'origine fossile, ce qui permet aux Etats de réguler le développement du secteur. A moyen terme, sous réserve de poursuite de la hausse des cours du pétrole, la problématique stratégique évoluera : ce sera alors la disponibilité en matières premières effectivement mobilisable qui deviendra le facteur limitant de la croissance des unités industrielles concernées.

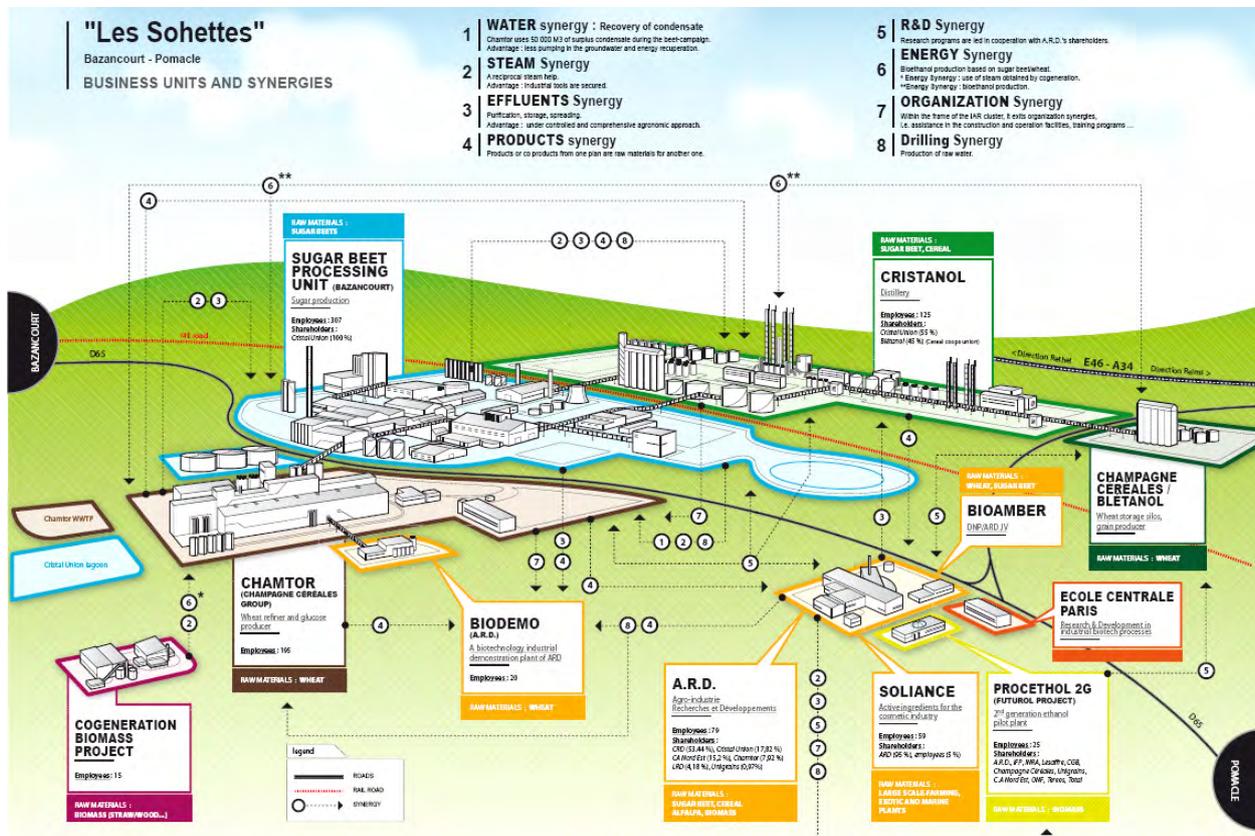
Les facteurs clés de succès des bioraffineries d'aujourd'hui et de demain

La liste que l'on peut établir des facteurs clés de succès rassemble donc des critères d'importance relative très variable selon le stade de développement des technologies et des produits concernés. De façon simplifiée, il faut aux bioraffineries - comme à tout secteur industriel - des marchés, des matières premières, un outil industriel performant et une structure financière solide leur permettant d'affronter la volatilité des cours en amont et en aval, tout en innovant régulièrement pour demeurer compétitif. Ce lieu commun étant posé, on peut examiner

On peut la parcourir de l'amont vers l'aval.

- **Maîtrise de la ressource : capacité à mobiliser de façon durable et compétitive, des quantités suffisantes de biomasse de qualité adéquate en dépit de la multiplication des concurrences d'usages.** C'est l'aptitude à structurer des filières végétales profitables qui est ici nécessaire. La bioraffinerie peut être l'acteur principal de cette structuration (modèle français classique) ou la déléguer à des partenaires spécialisés, locaux ou situés dans des régions géographiques particulières (modèle hollandais mais aussi de plusieurs industriels dans différents pays du monde).
- **Maîtrise technologique et industrielle. Les bioraffineries agrègent, de plus en plus, une diversité inédite de procédés** (prétraitement mécanique, physicochimique ou biochimique ; fermentation ; conversion chimique ; extraction, purification ; traitement des effluents ; cogénération ; biométhanisation etc.). A cette diversité des technologies doit être bien entendu associée celle des **compétences** et des ressources humaines les mettant en œuvre. La bioraffinerie mature doit être un ensemble industriel parfaitement intégré, composé d'une ou plusieurs entreprises (cf. l'illustration de la page suivante).
- **Capacité à servir simultanément des marchés matures et d'autres en émergence**, en faisant preuve d'une vision marketing prospective. La connaissance des marchés et de leur besoin est essentielle.
- **Capacités d'innovation** pour développer et protéger des technologies et des produits différenciateurs.
- **Capacité de management et vision stratégique.** Les bioraffineries sont appelés à devenir des industries lourdes mais contraintes à beaucoup d'agilité. La profondeur de vue des dirigeants, leurs **capacités à nouer les bonnes alliances au bon moment** (elles sont indispensables dans ce secteur) et à engager les bons paris seront déterminantes. Il n'est pas aisé de gérer des ensembles industriels complexes, intégrant régulièrement des technologies nouvelles et servant des marchés aussi divers que ceux de l'alimentaire, des carburants, de la chimie, ...
- **Capacités financières pour développer l'outil industriel et de nouvelles technologies mais aussi pour résister aux à-coups de la volatilité des prix des matières premières et des marchés.**

L'intégration de plusieurs acteurs du bioraffinage au sein un véritable écosystème industriel sur un même site: l'exemple de Bazancourt-Pomacle en Champagne-Ardennes



V – SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

V.1 - SYNTHÈSE GÉNÉRALE

Nous avons souligné en introduction les événements extérieurs qui ont marqué ces cinq dernières années. Ils ont réduit la visibilité que l'on pensait avoir des cours du pétrole alors que celui-ci reste la référence pour calculer la rentabilité de nombreux projets de chimie du végétal.

En revanche, au même moment, la demande de produits biosourcés et les encouragements publics en faveur de leur développement se sont multipliés. Les soutiens aux biocarburants, de 1^{ère} puis de deuxième génération, permettent des avancées technologiques et industrielles dont profite la chimie.

Les biotechnologies blanches connaissent un essor remarquable. Il est favorisé par le développement des capacités à simuler un métabolisme microbien par bioinformatique, puis à réaliser rapidement et en très grand nombre, les séquençages, synthèses d'ADN, screening et autres opérations permettant la création de souches spécialisées, dédiées à la production d'une molécule précise.

Le nombre de projets industriels concrets se multiplie mais reste encore limité, particulièrement en ce qui concerne la production d'intermédiaires chimiques. Les changements d'échelle sont longs et difficiles quand les biotechnologies sont en jeu (l'amélioration sensible des performances de catalyse chimique nécessite également des travaux prolongés). Les investissements industriels sont importants et des risques demeurent sur les marchés. On peut ainsi noter que des projets déjà engagés il y a 5 ans n'ont pas encore abouti (production de 3-HPA) et que d'autres, annoncés en 2007 (production d'éthylène biosourcé par Dow), semblent avoir été annulés ou reportés *sine die*. On remarquera à ce propos que si les start up annoncent des mises sur le marché à des échéances courtes, les entreprises plus "traditionnelles" du secteur comme **Novozymes** et **Genencor** communiquent sur le fait qu'un projet de production de nouvelles molécules ne peut venir à terme avant au moins 5 et 10 ans. L'incohérence ne semble être qu'apparente : certaines jeunes pousses ont en réalité engagé des travaux de développement depuis déjà plusieurs années et d'autres confondent dans leur communication de façade le passage à l'échelle pilote et celui à la production industrielle.

Les intermédiaires de synthèse biosourcés qui émergent sont en partie ceux que l'on attendait il y a cinq ans (glycérol, sorbitol, acide succinique) et en partie des molécules dont on n'avait pas mesuré l'importance (éthanol, acide lactique). Les vraies surprises se retrouvent dans les terpènes (farnésène, isoprène) et autres hydrocarbures biosourcés. L'avenir montrera si les paris engagés ont eu le succès espéré. D'autres molécules annoncées tardent, en revanche, à connaître un développement industriel.

La pression est très forte, sur tous les produits issus de la biomasse et sur les bioraffineries qui les fabriquent pour qu'ils soient, dès leur naissance, économiquement compétitifs et environnementalement vertueux. On semble oublier parfois les délais qui ont été nécessaires pour que la pétrochimie développe des procédés efficaces et rentables puis réduisent, lentement, ses impacts négatifs sur l'environnement. Les hésitations politiques sur les biocarburants de première génération traduisent cette difficulté de compréhension de la durée nécessaire pour développer des filières végétales et industrielles aux performances optimisées.

La chimie du végétal garde à ce jour une bonne presse, comme l'ont été les biocarburants de première génération à leur début. Le vocable "biosourcé" n'a pas encore été attaqué pour la nature de son préfixe.

L'industrie chimique reste toutefois trop timorée sur l'affirmation de son rôle indispensable dans nos sociétés développées ou en développement. Les industriels de la chimie donnent parfois l'impression de s'excuser d'exister alors que les produits qu'ils fabriquent font intimement partie

du quotidien de base du plus intégriste de nos écologistes mais aussi de celui des populations pauvres des pays du Sud.

Si l'on peut exiger toujours plus en matière d'environnement et de sécurité de la part de notre industrie chimique (comme pour d'autres secteurs), il convient de le faire dans l'esprit de donner de la compétitivité à des industries stratégiques pour l'Europe et pour la France.

La perception des biotechnologies en Europe est disparate. Les biotechnologies blanches sont bien acceptées par nos populations, y compris quand elles sont porteuses d'innovations de rupture. Les biotechnologies vertes inquiètent en revanche certains pays comme la France, alors qu'elles font l'objet de développements considérables et continus sur d'autres continents. On peut se préoccuper des déséquilibres de compétitivité qui vont aller croissant entre les modèles agricoles intégrant l'usage des semences génétiquement modifiées et ceux les refusant.

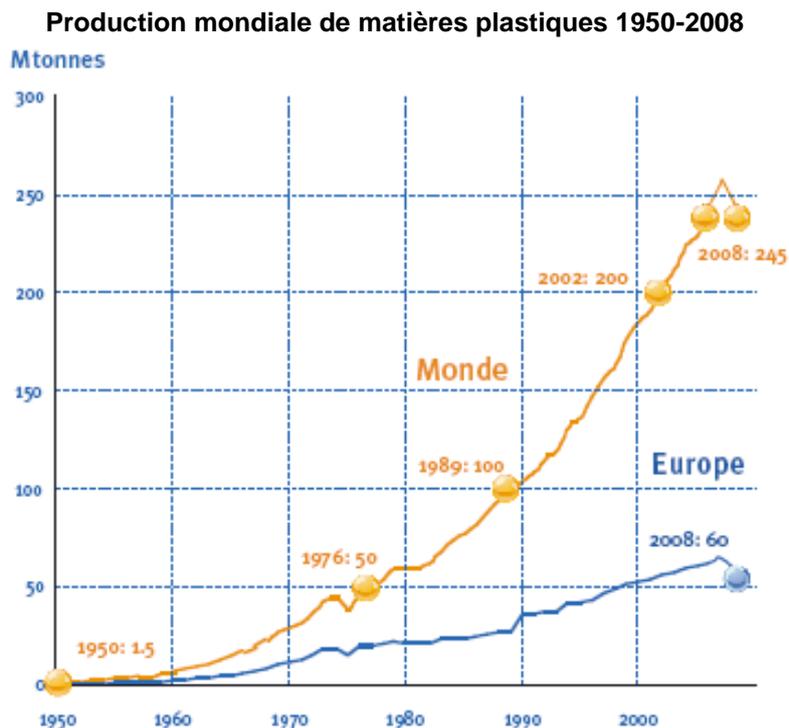
Le débat sur la vocation alimentaire ou non des terres agricoles porte sur une réalité complexe. La moitié de la population du monde est désormais constituée de citadins, y compris dans les pays en développement. Les carburants ne sont pas un luxe inutile mais sont indispensables pour que des camions puissent livrer de la nourriture sur les marchés urbains. Dans un modèle de transition énergétique, la question à traiter n'est pas de la pertinence des biocarburants mais de leur juste place. Il en est de même pour la chimie organique qui doit innover dès maintenant dans les matières premières qu'elle utilise.

Les quantités de biomasse sont limitées, celles de biomasse accessibles à court et moyen terme sont fortement limitantes.

Il est très significatif de noter que **Solvay**, groupe chimique qui s'engage résolument dans la production de commodités à partir du végétal, prévoit que *"25 % de la croissance à venir de la production d'épichlorhydrine pourra être d'origine biosourcée"*. Nous n'en sommes donc qu'au stade ou *une partie de la croissance* et non une partie du total des volumes de certaines commodités pourront avoir d'autres origines que pétrolières. La courbe de progression du marché des plastiques présentée ci-dessous montre l'ampleur des défis que le développement d'une chimie végétale doit affronter pour prétendre à une substitution partielle aux produits d'origine pétrolière.

L'apparition des bioraffineries de seconde génération permettra d'élargir fortement la base de ressources mais la biomasse accessible à court et moyen terme restera limitée et soumise à des concurrences d'usage toujours plus nombreuses. L'usage des déchets végétaux devra donc faire l'objet d'une attention particulière. Il est peu prudent de fantasmer à l'excès sur la 3^{ème} génération en Europe car elle sera inévitablement gourmande en foncier.

Le développement de la chimie de la biomasse doit être poursuivi et amplifié mais sans naïveté. Il nous faudra simultanément réduire nos gaspillages et augmenter considérablement nos capacités et les performances du recyclage. Les démarches en cours des promoteurs du PLA, un vrai "nouveau polymère", sont à souligner car ils élaborent dès maintenant des procédés de recyclage de leur produit.



Source : Plastics Europe Market Research Group (PEMRG)

La fabrication de 250 millions de tonnes de plastiques, le plus souvent pauvres en oxygène dans leur composition, nécessiterait l'utilisation de plus de 500 millions de tonnes de biomasse déjà pré-raffinée. Les plus gros projets actuels d'usines de plastiques biosourcés ne dépassent pas 100 à 200 000 tonnes de capacité et se comptent encore sur les doigts d'une main. La courbe de croissance de la production et de la consommation de plastiques a marqué le pas avec la crise récente mais tout porte à croire qu'elle va retrouver rapidement son rythme de progression précédent, portée par la demande des pays en développement.

V.II - RECOMMANDATIONS

Nous vivons une période de transition, tant sur le plan énergétique que sur celui des ressources utilisées par l'industrie chimique. Cette transition n'est ni spontanée, ni continue, comme nous l'ont montré les événements et les crises de ces dernières années. Le développement des bioraffineries et de la chimie du végétal doivent être soutenus et accompagnés. Au-delà des paramètres économiques, la rencontre entre les filières agricoles ou forestières et celles de la chimie doit être stimulée car elle réunit des secteurs qui se méconnaissent et ne parlent pas encore le même langage.

Il convient d'appuyer une diversité suffisante de filières et de projets mais sans non plus s'égarer dans les travers bien français consistant à saupoudrer les moyens pour satisfaire tous les demandeurs et toutes les entités locales auxquels ils se rattachent. Le bioraffinage est une industrie lourde qui doit être concentrée pour être compétitive. Elle nécessite des investissements importants en R&D puis en équipements, avec des horizons de rentabilité encore incertains, largement liés aux évolutions respectives des cours du pétrole et des matières premières agricoles.

Il est important de renforcer ce qui peut faire notre excellence. La France a des atouts forts : l'abondance des ressources, la qualité de l'organisation de ses filières agricoles et celle de ses acteurs agroindustriels. L'Europe compte dans ses rangs les plus importantes entreprises de la chimie de la planète et des leaders mondiaux en biotechnologie. Si la France se doit de définir sa propre politique de développement de la chimie du végétal, il lui faut nécessairement intégrer ses efforts à ceux de ses voisins pour créer un secteur compétitif à l'échelle mondiale.

La France est un grand pays céréalier mais aux prises avec la forte concurrence d'autres régions et dont les cultures subissent les évolutions climatiques. Nous devons offrir à nos filières blé et maïs de nouveaux débouchés industriels en profitant de l'excellence de nos entreprises agroindustrielles de première et deuxième transformation.

Notre filière oléagineuse est un modèle de structuration. Il convient de l'appuyer pour accélérer son développement dans la chimie des dérivés des huiles végétales.

Notre pays est un leader mondial en matière de production betteravière. Celle-ci bénéficie également d'une filière parfaitement structurée, productrice de sucre et d'éthanol. Nous devons définir son positionnement propre dans les développements à mettre en œuvre afin qu'elle valorise ses atouts spécifiques.

Traditionnellement, la France raisonne par filière végétale alors que ce sont les mêmes agriculteurs qui produisent des céréales, des oléagineux et des betteraves. Si les industries de transformation resteront concurrentes, il est important d'encourager un positionnement d'ensemble de notre agriculture comme nouveau fournisseur de l'industrie chimique. Nos différentes productions agricoles seront de plus en plus les matières premières des mêmes molécules. Il convient également de rapprocher l'agriculture et la forêt. De nouveaux horizons doivent être donnés à nos filières papetières et de mobilisation de la biomasse forestière. Le programme REGIX a eu l'immense mérite de faire travailler ensemble des chercheurs et des techniciens de l'agriculture et de la forêt. Il convient de développer et de faire fructifier ce croisement des regards et des approches, non seulement au niveau de la recherche mais à celui des développements industriels.

La production massive de carburants pétroliers a permis l'essor de la pétrochimie. Celle des biocarburants végétaux est inéluctablement un pilier du développement des bioraffineries et de la chimie du végétal. N'exigeons pas aujourd'hui de nos biocarburants de première génération – ni demain de ceux de seconde génération ! – qu'ils offrent un profil parfait, tant sur le plan technique qu'économique ou environnemental. Donnons en revanche aux secteurs concernés des objectifs de dynamisme, d'innovation et de courroie d'entraînement pour les industries qui peuvent croître dans leur sillage. Les bioraffineries de première génération ont un rôle

précurseur et structurant essentiel, qui doit être reconnu, largement mis en avant, et être positionnées comme le tremplin des progrès à venir.

Les bioraffineries n'obéiront pas un modèle unique ni à des typologies prédéfinies. Il convient d'en tenir compte dans les politiques de soutien et d'évaluation les concernant. Il faut notamment se garder des appréciations réductrices qu'entraînent certains modèles d'analyse de cycle de vie. Les bioraffineries ont vocation à produire une diversité de produits offrant les meilleures valorisations et non à vivre en autarcie énergétique. Les usages de leurs coproduits en alimentation animale restera un élément essentiel de leur raison d'être.

Nous ne pouvons nous satisfaire du statut quo de notre pays sur les cultures génétiquement modifiées. En dépit de la forte tradition d'innovation de notre pays, nous condamnons notre agriculture à perdre peu à peu sa compétitivité. Depuis 10 000 ans, c'est l'inventivité des hommes qui a fait le développement de l'agriculture : ne condamnons pas celle de notre pays à stagner. Il est temps de revenir à des analyses plus rationnelles et équilibrées des bénéfices et des risques.

Nous recommandons donc de :

- Poursuivre une politique de soutien significative à une courte sélection de projets industriels dans la chimie du végétal après avoir tout spécialement analysé les premiers retours d'expérience de BioHub et la capacité structurante des modèles d'écosystèmes industriels intégrant recherche et formation comme celui de Pomacle-Bazancourt.
- Stimuler notre recherche et développement en biotechnologies blanches en identifiant les projets susceptibles de favoriser les valorisations des produits de nos filières agricoles et forestières. Les travaux permettant la production d'**acide adipique** doivent être examinés avec attention.
- Poursuivre le soutien aux biocarburants de première génération en les positionnant dans leur rôle de création de nouvelles filières agroindustrielles. La production agricole, la logistique d'approvisionnement, les procédés de transformation doivent être progressivement optimisés pour leurs différents paramètres technico-économiques et environnementaux. Les valorisations collatérales doivent être largement encouragées. L'appui aux projets de seconde génération doit être renforcé et s'inscrire en continuité des logiques industrielles engagées.
- Développer des projets d'ampleur suffisante en **recherche et développement sur la chimie des acides gras en C18 et C22 et de leurs dérivés en C9 et C11.**
- Poursuivre les développements des dérivés du glycérol en privilégiant les molécules pouvant faire l'objet d'importantes valorisations par notre industrie. **La production d'acide acrylique mérite une attention particulière.**
- Evaluer nos capacités de recherche et développement dans le domaine de la **chimie des lignines** et soutenir une sélection de projets offrant des perspectives de valorisation industrielle à moyen terme.
- **Poursuivre le programme REGIX en élargissant son champ d'action** à d'autres usages des matières premières lignocellulosiques (matériaux composites, chimie).
- **Développer des groupes de concertation** de toutes les parties prenantes concernées par les usages concurrents des ressources en biomasse (combustibles, carburants, matériaux, chimie).
- **Relancer une recherche et développement active en génie génétique végétal.** Mettre en œuvre une démarche pérenne de pédagogie et de promotion des biotechnologies vertes et de leurs bénéfices actuels et potentiels.

ANNEXES

SCHEMAS DE FILIERE

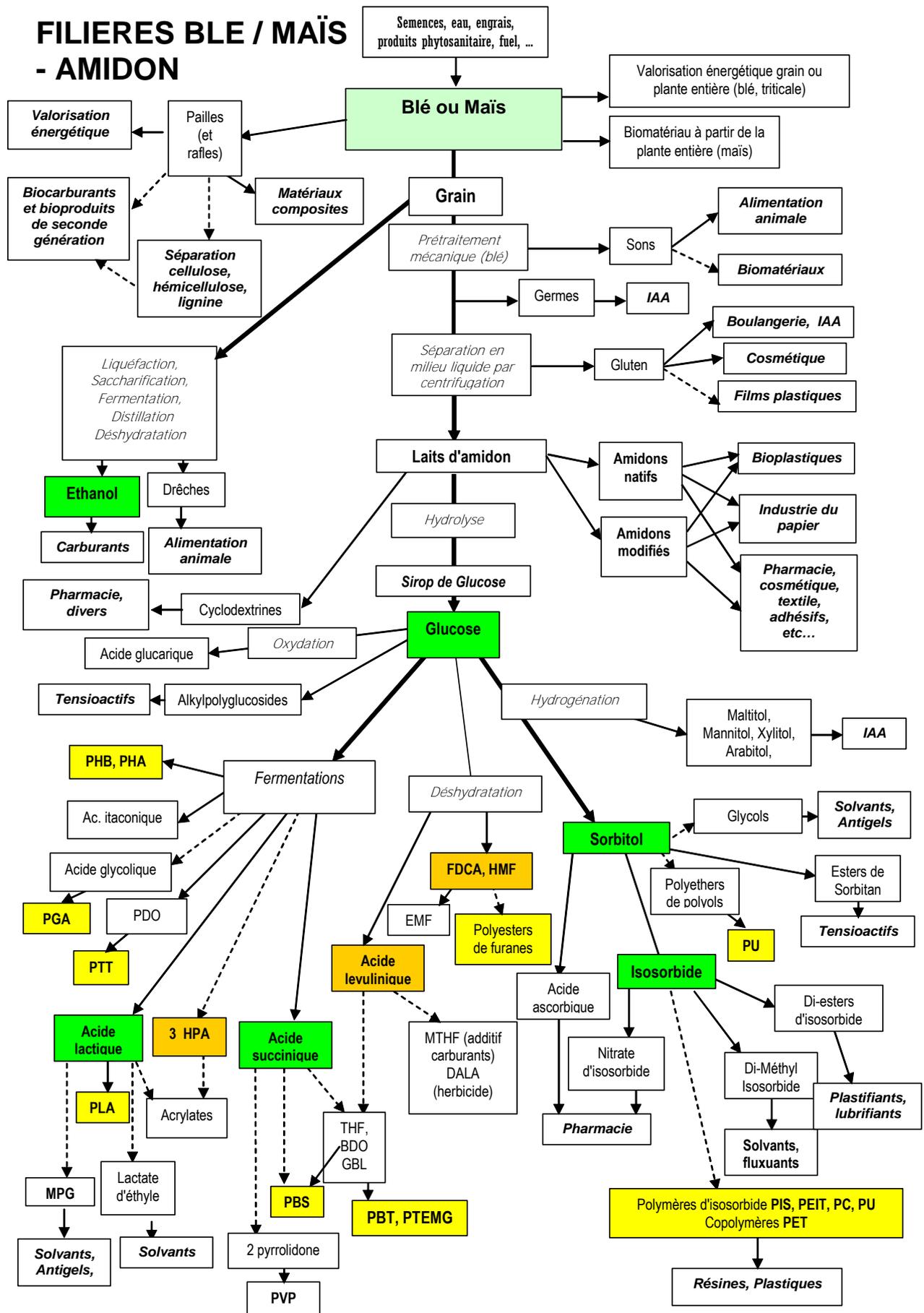
Schéma des filières blé, maïs (amidon)

Schéma de la filière betterave (sucre)

Schéma des filières colza, tournesol (huiles végétales)

Schéma des filières lignocellulosiques

FILIERES BLE / MAÏS - AMIDON



Produit plateforme	
Futures plateformes	
Polymères - biomatériaux	

BDO = 1,4-Butanediol (précurseur de monomère de PBT et de PTEMG)

DALA = Delta-aminolevulinate (herbicide biodégradable)

FDCA = acide furane 2,5 dicarboxylique

EMF = Ethoxyméthylfurfural

GBL = gamma-butyrolactone (précurseur de monomère de PBT et de PTEMG)

HMF = Hydroxy méthyl furane

MPG = Mono propylène glycol

MTHF = 2-Méthyl-tétrahydrofuran (additif carburant – oxygénateur)

PBT = Polybutylène téréphtalate

PBS = 4,4 Bionolle Polyester

PEIT = Polyéthylène isosorbide téréphtalate

PGA = poly acide glycolique

PIS = Polyisosorbide succinate

PG = propylène glycol (anti gel, monomère de plastique)

PHA = Polyhydroxyalcanoates (polymère bactérien utilisable comme bioplastique)

PHB = Polyhydroxybutyrates (polymère bactérien utilisable comme bioplastique)

PLA = acide polylactique (plastique biodégradable)

PTEMG = Glycol d'éther de polytétraméthylène

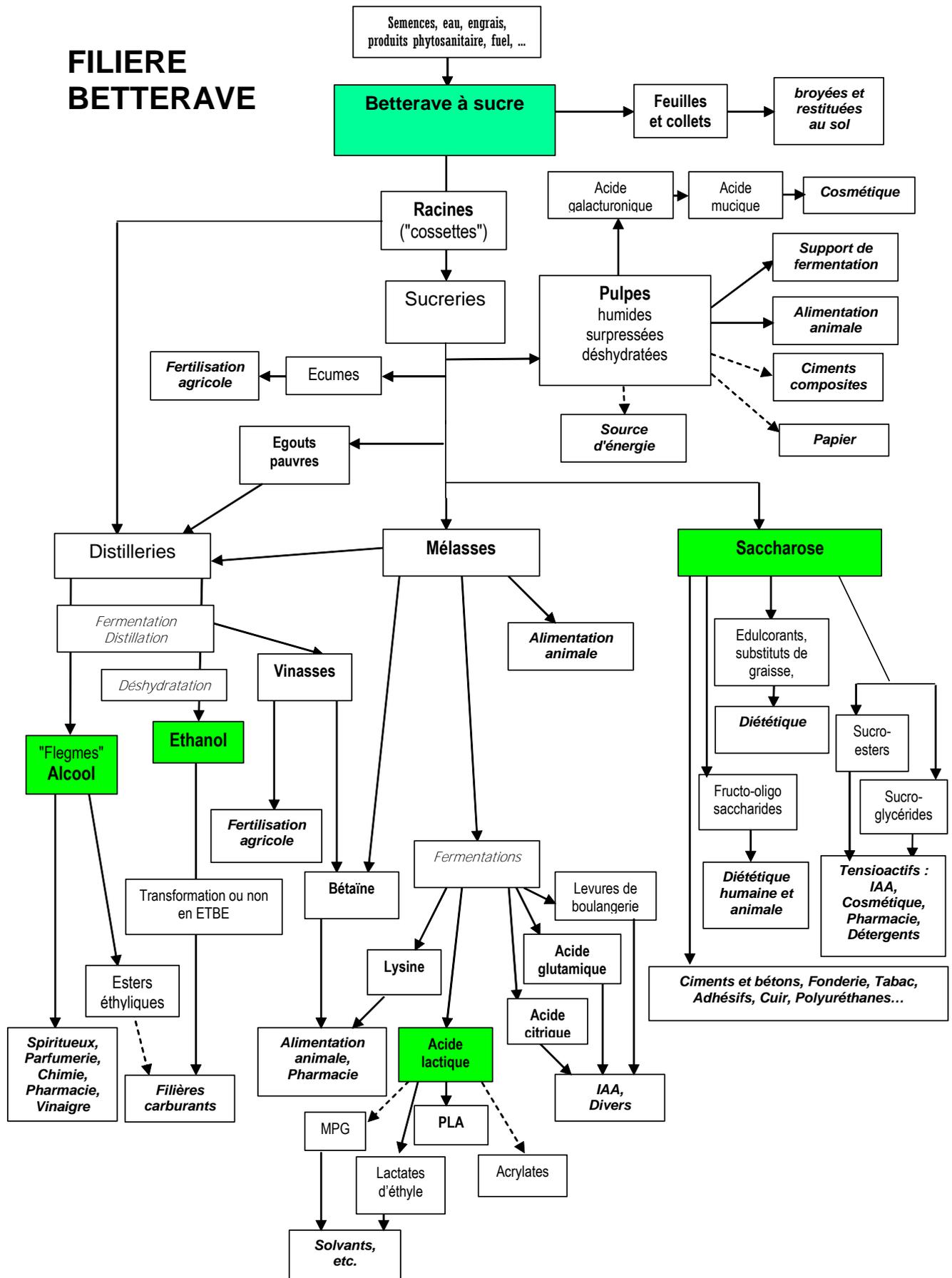
PTT = Polytriméthylène téréphtalate

PU = Polyuréthanes

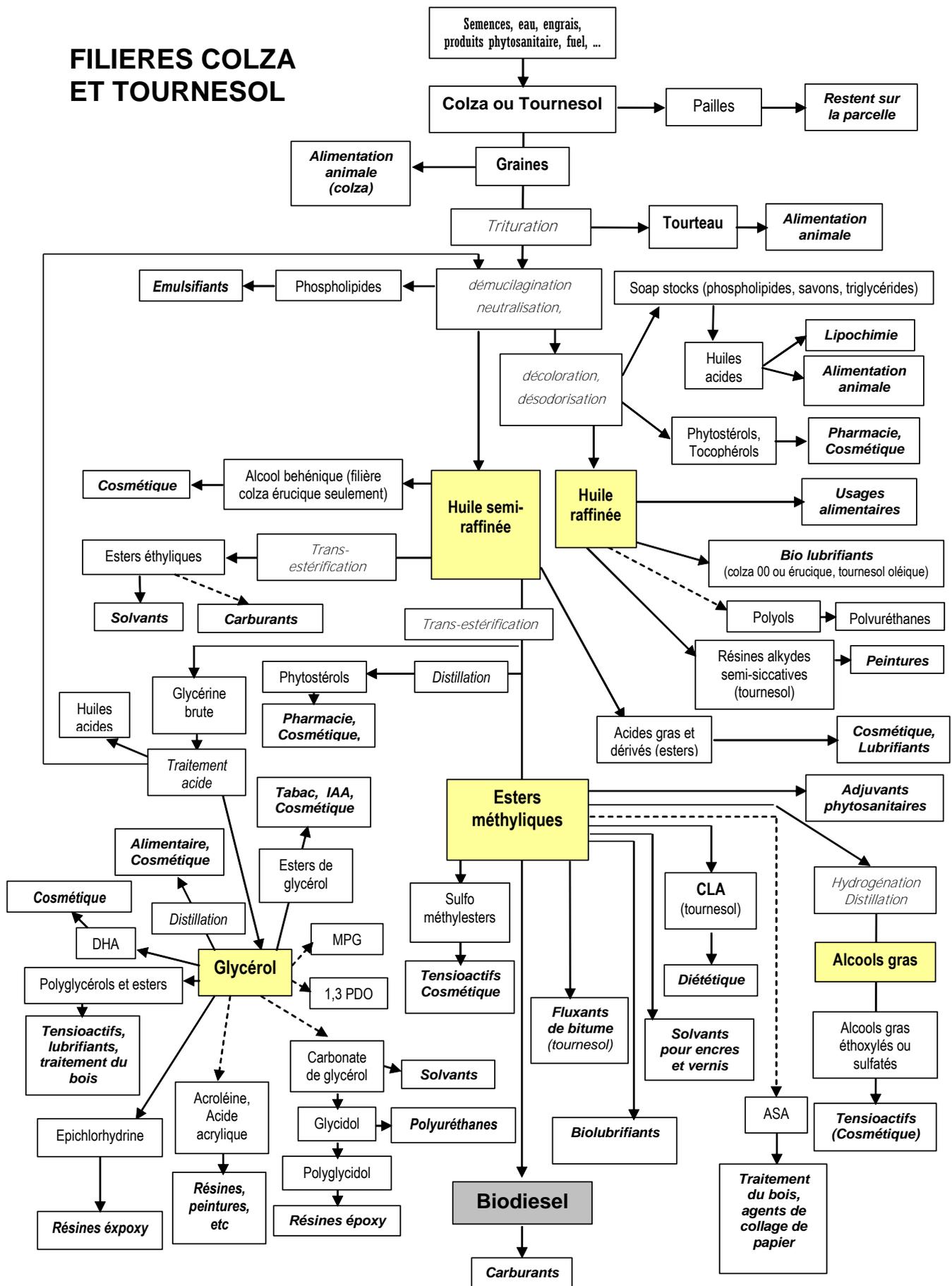
PVP = Pyrrolidone de Polyvinyle (nombreuses applications en pharmacie, parfumerie, papier, agroalimentaire, détergents, comme liant, humectant...).

THF = tétrahydrofuran (solvant, précurseur de monomère de PBT et de PTEMG)

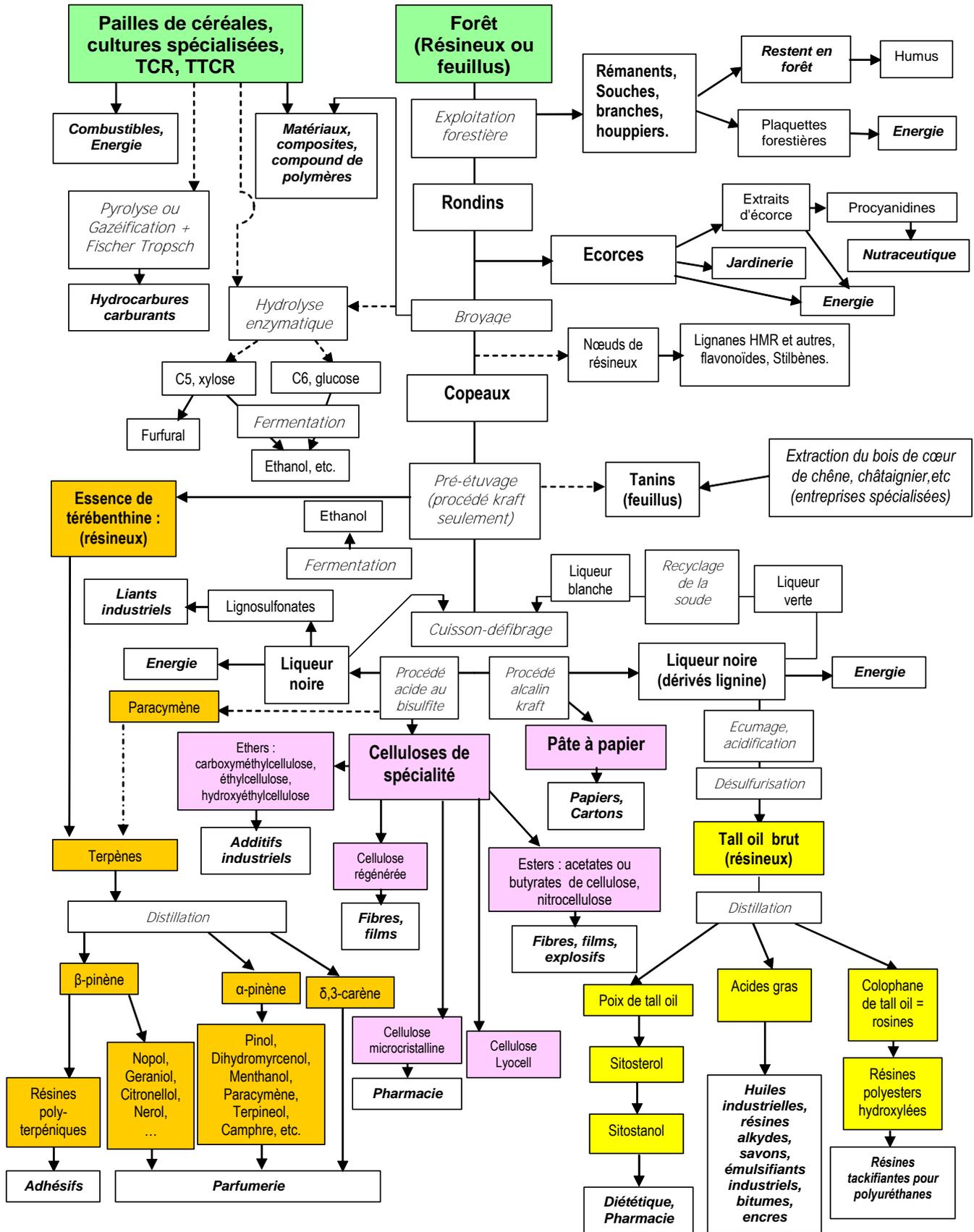
FILIERE BETTERAVE



FILIERES COLZA ET TOURNESOL



FILIERES LIGNOCELLULOSIQUES



DESCRIPTIF SUCCINT D'ENTREPRISES

La liste d'acteurs présentée ci-après n'a aucune prétention d'exhaustivité. Elle recense des entreprises particulièrement visibles dans la mobilisation, la transformation ou la valorisation des produits de la biomasse dans l'industrie chimique ou les biocarburants.

ENTREPRISES DE L'AMONT DE LA FILIERE

SEMENCES ET PROTECTION DES VEGETAUX

BASF PLANT SCIENCE est une division de BASF active en protection des végétaux et dans les biotechnologies végétales. Elle a généré 3.6 milliards d'euros chiffre d'affaires en 2009. Ses principaux produits sont des fongicides, des herbicides et des insecticides.

BADF Plant Science Biotech rassemble depuis 1998 toutes les activités de biotechnologie végétale du groupe BASF.

BASF a obtenu en 2010 l'autorisation de produire dans l'Union européenne sa variété de pomme de terre Amflora, dont l'amidon ne contient que de l'amylopectine.

BASF Plant Science collabore avec Monsanto depuis 2007 sur le développement de caractères de résistance à la sécheresse pour les semences de maïs, soja, colza, coton et blé. Un maïs devrait mis sur le marché en 2012 et les premières variétés de blé sont attendues pour 2020. BASF travaille en partenariat avec le Centro de Tecnologia Canavieira brésilien sur l'amélioration génétique de la canne à sucre et avec KWS Saat AG sur celle de la betterave.

BAYER

Bayer est un groupe chimique et pharmaceutique allemand, présent sur tous les continents, qui emploie 108 000 personnes et a réalisé un chiffre d'affaires 2009 de 31 milliards d'euros. Sa division **Bayer Crop Science** (ex Aventis Crop Science, acquise en 2002) est active en protection des plantes et comme semencier (soja, colzas hybrides, coton, riz hybrides, légumes) avec des activités importantes en biotechnologies vertes. Bayer travaille notamment sur l'amélioration de la résistance à la sécheresse.

DOW AGRO SCIENCES

Cette division du groupe chimiste Dow Chemicals a réalisé un chiffre d'affaires 2009 de 4.5 milliards de dollars et emploie 6000 salariés dont 400 en France. Elle avait été formée en 1989 par la fusion des divisions agricoles de The Dow Chemical Company et d'Elly Lily (Elanco). Elle a intégré la société semencière **Mycogen Seeds** en 1998 et plus récemment les activités de Cargill Hybrid Seeds mais aussi celles de la division agricole de Rohm and Haas.

Dow Agro Sciences et ses filiales fabriquent et commercialisent des produits de protection des plantes et des semences de maïs, tournesol, colza, soja, sorgho et luzerne.

Dow Agro Sciences valorise en partenariat avec **Pionner Hi Bred** des gènes de protéine Bt de résistance aux insectes sur maïs (technologie Herculex – événements autorisés dans les produits d'importation dans l'Union Européenne depuis début août 2010).

Dow Agro Sciences et **Monsanto** ont développé en partenariat des semences de maïs Smartstax porteurs de deux résistances aux herbicides et de plusieurs résistances aux insectes y compris celle d'Herculex.

LIMAGRAIN

Le groupe coopératif Limagrain garde pour adhérents 600 agriculteurs de Limagne. Sa filiale Groupe Limagrain Holding est actionnaire de Vilmorin et Cie qui est le 4^{ème} semencier mondial, avec des activités dans les grandes cultures (maïs, tournesol, blé, orge, colza, fourragères, etc. ; marques LG, Advanta, Nickerson, etc.) et les potagères et florales (marques Clause, Tézier, Vilmorin, etc.). La holding est également actionnaire de Limagrain Céréales Ingrédients qui produit des farines fonctionnelles.

Le groupe Limagrain a réalisé en 2009 un chiffre d'affaires de 1.2 milliard d'euros et emploie près de 6000 personnes. Il est présent sur tous les continents.

MONSANTO

Le groupe nord-américain Monsanto était historiquement un industriel de la chimie avant de se concentrer sur les semences, les biotechnologies végétales et la protection des cultures. Monsanto a réalisé en 2009 un chiffre d'affaires de 11.7 milliards de dollars, avec un peu moins de 23 000 employés.

Monsanto a créé la molécule de l'herbicide total Roundup (glyphosate) au début des années 1970. Elle est désormais dans le domaine public. Monsanto a obtenu ses premières semences génétiquement modifiées dans les années 1980. Le groupe a développé avec un grand succès des sojas et des maïs résistant au Roundup. Monsanto commercialise des semences de maïs, soja, coton et colza et s'est engagé sur le développement de variétés de blé et de canne à sucre.

Monsanto est une des cibles privilégiées des organisations "anti OGM". Le développement de l'entreprise se poursuit alors qu'il reste entièrement dépendant du succès de ses produits auprès des agriculteurs et de l'ensemble de la l'agro-industrie transformatrice. La technologie de résistance au Roundup du soja a eu un tel succès qu'elle avait fait l'objet de multiplications "pirates" dans certains pays d'Amérique du Sud sans que Monsanto en perçoive la moindre royauté.

En 2010 Monsanto commercialise pour la première fois des maïs Smartstax, porteurs de 8 événements de transformation (plusieurs résistances aux insectes, 2 résistances aux herbicides), développés en partenariat avec **Dow AgroSciences**. Différents grands semenciers exploitent sous licence les constructions génétiques de Monsanto pour leurs propres variétés, tant il est devenu indispensable sur certains marchés de proposer des semences porteuses de certains traits. Les innovations attendues des travaux de recherche en cours sur le maïs concernent la résistance à la sécheresse et une meilleure valorisation de l'azote permettant de réduire les besoins en fertilisants. Monsanto collabore avec **BASF Plant Science** sur ces thèmes.

PIONEER HI BRED - DUPONT

Pioneer Hi Bred International a été longtemps un grand semencier nord-américain indépendant, leader mondial des semences de maïs, avant son rachat par **DuPont** en 1999. Pioneer Hi Bred est actif dans le monde entier produit et commercialise des semences de maïs, soja, colza, tournesol, sorgho, blé, luzerne, riz hybride, etc.

Du Pont-Pioneer Hi Bred et **Syngenta** ont créé en 2006 une joint venture pour faciliter les valorisations dans les variétés des deux sociétés de gènes de résistance aux herbicides et aux insectes, mis au point par l'un ou l'autre des partenaires.

DuPont Agriculture & Nutrition propose aux agriculteurs une large gamme de produits de protection des plantes.

RAGT

Créée en 1919, sous forme de coopérative agricole, la RAGT est devenue en 1944 une société anonyme, restant détenue majoritairement par les agriculteurs aveyronnais fondateurs. Actif en approvisionnement agricole, la RAGT est entré dans le métier des semences en 1951, avant de devenir peu à peu un des leaders des semences de grandes cultures en Europe. Le groupe RAGT réalise 275 millions de chiffre d'affaires avec 1000 employés. Il travaille sur la sélection de 22 espèces végétales et inscrit plus de 200 variétés par an.

Depuis Janvier 2007, RAGT commercialise une technologie de formulation de granulés combustibles à base d'agro ressources (pailles, céréales déclassées, etc.) intégrant des additifs minéraux pour éviter totalement l'émission de fumées acides et la formation de mâchefer.

SYNGENTA

Le groupe suisse Syngenta est un des leaders mondiaux de la protection des végétaux et des semences. Il a été constitué en 2000 par la fusion des activités agrochimiques de Novartis et AstraZeneca. Présent dans 90 pays avec plus de 25 000 employés, il a réalisé en 2009 un chiffre d'affaires de 11 milliards de dollars. Les filiales du groupe Syngenta développent des semences de maïs, de soja, de betterave, de tournesol, de blé, de légumes et de fleurs. Syngenta est un acteur important des biotechnologies végétales avec notamment des développements sur la résistance à la sécheresse, et des maïs commercialisés qui expriment des amylases bactériennes dans leur grain ce qui permet d'améliorer fortement les rendements en éthanolierie.

Syngenta est alliée depuis 2006 avec **DuPont-Pioneer Hi Bred** pour la valorisation commune de caractères développés par les deux entreprises.

AGRO-INDUSTRIE ET PREMIERS TRANSFORMATEURS DE BIOMASSE

ADM

Archer Daniels Midland Company est un puissant groupe agroindustriel nord américain, actif notamment dans la transformation de blé, maïs, oléagineux, cacao, etc. et dans la production d'ingrédients alimentaires (lysine, thréonine, acide citrique, acide lactique, sorbitol, etc.). Il est présent dans 60 pays, exploite plus de 230 usines et emploie 28 000 personnes. Il a réalisé en 2009 un chiffre d'affaires de 69 milliards de dollars.

ADM est le premier transformateur de maïs au monde (50 000 t/jour) et le groupe triture quotidiennement 91 000 t d'oléagineux. C'est le premier producteur mondial de bioéthanol (capacités de production en croissance pour passer de 20 à 64 millions d'hectolitres) et un acteur important du biodiesel (capacités de 17 millions d'hectolitres).

ADM développe un projet de production de propylène glycol à partir d'amidon de maïs et de glycérol, coproduit du biodiesel. L'usine, en construction dans l'Illinois (Decatur) aura une capacité de production de 100 000 t de produit fini.

ADM collabore avec **Metabolix** sur le développement de productions de PHA, vendu sous la marque Mirel™ par leur joint venture commune **Telles**. A Clinton, dans l'Iowa, une usine d'une capacité de 50 000 tonnes a démarré sa production en 2010. Elle représente un investissement de 300 millions de dollars. La matière première est à ce jour du glucose.

ADM est également partenaire de **PolyOne Corporation** pour le développement de plastifiants biosourcés.

ADM collabore avec **ConocoPhillips** pour la production, par procédé thermique, de biocarburants de seconde génération directement incorporables à l'essence et au gasoil. Il a également engagé un projet visant la production par fermentation d'éthanol cellulosique.

CARGILL- NATUREWORKS

Cargill est un autre major de l'agro-industrie nord-américaine qui s'est développé initialement autour du commerce du grain. Son chiffre d'affaires 2009 a été de 117 milliards de dollars (108

sur l'exercice fiscal 2010). L'entreprise, demeurant à capital familial, est présente dans 68 pays, avec près de 160 000 employés.

Cargill est –entre autres – le premier amidonnier mondial et européen. Cargill est également un important tritrateur d'oléagineux, présent en France à Saint-Nazaire, Montoir et Brest.

Le groupe Cargill fabrique une large gamme de molécules biosourcés parmi lesquelles nous citerons ici des amidons et leurs dérivés (sorbitol, maltitol, érythritol, isosorbide), du glycérol, des biolubrifiants, des polyols pour la fabrication de polyuréthanes, etc.

La filiale à 100 % **Natureworks** a été le premier producteur de PLA (polylactic acid) et en demeure, de loin, le principal fabricant, avec une capacité de production portée récemment à 140 000 t. Le produit est vendu sous la marque Ingeo™. Natureworks a été jusqu'à la mi 2009, une copropriété 50/50 de Cargill et du japonais Teijin. En mars 2010, Cargill a été primé pour la mise au point d'une levure modifiée capable de produire de l'acide lactique dans des conditions permettant de faciliter la purification du produit (traditionnellement neutralisé sous forme de sel de calcium puis retraité). Depuis mi mars 2010, Natureworks commercialise également des lactides.

Natureworks collabore avec **Avantium** sur le développement de polyesters de furanes qui ont des propriétés voisines du PET.

Cargill collabore depuis de nombreuses années avec **Novozymes** pour la production de 3-HPA comme précurseur de l'acide acrylique. Le groupe est également partenaire de **Gevo** qui développe des technologies de production d'isobutanol.

CHAMPAGNE-CEREALES – SICLAE-- CHAMTOR- ARD – BIO AMBER - SOLIANCE

Champagne Céréales est une coopérative du Nord-est de la France qui rassemble 8600 adhérents, avec un chiffre d'affaires de 830 millions d'euros et 2,2 millions de t de collecte.

Champagne Céréales est actionnaire majoritaire de la holding **Siclaé**, une filiale commune créée en 2005 avec d'autres coopératives (dont **Nouricia**, **EMC2**, ...), qui rassemble des actifs industriels de transformation des productions végétales. Siclaé a réalisé un chiffre d'affaires de 1.5 milliard d'€ en 2008-2009. Depuis fin 2009, Siclaé est actionnaire à 100 % de l'amidonnerie-glucoiserie **Chamtor** qui traite 400 000 t de blé par an, avec un chiffre d'affaires de 136 millions d'€ en 2008-2009.

Siclae est également actionnaire à 51 % d'**ARD (Agro Industrie Recherches et Développements)**, centre de recherche dédié à la chimie du végétal et décrit ici dans les entreprises de biotechnologies.

Champagne Céréales détient 26 % de **Bletanol**, lui-même actionnaire à 45 % du producteur d'éthanol de betterave et de blé **Cristanol**, filiale également à 55 % du groupe sucrier **Cristal Union**.

COPERSUCAR SA est le premier producteur et négociant brésilien de sucre et d'éthanol. Ses actionnaires sont des producteurs de canne à sucre, regroupés en coopérative depuis 1959, qui ont créé en 2008 la holding **Produpar** qui contrôle Copersucar. Le groupe commercialisera cette année les produits issus de l'écrasement de 114 millions de tonnes de canne à sucre. Il dispose de 39 moulins associés et a traité 74 millions de tonnes en 2009-2010 (9 % de plus que lors de la campagne précédente), générant 18.7 Mt de bagasse, largement valorisées en cogénération. Cette même année, Copersucar a produit 3.7 millions de tonnes de sucre (2 % de la production mondiale) et 3.4 milliards de litres d'éthanol (34 millions d'hectolitres, soit 4 % de la production mondiale). Il a commercialisé 5.2 millions de tonnes de sucre, dont 3.7 Mt à l'export, ainsi que 39 millions d'hectolitres d'éthanol dont 6.3 Mhl à l'export. Le chiffre d'affaires 2009-2010 a été de 7.9 milliards de réales (4.3 milliards de dollars américains). En mars 2010, Copersucar aurait signé des accords avec **Guarani**, la filiale de **Tereos International**, pour commercialiser l'éthanol que celle-ci produit.

Copersucar est le partenaire de **Solvay** pour l'approvisionnement en éthanol de son unité de production de PVC biosourcé (l'éthanol sera transformé en éthylène puis en monochlorure de vinyle).

COSAN

Le groupe **Cosan** est le deuxième sucrier et éthanolier brésilien et a réalisé en 2009 un chiffre d'affaires de 6.2 milliards de réales brésiliens. Cosan a une capacité annuelle d'écrasement de 60 millions de tonnes de canne à sucre (44.2 Mt écrasées en 2009) dans 23 unités industrielles et de production de 2 milliards de litres d'éthanol (20 millions d'hectolitres). Cosan dispose de 7 unités de cogénération qui seront complétées par 5 autres dans les années à venir.

Début 2010, Cosan a signé un mémorandum pour la création avec le pétrolier **Shell** d'une joint venture ayant pour objectif la production d'éthanol, du sucre et d'énergie, ainsi que la fourniture et la distribution de carburants.

CRISTAL UNION - CRISTANOL

Le groupe Cristal Union est issu de la fusion des activités de quatre coopératives agricoles. Cristal Union a des activités de production et de commercialisation de sucre, d'éthanol, de pulpes de betterave et de luzerne déshydratées. Le groupe a réalisé en 2009-2010 un chiffre d'affaires de 1.2 milliards d'euros, avec 1500 salariés. Il a produit 850 000 t de sucre blanc, 4.6 millions d'hectolitres d'éthanol (y compris la production de Cristanol) et 159 000 t de pulpes et luzerne déshydratées. Cristal Union traite ainsi 20 à 25 % de la production betteravière française.

Cristal Union contrôle 55 % du capital de **Cristanol**, entreprise dédiée à la production d'éthanol de betteraves et de céréales dont les capacités de production sont de 3.5 millions d'hectolitres par an auxquels s'ajoutent 175 000 t de drèches et 75 000 t de pulpes. Ce sont 1 Mt de betteraves et 500 000 t de blé qui peuvent être annuellement traitées.

Cristal Union est actionnaire d'ARD à près de 18 %. Une distillerie de Cristanol et une unité de production de sucre de Cristal Union sont présentes sur le site de Pomacle-Bazancourt, ce qui facilite les synergies industrielles avec l'aval de chimie du végétal.

CRYSTALSEV était un producteur important d'éthanol et du sucre au Brésil, filiale du groupe **Santelisa Vale** qui a été racheté par le groupe français **Louis Dreyfus** fin 2009.

Crystalsev collaborait avec Amyris depuis 2008 pour la production de biodiesel à partir de canne à sucre. **Amyris** a racheté les parts de la joint venture qui avait été créée pour ce fait.

Un projet de collaboration avec **Dow** pour la production de bioéthylène à partir de bioéthanol avait été annoncé en 2007 mais était resté sans suite.

DREYFUS

Louis-Dreyfus est un groupe familial international de négoce (grains, transport maritime, énergie, immobilier, ...), employant plus de 10.000 personnes dans plus de 53 pays. Son chiffre d'affaires est estimé entre 25 et plus de 30 milliards d'euros. A l'automne 2009, la filiale brésilienne de Louis Dreyfus Commodities (21 milliards d'euros de CA), LD Commodities Bioenergia, a acquis 60 % des parts du groupe brésilien **Santelisa Vale**. La nouvelle société issue de la fusion de ces deux entités se nomme LDC-SEV et devrait réaliser 8 milliards d'euros de CA. Elle contrôle treize unités de production de sucre et de bioéthanol, pour une capacité de broyage de 40 millions de tonnes de canne à sucre. Elle produira 16 millions d'hectolitres d'éthanol par an.

Par cette reprise, LDC-SEV a récupéré les 73 % détenus par Santelisa Vale dans le brésilien Crystalsev. Ce dernier produisait plus de 2 millions de tonnes de sucre et 10 millions

d'hectolitres de litres d'éthanol par an. Avec 17 unités de production, Crystalsev transforme environ 40 millions de tonnes de canne à sucre.

POET LLC est une entreprise nord-américaine spécialisée dans la production de bioéthanol qui est devenue un acteur majeur du secteur (le groupe se décrit comme le premier producteur au monde). Poet dispose de plus de 30 unités de production d'éthanol réparties dans tout le pays. Leur matière première est aujourd'hui le grain de maïs. Le groupe travaillerait sur la production d'éthanol de deuxième génération avec pour ambition de valoriser l'ensemble de la plante de maïs.

ROQUETTE FRERES

Roquette est un groupe familial dont le métier de base est l'amidonnerie. Avec, une production d'environ 2.3 millions de tonnes de produits amylicés et leurs dérivés, il est le 2^{ème} européen dans cette activité derrière Cargill et fait partie du groupe des quatre plus grands mondiaux.

Roquette est le premier producteur au monde de polyols (sorbitol, mannitol, maltitol). L'entreprise fabrique plus de 650 produits à partir de 6 millions de tonnes de maïs, blé, pois et pomme de terre, valorisant ainsi 500 000 hectares de cultures. Le chiffre d'affaires a été de 2.5 milliards d'euros en 2008 pour 6000 employés. Les 18 usines du groupe se répartissent entre l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Asie. Lestrem, dans le Nord de la France est le site historique du groupe. On y retrouve son siège social et la plus importante bioraffinerie de céréales européenne.

Roquette met en œuvre un budget de R&D d'environ 50 millions d'euros par an. Engagée dans de nombreux partenariats, l'entreprise a développé d'ambitieux programmes de chimie végétale et plus particulièrement le programme **Biohub**[®] soutenu par les pouvoirs publics français.

Roquette produit de l'isosorbide et développe des productions de ses dérivés (diesters d'isosorbide, diméthylisosorbide, polymères d'isosorbide). En collaboration avec le chimiste **DSM**, Roquette a initié une production industrielle d'acide succinique. Le groupe est également bien avancé dans des projets de production par fermentation de L-méthionine et d'acide glycolique (en valorisant en exclusivité des souches microbiennes de **Metabolic Explorer**).

SOFIPROTEOL (SAIPOL – LESIEUR – GLON SANDERS – DIESTER INDUSTRIE – NOVANCE – OLEON)

Sofiproteol est l'organisme financier et industriel de la filière oléagineuse et protéagineuse française. Avec un chiffre d'affaires de 5.5 milliards d'euros et 6000 collaborateurs, Sofiproteol développe ses activités autour de quatre piliers principaux :

- La production d'huiles alimentaires (trituration des graines oléagineuses par sa filiale **Saipol**, valorisation des huiles par sa filiale **Lesieur** dont le chiffre d'affaires avoisine 800 millions d'euros).
- La nutrition animale (≈ 1.5 milliard d'euros de CA), les tourteaux de colza et de tournesol produits par Saipol, sont valorisés par tout le secteur de l'alimentation du bétail français et notamment par le leader du marché qu'est la filiale **Glon-Sanders** du groupe.
- Le biodiesel, au travers de Diester Industrie, leader européen du biodiesel (1.5 à 2 milliards d'euros de CA).
- La chimie des dérivés des huiles (≈ 450 millions d'euros de CA) avec **Novance**, positionnée dans les spécialités et **Oléon** (ex Fina Oleochemicals) en Belgique, actif dans les commodités. Sofiproteol affiche comme ambition de renforcer ce pôle chimie.

Le groupe Sofiproteol est devenu un des premiers producteurs mondiaux de glycérol, sur un marché encore atomisé. Il soutient différents travaux de recherche et développement tant sur les dérivés de cette molécule que sur ceux des acides gras.

SOUFFLET

Le groupe français Soufflet est un acteur agro-industriel européen majeur des filières orge et blé. Avec un chiffre d'affaires de 3 milliards d'euros (2008-2009) dont la moitié réalisé à l'export ou hors de France, le groupe Soufflet emploie plus de 3600 personnes.

Soufflet avait intégré en 2003 l'entreprise Lyven, spécialiste de la fermentation en milieu solide. Dans le cadre du programme Osiris, Soufflet développe cette technologie pour la production de substrats enrichis, valorisables en alimentation animale et des applications de productions de molécules biosourcés.

TATE & LYLE

Tate & Lyle est un amidonnier britannique qui a réalisé un chiffre d'affaires 2009-2010 de 3.5 milliards de livres sterling, avec 5700 salariés. Le groupe est présent en Europe, sur le continent américain et en Asie. Il produit des amidons, de l'éthanol, des édulcorants (notamment du sucralose) de l'acide citrique, etc.

Tate & Lyle a cédé fin juin 2010, ses activités de raffinerie et ses marques de sucre au premier sucrier américain, **American Sugar Refining (ASR)**. Il devrait dans les mois à venir se séparer du reste de sa division sucrière pour se concentrer sur les dérivés de l'amidonnerie.

Tate & Lyle et **DuPont** avaient constitué une joint venture **DuPont Tate & Lyle Bio Products** qui produit du 1,3 propanediol à partir de glucose selon des procédés de fermentation développés avec **Genencor**. Le 1,3 PDO est utilisé par DuPont pour la fabrication de PTT.

TEMBEC

Le groupe canadien Tembec Inc. est un producteur de "produits forestiers", présent au Canada, aux USA et en France. Tembec conserve dans notre pays l'usine de Tartas, dans le département des Landes, qui utilise le procédé bisulfite pour produire 150 000 t de pâte de cellulose de qualité destinées à la transformation en éthers cellulosiques (75 %) mais aussi en nitrocellulose (25 %). Tembec est actif dans la recherche sur la chimie de la cellulose et de ses dérivés.

Tembec a cédé en 2010 ses deux autres sites français (Saint Gaudens et Tarascon) à **Paper Excellence B.V.**, entreprise domiciliée au Pays Bas mais détenue par le groupe indonésien **Asia Pulp and Paper**.

TEREOS – SYRAL - GUARANI

Le groupe coopératif français Tereos est un acteur majeur de la production de sucre, d'amidon et de bioéthanol, avec 33 sites industriels en Europe, au Brésil et dans l'océan Indien. Tereos a réalisé en 2008-2009 un chiffre d'affaires de 3.4 milliards d'euros avec 13 500 employés. Tereos est le 1^{er} transformateur de betteraves et le 3^{ème} producteur d'amidon et de glucose en Europe, ainsi que le 4^{ème} producteur de sucre et d'éthanol au Brésil. Le groupe transforme près de 4 millions de tonnes de céréales, essentiellement en France et Tereos France a traité 15.5 millions de tonnes de betteraves sur son dernier exercice. Au total, Tereos produit 7.6 M t d'équivalent sucre à partir de betterave, de céréales et de canne.

Depuis fin mars 2010, la filiale **Tereos International** regroupe les activités du groupe dans l'agroalimentaire et dans les bioénergies.

Le 30 avril 2010, Tereos International et le groupe pétrolier **Petrobras** on signé un accord permettant de à ce dernier de devenir actionnaire à 45.7 % de **Guarani**, la filiale brésilienne de

Tereos, productrice de sucre et d'éthanol. Guarani devrait devenir le 3^{ème} producteur de sucre et d'éthanol brésilien, après le rachat annoncé début juin 2010 de l'usine de Mandu, dans l'état de Sao Paulo.

Avec une production de 1.5 millions de tonnes de produits amylacées, la filiale **Syral** de Tereos International est le 3^{ème} amidonnier européen, derrière Cargill et Roquette.

Tereos collabore avec **Amyris** au Brésil pour la production de biocarburant diesel à partir de mélasses de canne. En France, le groupe a noué un partenariat avec **Deinove** pour explorer le potentiel des bactéries déinocoques dans l'amélioration de la production d'éthanol de blé, en valorisant notamment la fraction fibreuse des sons, ouvrant la voie à l'éthanol lignocellulosique de 2^{ème} génération. Tereos participe également aux projets français sur les biocarburants de seconde génération Futurol et Biocore.

UNIGRAINS

Unigrains est l'organisme financier de la filière céréalière française. Il investit à ce titre en actionnaire minoritaire dans des entreprises de l'agroalimentaire et de l'agro-industrie mais aussi des biotechnologies valorisant les produits de cette filière ou contribuant à la structurer. Ses encours auprès des entreprises étaient de 378 millions d'euros fin 2007. Unigrains est attentif au développement de la chimie du végétal et accompagne plusieurs entreprises innovantes du secteur.

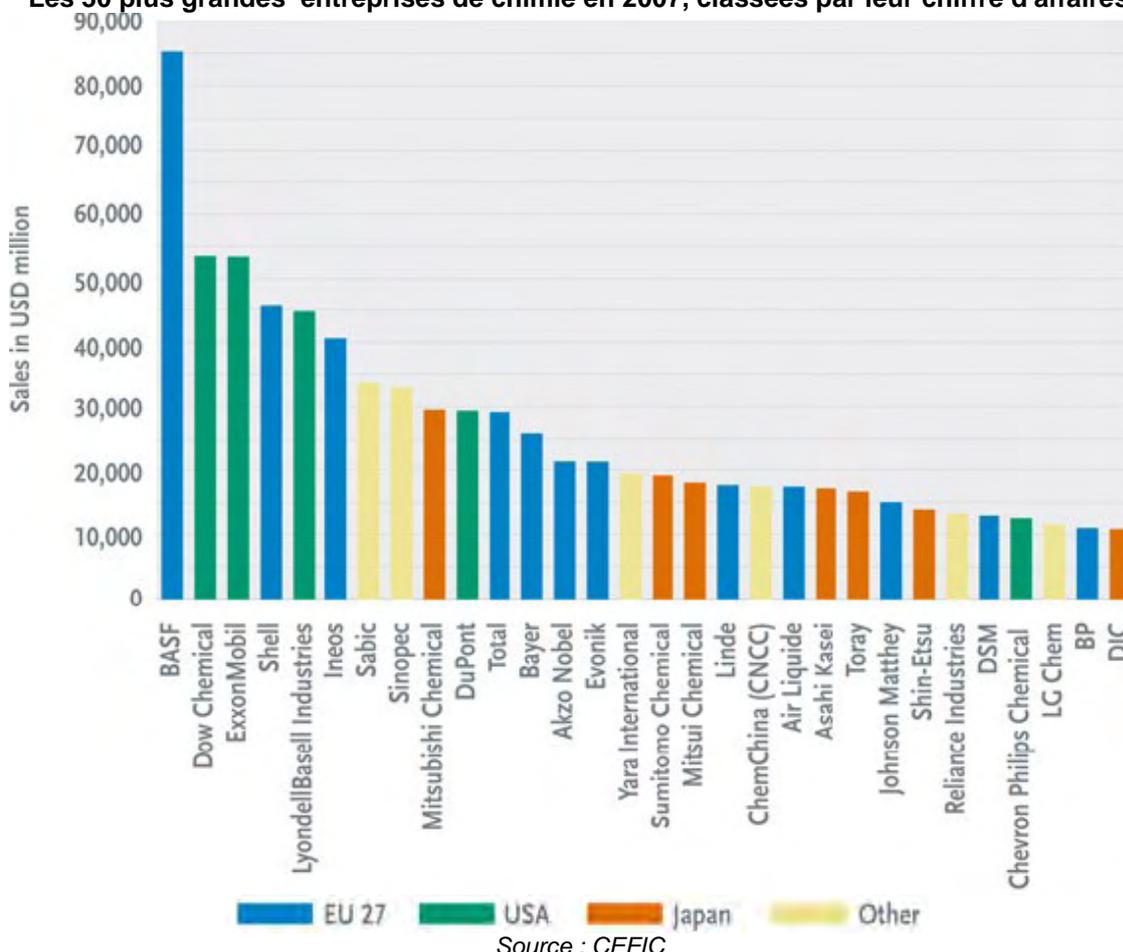
UPM est une entreprise finlandaise, parmi les leaders mondiaux du secteur du papetier. En 2009, UPM a réalisé 7.7 milliards d'euros de chiffre d'affaires avec 23 000 employés. Le groupe comporte 3 divisions : (1) papier (70 % de l'activité), (2) énergie et pâtes à papier (UPM est le 2^{ème} fournisseur d'énergie en Finlande ou il est notamment associé au projet d'EPR en Finlande) et (3) matériaux techniques. UPM fabrique des pâtes en Finlande mais aussi en Uruguay (à partir d'Eucalyptus). Ses capacités propres de production sont de 3.2 Mt. Ses productions de papier sont réparties en Europe, aux USA et en Chine.

A proximité de Chicago, au Gas Technology Institute, UPM réalise des travaux pilotes de production de biocarburants de seconde génération par gazéification suivie de Fischer Tropsch, L'entreprise étudie actuellement la possibilité de mettre en œuvre la technologie sur son site français de Stracel (proximité de Strasbourg) qui comporte une unité de fabrication de pâte chimique arrêtée en 1997.

INDUSTRIE CHIMIQUE ET PETROLIERE

Un récapitulatif "d'avant la crise" du classement mondial des entreprises de chimie est présenté dans le graphique ci-dessous. Nous retrouverons certains de ces groupes dans les descriptifs résumés qui vont suivre.

Les 30 plus grandes entreprises de chimie en 2007, classées par leur chiffre d'affaires



AIR LIQUIDE - SEPPIC

Air Liquide est leader mondial des gaz pour l'industrie, la santé et l'environnement qui emploie 42 000 personnes dans 75 pays. Il a réalisé un chiffre d'affaires de 12 milliards d'€ en 2009.

Air Liquide interviendra dans la transformation du gaz de synthèse issu de biomasse pour la production biocarburants de seconde génération dans le projet mené par le **CEA** (Commissariat à l'Énergie Atomique) à Bure-Saudron avec le groupe **CNIM** (Constructions Industrielles de la Méditerranée).

Seppic (Société d'Exploitation de Produits pour les Industries Chimiques) est une division d'Air Liquide santé qui rassemble 600 personnes et dispose de 4 sites industriels. C'est historiquement un spécialiste des tensio-actifs qui fabrique des produits à haute valeur ajoutée destinés aux marchés de la santé, de la cosmétique, de l'agro-alimentaire etc. 60 % des matières premières de Seppic sont d'origine végétale (esters d'acides gras, glycérol, alcools gras ethoxylés, glucose, sorbitol, etc.). Seppic produit notamment des excipients polymériques pour la cosmétique, des esters de sorbitan, etc.

AKZO NOBEL

Ce groupe néerlandais emploie 57 000 personnes et a réalisé un chiffre d'affaires de près de 14 milliards d'euros en 2009. Akzo Nobel divise ses activités en peintures, revêtements-vernis et chimie de spécialités. Akzo Nobel est la maison mère de l'amidonnier **National Starch**.

ARIZONA CHEMICALS

Cette entreprise nord-américaine raffine du tall oil aux Etats-Unis et en Scandinavie et propose au marché l'importante gamme de ses dérivés. Elle réalise 1 milliard de \$ USD de chiffre d'affaires, avec 1000 employés.

ARKEMA

Arkema (anciennement Atochem) a été créé en 2004 par le groupe **Total**. L'entreprise est présente dans 40 pays et a réalisé en 2009 un chiffre d'affaires de 4.4 milliards d'euros, avec 13 800 employés. Elle dispose de 80 sites industriels. Arkema est organisé en 3 pôles d'activités, les Produits Vinyliques, la Chimie Industrielle (acrylates, polymères acryliques, PMMA, etc.) et les Produits de Performance (polymères techniques, produits de spécialités de la filiale CECA, ingrédients fonctionnels).

Arkema utilise de l'huile de ricin pour produire du polyamide 11 et de l'acide sébacique. L'huile de ricin est importée de pays producteurs comme l'Inde, la Chine, le Brésil. Dans les années 1980, la filière oléoprotéagineuse française avait initié un programme de développement de la culture de ricin en France sans susciter l'intérêt de ce qui était alors Atochem. Le polyamide 11 est commercialisé sous la marque Rilsan® et est également utilisé pour la production du Pebax® (polyéther block amide). La filiale CECA d'Arkema valorise des matières premières végétales notamment dans la production d'additifs de bitumes.

Arkema développe un projet de production d'acide acrylique à partir de glycérol sur son site de Carling, en Moselle, avec des partenaires universitaires régionaux.

Arkema est membre de l'association **Fimalin** qui réunit les acteurs de toute la filière Lin en Normandie pour participer au développement de compound de polymères intégrant des fibres de lin (avec du PVC mais aussi du Rilsan).

AVANTIUM

Basée à Amsterdam, Avantium a été créée en 2000 par un consortium d'entreprises (**Royal Dutch Shell, Eastman Chemical, Akzo-Nobel et Pfizer**) pour réaliser des prestations de recherche et développement. Avantium dispose d'un savoir faire particulier en catalyse chimique qui lui permet de travailler pour des entreprises pétrolières comme **Shell, Sasol, BP, Petrobras, Celanese** mais aussi l'IFP.

En 2005, Avantium a initié des travaux portant sur la conversion de biomasse en intermédiaires chimiques et carburants. Avantium a focalisé ses efforts sur les furanes et mis au point une technologie de conversion catalytique compétitive de différents sucres en furanes (hydroxyméthylfurfural). La technologie a été nommée YXY.

Avantium collabore avec **Natureworks (groupe Cargill)** sur le développement de polyesters YXY qui ont des propriétés voisines du PET.

Avantium recherche d'autres partenaires pour développer d'autres applications de sa technologie dans les polyamides, les polyuréthanes et les carburants (éthoxyméthylfurfural = EMF).

Avantium construit une unité pilote en 2010.

BASF

L'allemand BASF est le plus grand chimiste mondial. Il a réalisé en 2009 un chiffre d'affaires de 50,7 milliards d'euros (62.3 milliards d'euros en 2008). BASF est présent sur les 5 continents avec 105 000 salariés. Le groupe divise son activité en 6 segments : les produits chimiques (inorganiques et dérivés du pétrole), les plastiques (incluant les grands polymères classiques mais aussi des plastiques biodégradables à base d'amidon), les produits de performance, les produits chimiques fonctionnels, les produits pour l'agriculture, le pétrole et le gaz. Sa gamme de produits est particulièrement diversifiée.

En matière d'innovation, BASF concentre ses efforts sur cinq axes : la gestion de l'énergie, les nouvelles matières premières, les nanotechnologies, les biotechnologies végétales et les biotechnologies blanches.

La filiale BASF Plant Science, créée en 1998, active dans la protection des plantes et les biotechnologies végétales, a été décrite plus haut.

BASF maîtrise, met en œuvre et développe des technologies de biocatalyse et de fermentation. Le groupe commercialise ainsi des enzymes (phytase) ou des produits obtenus par mise en œuvre de biotechnologies blanches (historiquement la vitamine B12).

En 2009, BASF a intégré les activités de **Ciba** qui ont été principalement regroupées dans la division des produits de performance.

Fin juin 2010, BASF a racheté **Cognis** pour 3.1 milliards d'euros. A travers cette acquisition, BASF devient numéro un mondial des spécialités chimiques destinées aux industriels de la cosmétique, alors qu'il occupait la 3^{ème} place du classement. Il reste le leader absolu dans les détergents et passe de la 6^{ème} à la 3^{ème} place dans les aditifs pour l'industrie alimentaire.

BRASKEM

Pétrochimiste brésilien, Braskem connaît un fort développement, par croissance externe et interne, avec l'ambition affichée de devenir un des premiers acteurs mondiaux. Son chiffre d'affaires 2009 a été de 19.5 milliards de réales (10 milliards de dollars). Dès maintenant, Braskem est le n°8 mondial de la famille de produits PE, PP et PVC et le n°3 du continent américain.

Braskem construit depuis avril 2009 une unité de production de 200 000 tonnes de polyéthylène issu d'éthanol de canne à sucre qui devrait être opérationnelle au deuxième semestre 2010 et qui représente un investissement de 500 millions de réales. Elle consommera 330 000 t d'éthanol par an. Braskem travaille sur des projets de fabrication de polypropylène et d'EDPM (éthylène-propylène-diène monomère). Braskem considérerait il y a quelques mois que la demande mondiale de polyéthylène biosourcé était de 600 000 tonnes, avec des possibilités de premium substantiel sur le prix.

Braskem est partenaire de **Toyota Tsuho** pour la commercialisation de son polyéthylène biosourcé en Asie.

Braskem a signé en 2009 un accord de partenariat avec **Novozymes** pour développer la production de polypropylène biosourcé à partir de sucre de canne. Ce projet aura une durée minimale de 5 ans.

Braskem étudierait avec la start up nord américaine **Genomatica** la possibilité de produire des bioplastiques à partir de sucre de canne (Genomatica dispose de technologies pour produire du butanediol à partir de sucre).

CRODA – UNIQEMA

Croda est un producteur anglais de spécialités chimiques actif dans 35 pays et employant 3500 salariés. Croda a réalisé en 2009 un chiffre d'affaires de 916 millions de livres sterling.

Croda et sa filiale **Uniqema** sont actifs dans l'oléochimie et fabrique notamment différents produits à base de dimères d'acides gras en C36 (copolyesters, polyuréthanes, résines époxy).

DRT "Dérivés Résiniques et Terpéniques" :

DRT est un groupe français à capital familial qui constitue le seul raffineur français de coproduits de la pâte à papier et de produits du gemmage de résineux.

Le groupe DRT réalise 220 millions d'euros de chiffre d'affaires dont 75 % à l'export, avec 1200 employés dont 700 en France. Ses sites industriels sont en France (Castets, Vielle Saint Girons et Lespéron, dans le département des Landes), en Inde (Roha) et en Chine (Wuxi). Sa gamme comporte plus de 250 produits. DRT consomme 120 à 130 000 tonnes de matières premières par an d'origine française (coproduits de la fabrication de pâte à papier) ou importée (produits du gemmage, coproduits de pâte à papier). DRT distille 35 000 t d'essence de papeterie et 5000 t d'essence de gomme. L'entreprise a développé une plateforme forestière à Madagascar qui l'alimente en essences et produits de gemmage de pins.

DOW CHEMICAL COMPANY

Le nord-américain Dow est un des premiers groupes chimiques mondiaux, producteur de spécialités et de commodités. Il a réalisé en 2009 un chiffre d'affaires de 45 milliards de dollars (67 en 2008) avec 52 000 employés et 214 sites de production dans 37 pays. Dow avait acquis **Rohm and Haas** en 2009.

Dow est actif sur 8 segments de marché (électronique et matériaux de spécialités ; revêtements et bâtiment ; santé et agriculture ; produits de performance ; matières plastiques de base ; produits chimiques de base ; hydrocarbures et énergie)

Dow avait communiqué sur différents projets de production de molécules biosourcés en 2007 (propylène glycol à partir de glycérol, aux USA, éthylène à partir de bioéthanol, au Brésil) mais la crise actuelle semble les avoir stoppé ou du moins retardé ces projets.

Parmi les produits de performance de Dow, on retrouve des résines époxy. Des communiqués avaient indiqué en 2007 l'intention du groupe de produire de l'épichlorhydrine biosourcé à partir de glycérol. Des projets de développement en Chine d'une unité industrielle ont été annoncés en 2009.

Dow AgroSciences, décrite précédemment, rassemble les activités de semences et de protection des cultures du groupe et a généré un chiffre d'affaires de 4.5 milliards de dollars en 2009.

DSM

L'entreprise néerlandaise DSM (acronyme De Nederlandse Staatsmijnen = Dutch State Mines) a créée en 1902 et fut initialement active dans l'exploitation du charbon. C'est aujourd'hui un groupe chimique international, diversifié autour de cinq pôles d'activités : la Nutrition, les produits pharmaceutiques, les matériaux de performance (polyamides, polyesters, polycarbonates, résines adhésives), les intermédiaires pour polymères (caprolactame et acrylonitrile), les produits chimiques et matériaux de base. Dès 1998, DSM avait acquis **Gist-Brocades** (enzymes et levures), se positionnant ainsi sur les biotechnologies. DSM se présente comme maîtrisant toute la part de la chaîne de valeur depuis le prétraitement et la conversion de la biomasse, jusqu'aux dérivés chimiques et à leurs applications.

DSM produit de l'acide succinique par voie chimique en Autriche. Le groupe est partenaire de **Roquette** pour le développement de production d'acide succinique biosourcé par fermentation.

DSM est actif dans le développement de biocarburants de seconde génération et participe à des projets européens et nord-américains sur ce thème, en travaillant plus particulièrement sur

l'obtention de souches de levures utilisables dans des bioraffineries valorisant des pailles de blé et d'autres matières lignocellulosiques.

DSM a lancé en 2009 un polyamide majoritairement constitué de dérivés d'huile de ricin (EcoPaxx™).

DUPONT

DuPont est un groupe nord-américain diversifié avec 5 activités : électroniques et technologies de communication, matériaux de performance, enduits et technologies de couleur, sûreté et protection, agriculture et nutrition (incluant semences et protection des plantes citées plus haut). DuPont est ainsi une des rares entreprises mondiales active depuis l'amont de l'agriculture (maîtrise de la sélection variétale et des biotechnologies vertes) jusqu'à la chimie de commodités et de spécialité (incluant la production de matériaux biosourcés et la maîtrise des biotechnologies blanches). DuPont emploie 60 000 personnes et a réalisé un chiffre d'affaires de 26 milliards de dollars en 2009.

L'activité Matériaux de performance (Performance materials) rassemble les métiers de production et commercialisation de polymères parmi lesquels on retrouve les produits à base de PTT issu de 1,3 propanediol biosourcé (commercialisés sous les marques Sonora® et Biomax®). DuPont avait collaboré avec **Genencor** pour développer la technologie de fabrication de 1,3 PDO biosourcé à partir de glucose. C'est la joint venture avec l'amidonnier **Tate & Lyle**, **DuPont Tate & Lyle Bio Products** qui en assure la production. La gamme de produits biosourcés de DuPont comprend également les polyols Cerenol™ (issus de PDO) et les élastomères thermoplastiques Hytrel® RS.

DuPont et **BP** ont créé la joint venture **Butamax™ Advanced Biofuels LLC** pour développer la fabrication de butanol carburant, en visant un coût similaire à celui de l'éthanol. L'unité pilote est construite en Angleterre et devrait être opérationnelle dès 2010. L'objectif est de réaliser des productions commerciales en 2013.

DuPont a créé avec **Danisco (Genencor)** une joint venture 50/50 "**DuPont Danisco Cellulosic Ethanol LLC**" pour développer des technologies intégrées de production de bioéthanol de seconde génération.

FORCHEM

La société indépendante finlandaise Forchem est un des quelques raffineurs de tall oil, concurrent de **DRT** et d'**Arizona Chemicals**.

HUNTSMAN est un groupe chimique nord-américain qui a réalisé un chiffre d'affaires de 7.8 milliards de dollars en 2009 (10.2 en 2008).

Les activités de Huntsman sont regroupées en 5 segments : Polyuréthanes, Matériaux avancés, Produits pour le textile, Produits de performance et Pigments. Huntsman produit du carbonate de glycérol. En mars 2009, Huntsman a annoncé le lancement de carbonate de glycérol biosourcé, coproduit du biodiesel. Le groupe est un important producteur de propylène glycol et avait annoncé en 2007, un projet de production de cette molécule à partir de glycérol végétal qui semble à ce jour rester encore sans suite.

LANXESS est une entreprise allemande de la chimie des spécialités, leader mondial du caoutchouc synthétique, ayant réalisé un chiffre d'affaires 2009 de 5 milliards d'euros,

Lanxess est entré mi 2010 au capital de l'entreprise de l'entreprise américaine **Gevo** qui développe une technologie de production de butanol et d'isobutanol par fermentation dont peut dériver l'isobutène (= isobutylène), monomère du caoutchouc synthétique polyisobutène (PIB).

M&G – MOSSI & GHISOLFI

M&G est une entreprise italienne familiale, leader mondial de la fabrication de PET (polyéthylène téréphtalate) pour ses applications dans les emballages. M&G a des capacités de production de 1.7 millions de tonnes de PET et avait réalisé en 2007 un chiffre d'affaires de 2.5 milliards de \$ US. Le groupe est actif en Italie, au Brésil, au Mexique et aux USA.

Depuis 2005, M&G s'est engagé dans des activités de R&D sur le bioéthanol et mène un projet nommé Pro.E.SA sur les biocarburants de seconde génération.

M&G a initié une collaboration avec **Amyris** dont le farnesène pourrait devenir un ingrédient de fabrication du PET. M&G et Amyris ont l'intention de collaborer autour du projet Pro.E.SA de biocarburants développé par M&G.

PETROBRAS

Petro bras est la compagnie pétrolière brésilienne, l'Etat brésilien étant majoritaire à son capital. Le groupe emploie près de 77 000 salariés et a réalisé en 2009 un chiffre d'affaires de 92 milliards de dollars.

Petrobras affiche pour ambition de devenir un producteur majeur de biodiesel (la loi brésilienne impose une teneur de 5 % dans les carburants diesel) et de participer activement au développement de la filière éthanol brésilienne. Fin avril 2010, Petrobras et **Terres International** ont annoncé leur partenariat qui impliquera notamment la prise de participation progressive de 45.7 % de Petro bras dans le capital de **Accra Guarani S.A.**, filiale de Terres. Cette alliance permettra à Petro bras de sécuriser ses approvisionnements en bioéthanol.

RHODIA

Le groupe français Rhodia est présent en Europe, Asie, Amérique du Nord et Amérique latine. Il a réalisé un chiffre d'affaires de 4 milliards d'euros en 2009, avec 13 600 employés. Rhodia est organisé en 6 métiers : "Polyamide" (polyamide 6.6 et ses dérivés en plastiques techniques) ; "Nove care" (tensioactifs et polymères de spécialité ; gaur et dérivés ; chimie du phosphore) ; "Siclé" (Silices haute performance, terres rares, diphénols pour vanilline) ; "Acétol" : acétates de cellulose, "Energie services" (crédits d'émission de CO₂) et "Eco services".

Rhodia consomme des matières premières végétales issues de différentes filières : celluloses purifiées de pin, d'eucalyptus et d'épicéa pour produire des acétates de cellulose ; acides gras et glycérol de coco, palme, soja, colza, arachide, ricin pour produire des tensioactifs, des solvants mais aussi des polymères techniques.

Parmi les produits biosourcés de Rhodia, on peut citer le PA 6 10 Tchany® extenso, lancé en 2009, dont l'acide sébacique est obtenu à partir d'huile de ricin ; la vanilline, obtenue à partir d'acide férulique issu d'enveloppes de riz ; des tensioactifs fabriqués à partir de sorbitol et de sorbitan ; le solvant vert à propriétés particulières Augeo™ (cétal de glycérol) obtenu à partir de glycérol ; le Rhodapex® ESB-70 Nat, un tensioactif à base d'oxyde d'éthylène issu de canne à sucre et d'alcool laurique de palme, etc.

SOLVAY

Solvay est un groupe international chimiste belge, à capital familial dont le chiffre d'affaires 2009 a été de 8.5 milliards d'euros, avec 28 000 employés. Le groupe a deux pôles d'activités : la chimie et les matières plastiques (polymères spéciaux et vinyliques). Solvay est implanté dans 50 pays, avec des unités industrielles en Europe, Brésil, Corée, Chine, Inde, Russie, USA, Thaïlande, etc.

Solvay est le 4^{ème} producteur mondial d'épichlorhydrine derrière **Dow**, **Hexion** et **Bohai**.

Solvay est très soucieux de développement durable et a deux projets majeurs engagés et annoncés en ce qui concerne la chimie du végétal :

- **La production d'épichlorhydrine à partir de glycérol**, en France (Site de Tavaux, capacité de 10 000 tonnes, opérationnelle) mais surtout dans une usine en construction en Thaïlande (capacité de 100 000 t, opérationnelle en 2012 ; la source sera du glycérol de palme, validé pour sa production durable) La technologie "Epicerol®" fait l'objet de nombreux brevets et permet une réduction très forte des résidus chlorés. Solvay sert le marché libre de l'épichlorhydrine des industriels n'intégrant pas cette production dans leur chaîne. Solvay équilibrera ainsi ses productions d'épichlorhydrine entre celles à base de propylène (son site allemand et une partie de sa production française et celles issues de glycérol (site thaïlandais et une partie de sa production française).

La technologie Epicerol® permet de réduire sensiblement les impacts sur l'environnement de la production d'épichlorhydrine.

- **La fabrication de PVC à partir d'éthylène obtenu par déshydratation de l'éthanol de canne au à sucre dans une unité intégrée brésilienne** (Solvay Indupa) à Santo André. La capacité de production de bioéthylène sera de 60 000 tonnes an, qui permet de produire 130 000 t de monomère de chlorure de vinyle. Ce sera donc un tiers de la production du site de 360 Kt qui deviendra biosourcé. Ce sera le brésilien **Copersucar** qui approvisionnera Solvay en éthanol.

Solvay participe au français BioHub.

TOTAL et TOTAL PETROCHEMICALS

Le groupe français pétrolier **Total** emploie 96 000 salariés dans 130 pays et a réalisé en 2009 un chiffre d'affaires de 131 milliards d'euros.

Total s'est impliqué dans le développement des biocarburants de première génération en produisant à partir de bioéthanol de l'ETBE, compatible avec l'essence et en intégrant à ses carburant diesel des esters méthyliques d'acides gras issus de la filière oléagineuse. Total s'intéresse aux carburants de seconde génération, comme en témoigne sa participation à deux projets français, l'un par voie biochimique (Futurol) et l'autre par voie thermochimique (BioTfuel). En 2009, Total a pris des participations dans les entreprises nord américaines **Gevo** (conversion de sucres en butanol et isobutanol) et **Coskata** (production de bioéthanol à parti de gaz de synthèse issu du traitement thermique de la biomasse). Total est également partie prenante du projet Bio-DME initié en 2008 en Suède avec le soutien de l'Union Européenne pour la production et l'expérimentation sur camions de DME produit à partir de liqueurs noires de papeterie. Le groupe Total s'intéresse par ailleurs au potentiel des microalgues.

Fin juin 2010, Total a pris une participation de 17 % du capital de l'entreprise nord américaine **Amyris Biotechnologies** (production de carburants terpéniques à partir de sucre), pour un montant de 133 millions de dollars.

"Le Groupe a choisi de construire activement sa compétence dans le domaine des biotechnologies, via des partenariats avec des laboratoires académiques ou des start-up". C'est la direction de la Recherche et Développement de la branche "Gaz et énergies nouvelles" qui met en œuvre les activités correspondantes.

La filiale **Total Petrochemicals** a créé en 2007 la joint-venture **Futerro** avec l'entreprise belge **Galactic** pour la production de PLA à partir de sucre.

TRANSFURAN CHEMICALS est une entreprise belge spécialisée dans la production de furfural et de ses dérivés à partir des hémicelluloses de déchets lignocellulosiques.

ENTREPRISES DE BIOTECHNOLOGIES

La liste présentée des sociétés de biotechnologies est largement incomplète car de nombreuses start up ont vu le jour ces dernières années et viennent concurrencer les entreprises actives dans le secteur de façon plus ancienne. Des positionnements différents sont observés, certaines sociétés restant dédiées à la recherche et d'autres se destinant à produire les biomolécules ou biocarburants dont elles ont développées la technologie de fabrication.

AMYRIS

Amyris Biotechnologies Inc. est une entreprise nord-américaine, créée en 2003, qui développe des technologies de production par fermentation - à partir de sucres - de molécules terpéniques (farnesène, tétraméthylcyclohexane, etc.) susceptibles d'être incorporées directement dans le gasoil, l'essence ou le kérosène. Amyris avait mis au point son savoir faire en construisant des souches capables de produire, l'Artémisinine, une molécule pharmaceutique terpénique permettant de lutter contre la malaria. Amyris s'est ensuite dotée de compétences fortes dans le domaine de la chimie des carburants.

Amyris Brasil, la filiale brésilienne du groupe a noué plusieurs partenariats fin 2009 avec d'importants producteurs de sucre et de bioéthanol actif dans le pays : le groupe international **Bunge**, **Cosan**, et la filiale brésilienne du groupe coopératif français **Tereos**, **Açúcar Guarani**. L'objectif est de valoriser les technologies d'Amyris pour produire des biocarburants et d'autres molécules à partir de sucre de canne. C'est Amyris qui commercialisera les produits obtenus. Amyris produira du biodiesel à parti des mélasses d'**Açúcar Guarani**.

Le même mois, Amyris a annoncé la formation d'une joint venture **SMA Indústria Química S.A** avec un autre producteur de sucre et d'éthanol brésilien, le groupe **São Martinho**. L'accord a été révisé en avril 2010 mais c'est bien sur l'un des sites de ce partenaire, qu'Amyris construira une première unité de production de farnesène, d'une capacité de 100 000 litres annuelles et qui devrait être opérationnelle en 2010.

Depuis fin 2009, Amyris disposait également d'un soutien de 25 millions de dollars du ministère de l'énergie des USA pour le développement de la production de biodiesel à partir de sorgho sucré.

Amyris mène en Australie des collaborations sur la production de carburants pour avion

Fin juin 2010, les annonces se sont multipliées à propos d'Amyris. Le groupe pétrolier français **Total** a pris une participation de 17 % de son capital pour un montant de 133 millions de \$ US. Amyris a signé également un accord avec **Soliance (filiale d'ARD)** qui commence à développer des molécules cosmétiques en utilisant la technologie d'Amyris. L'entreprise a également signé le même mois un partenariat avec **M&G Finanziara** (introduction du farnesène comme ingrédient des PET), un autre avec **Procter & Gamble** (sur le développement de produits chimiques de spécialités) et un dernier avec **Shell** (fourniture au pétrolier de carburant diesel à base de farnesène). Fin juillet 2010, Amyris Brasil a annoncé initier 6 mois de tests de son carburant diesel renouvelable sur une flotte captive de véhicules avec **SPtrans** (le système de transport de la ville de São Paulo, **Mercedes-Benz**, **Petrobras** et l'entreprise de transport **Viação Santa Brígida**).

ARBOR FUEL Inc. est une société de biotechnologie nord-américaine, positionnée sur le développement de biocarburants de seconde génération par fermentation. Arbor fuel disposerait de souches de levures permettant la production de butanol et d'éthanol, à partir de sucres en C6 et C5 mais aussi de souches en développement pouvant métaboliser directement la cellulose et l'hémicellulose.

ARD (Agro Industrie Recherches et Développements)

ARD est une structure de recherche dont le capital est détenu par **Sicla** (43 %), **Cristal Union** (18 %), **Chamito** (8 %), la Caisse Régionale du Crédit Agricole du Nord Est et des coopératives luzernières. Positionnée sur le site de la bioraffinerie de Comacle-Betancourt, ARD a été créée en 1989 pour développer de nouvelles valorisations aux agro ressources de ses actionnaires (céréales, betterave, luzerne...). ARD dispose de compétences en biotechnologies blanches (positionnement comme une plateforme de référence), chimie verte (biocarburants, solvants, tensio-actifs) et sur les agri matériaux.

La filiale **Soliance** d'ARD est spécialiste des ingrédients pour la cosmétique et produit notamment du **DHA**. Soliance réalise un chiffre d'affaires annuel de 15 millions d'euros. Soliance a signé en juin 2010 un accord avec la société nord-américaine **Amyris** pour valoriser ses technologies de production de molécules terpéniques dans ses gammes de produits.

Avec **DNP Green Biologics**, ARD a formé une joint venture nommée **Bio Amber** dont l'unité de démonstration industrielle **Biodémo** produit ses premiers lots d'acide succinique sur le site de Pomacle-Bazancourt. L'unité a une capacité de 2000 tonnes. ARD et Soliance emploient au total près de 140 personnes.

ARD a créé une plateforme d'innovation **Bioraffinerie Recherches et Innovations** (BRI) a pour vocation de devenir le centre de référence internationale sur la thématique de la bioraffinerie. Le projet est labellisé par le pôle de compétitivité Industries et Agro-Ressources et mobilise un investissement de 21 millions d'euros. BRI accueillera également une chaire en biotechnologie blanche et une unité de recherche de l'Ecole Centrale de Paris, d'AgroParisTech et d'établissements d'enseignement supérieur de Reims.

BIOMETHODES

Bio méthodes est une entreprise française, présente sur le gonopode d'Evry et spécialisée dans **l'ingénierie des enzymes**. Bio méthodes développe avec succès des technologies pour des applications dans le domaine de la santé mais s'est également engagé dans le développement de procédés de conversion de biomasse lignocellulosique en bioéthanol et de sucres en bio hydrogène. Dans cette perspective, Bio méthodes avait signé en 2008 un accord de partenariat avec le **Virginia Tech Intellectual Propretés Inc.** (VTIP).

BUTALCO GmbH est une société suisse, créée en 2007, qui développe des procédés de production d'éthanol et de butanol par fermentation de levures (*Saccharomyces cerevisiae*) métabolisant des sucres en C5 et C6 issus de la fragmentation de la lignocellulose. Un pilote doit être mis en place et fonctionner sur le site de l'université de Hohenheim en Allemagne dès cet été 2010.

BUTAMAX Advanced Biofuels es tune joint venture, constituée en 2009 entre **DuPont** et **BP** pour développer du bio butanol à parti de différentes matières premières végétales.

COBALT BIOFUELS

Cobalt biofuels a été créée en 2006 pour développer des technologies de production de butanol, en valorisant des souches particulières de *Clostridium*, non OGM, capables de métaboliser les sucres en C5 et en C6 et d'utiliser comme matières premières aussi bien de l'amidon, que de la cellulose, des hémicelluloses et des pectines. Cobalt Biofuels prévoit de disposer d'une unité opérationnelle fin 2011.

COSKATA

Coskata est une entreprise nord-américaine qui développe une technologie originale de production d'éthanol par gazéification de la biomasse suivie d'une biofermentation du gaz de

synthèse obtenu. Les souches microbiennes utilisées convertissent le monoxyde de carbone et l'hydrogène du gaz de synthèse en éthanol. Elles sont peu sensibles aux impuretés présentes dans le gaz de synthèse.

Coskata annonce pouvoir produire 380 litres (100 gallons) d'éthanol par t de matière sèche carbonée. Il promet une technologie flexible en termes de matières premières, ne nécessitant pas l'utilisation d'enzymes et très économe en eau. Un procédé spécifique de purification de l'éthanol a été développé car celui-ci est obtenu à des concentrations moindres qu'à l'issue de fermentations classiques de sucres. Une installation pilote fonctionne en Pennsylvanie depuis fin 2009.

Le groupe pétrolier français **Total** est entré au capital de Coskata en 2010.

DEINOVE

Deinove est une start-up qui a été créée en 2006 pour valoriser spécifiquement le potentiel des bactéries du groupe des déinocoques qui ont des propriétés particulières d'auto-reconstruction de leur ADN en cas d'altération par irradiations. Ce sont des bactéries naturellement présentes dans des milieux particuliers et dont la diversité génétique et métabolique est particulièrement importante.

Deinove a deux axes de développement annoncés : l'un sur la production d'éthanol de seconde génération, en développant des souches de déinocoques thermophiles, capables d'utiliser la cellulose et les hémicelluloses directement comme substrat ; l'autre vise développer des applications des déinocoques dans le domaine de la chimie verte et notamment la production d'acides organiques (acides succinique, lactique, fumarique ou butyrique).

Deinove collabore avec **Tereos** pour développer de nouvelles pistes plus performantes de production de bioéthanol, en incluant notamment la fraction fibreuse des grains de blés que l'on retrouve dans les sons. Les deux partenaires sont les principaux acteurs du projet Deinol, d'un coût de 21 millions d'euros et soutenu par Oséo pour 9 millions d'euros. Il implique également le CNRS-Université de Montpellier et le LISBP de Toulouse. Deinol vise à augmenter le rendement en éthanol et en coproduits sur une installation existante de bioéthanol, avec en perspective, le développement de procédés innovants de secondes générations. Le 1^{er} juillet 2010, un communiqué a annoncé la signature d'un partenariat de recherche entre Deinove et le centre technique de recherche finlandais VTT qui dispose de larges connaissances sur la dégradation enzymatique de la lignocellulose. Le VTT participera au projet Deinol.

DNP GREEN TECHNOLOGY

DNP est une entreprise nord-américaine à capitaux japonais et nord-américains qui valorise des brevets de l'US DOE (le ministère US de l'Energie) pour la production d'**acide succinique** par fermentation en valorisant des souches spécifiques d'*E. coli*.

DNP a créé avec **ARD** (groupe Champagne Céréales) une filiale commune **Bio Amber** pour développer la production d'acide succinique biosourcé. En 2010, l'unité pilote du site de Pomacle produira 2000 t de produit.

GALACTIC

Galactic est une filiale du groupe international sucrier belge **Finasucre**, créée en 1994. Galactic est le deuxième producteur d'acide lactique et de lactates derrière **Purac** (le 3^{ème} derrière **Cargill** si l'on considère la production d'acide lactique de Cargill-Natureworks, dédiée à la production de PLA). Ses capacités totales de production sont de 100 000 tonnes, réparties en Belgique, aux USA et en Chine. Galactic a créé en 2007 une joint venture Futerro avec **Total Petrochemicals** pour la production de PLA (Poly Lactic Acid) et plus particulièrement la production de PLA de seconde génération. Galactic produit actuellement 2000 t de PLA.

GENENCOR, groupe DANISCO

Danisco est un groupe danois issu du monde sucrier qui produit et commercialise des bio-ingrédients pour l'agroalimentaire et d'autres industries. Danisco compte 7000 employés et a réalisé un chiffre d'affaires 2008-2009 de 13 milliards de couronnes danoises. Sa division Genencor (4 milliards de couronnes danoises de chiffre d'affaires) est un le n°2 mondial, après Novozymes, sur le marché des enzymes.

- Genencor avait collaboré avec **DuPont** pour le développement de la production de 1,3 propanediol (PDO) biosourcé.
- Danisco a créé avec DuPont une joint venture 50/50 "DuPont Danisco Cellulosic Ethanol LLC" pour développer des technologies intégrées de production de bioéthanol de seconde génération. Genencor présente une gamme importante d'enzymes ou cocktails d'enzymes à activités cellulosiques.
- Danisco collabore avec le fabricant de pneumatiques Goodyear Tire & Rubber Company pour développer de l'isoprène biosourcé "Biolisoprene®" à partir de biomasse (sucre ?, autres ?) pour fabriquer du caoutchouc synthétique. Des productions pilotes ont été réalisées en 2009 et une production commerciale serait prévue pour 2013.

GENOMATICA

Genomatica est une start up américaine qui dispose d'une plate forme technologique lui permettant de produire de nombreuses biomolécules à partir de matières premières végétales. Genomatica s'intéresse uniquement aux produits dont les marchés sont très larges et met en avant ses capacités à produire du 1,4 Butanediol (BDO) à partir de sucres (glucose, xylose), avec une souche modifiée de E. coli, mais aussi du butanone (ou éthyl méthyl cétone = MEK en anglais pour Methyl Ethyl Ketone).

Il a été annoncé fin 2009 que Genomatica étudie avec le pétrochimiste brésilien **Braskem** une collaboration pour produire des polymères biosourcés (à partir de sucre de canne transformé en BDO).

Mi 2010, Genomatica a annoncé le succès de production à l'échelle pilote de 3000 litres de BDO à partir de glucose.

Genomatica est partenaire de plusieurs entreprises parmi lesquelles **Cargill/Natureworks**, **Dow**, **DSM** (qui produit de l'acide succinique avec Roquette), **Kyowa Hakko**, **Unilever**, **Verenium**.

GEVO

Gevo est une entreprise nord américaine de biotechnologies, spécialisée dans la production de isobutanol, avec également des projets de production d'isobutène (= isobutylène).

Gevo propose un ensemble technologique intégré GIFT® pour fabriquer de l'isobutanol sur des sites actuellement dédiés à la production de bioéthanol.

Gevo a noué des partenariats stratégiques avec **Cargill** dont il valorise des souches brevetées de levures et l'entreprise d'ingénierie **ICM**, experte des procédés de production de bioéthanol.

Le groupe français pétrolier **Total** est entré en 2009 au capital de Gevo au travers de sa filiale Total Energy Ventures. Le chimiste de spécialités allemand **Lanxess**, leader des caoutchoucs synthétiques, est également entré au capital de Gevo mi 2010, avec un intérêt affiché pour sa technologie de production de bio isobutène.

GLOBAL BIOENERGIES

Cette start-up française, créée en 2008, est basée sur le genopole d'Evry et développe un projet de production d'isobutène (= isobutylène) par fermentation, à partir de sucres. En février

2010, Global Bioenergies a reçu un financement de 760 000 € d'Oseo pour accélérer le développement de son procédé. Le produit est obtenu sous forme gazeuse, ce qui facilite grandement son extraction et sa purification.

ITACONIX

Cette société nord-américaine fabrique par fermentation de sucres (glucose de maïs, etc.) de l'acide itaconique et des polymères linéaires ou ramifiés d'acide polyitaconique pour des usages dans les détergents, le traitement des eaux et d'autres applications valorisant les propriétés superabsorbantes de ces polymères. Itaconix travaille également avec des soutiens publics sur la production d'acide itaconique à partir de bois.

LS9 est une start up nord américaine basée à San Francisco, avec des installations pilotes en Floride. Sa technologie permettrait de faire produire des alcanes et des alcènes à des souches modifiées d'*Escherichia coli* dans laquelle une séquence de gènes de micro algues bleues ont été introduites. LS9 développe des procédés de production de carburants diesels et de tensioactifs à parti de jus de sucre de canne. Il est partenaire de **Procter & Gamble** en ce qui concerne les travaux sur cette dernière famille de produits.

METABOLIC EXPLORER (Met Ex) est une start up française de "chimie biologique", créée en 1999 et basée à Clermont-Ferrand. Elle emploie une centaine de personnes.

Met Ex se positionne dans la chimie des commodités en développant des solutions de substitutions aux matières premières fossiles. L'entreprise dispose de deux plateformes bactériennes : *E. coli* et *Clostridium acetobutylicum*.

Metabolic Explorer affiche des projets de niveau d'avancement variés sur la production par fermentation de cinq biomolécules :

- La L-méthionine, un acide aminé important pour l'alimentation animale, qui restait produit par synthèse, à partir du propylène.
- L'acide glycolique.

Les licences de production de ces deux produits sont concédées à **Roquette**.

- Le 1,3 propanediol (PDO), à partir de glycérol, avec un procédé qui serait plus performant économiquement que celui de Genencor / Du Pont – Tate & Lyle.
- Le mono propylène glycol (MPG = 1,2 propanediol).
- Le n butanol pour ses applications dans l'industrie chimique (solvants, peintures, adhésifs).

Dans le cadre du projet Bio Hub, Met Ex développe avec Roquette depuis 2006, une technologie de production d'acide glycolique par fermentation. Une souche bactérienne performante a été obtenue dès le mi 2008.

Métabolique Explorer veut faire évoluer sa position sur la chaîne de valeur en devenant producteur de certaines des molécules sur lesquelles il travaille. Un pilote industriel a été construit sur le site de l'entreprise.

METABOLIX

Créée en 1992, l'entreprise US de biotechnologie Metabolix, Inc se dédie à la production de polyhydroxyalcanoates (PHA), en mettant en œuvre des outils d'ingénierie métabolique. Metabolix a créée la joint venture **Telles** avec **ADM** qui produit pour son compte des PHA commercialisés par fermentation de glucose de maïs en mettant en œuvre des microorganismes modifiés. Commercialisé sous la marque *Mirel*, une nouvelle unité de 50 000

tonnes est opérationnelle depuis avril 2010. Elle a été construite par ADM pour un coût de 300 000 US \$. En 2010, **Papermate** a adopté le produit Mirel pour le corps de stylos biodégradables.

Metabolix développe également des plantes génétiquement modifiées capables de produire des PHA, à partir d'une technologie rachetée à **Monsanto** en 2001. L'entreprise a obtenu des variétés modifiées de switchgrass (panic érigé = *Panicum virgatum*) produisant des PHA que l'on peut extraire avant de valoriser le reste de la plante à des fins énergétiques. Des travaux sur la canne à sucre et des plantes oléagineuses sont en cours.

Metabolix a enfin le projet de mettre en œuvre un projet de production par fermentation d'une molécule plateforme en C4, pouvant avoir des dérivés ayant des applications larges dans les résines, polyuréthanes, solvants et produits de soins. A suivre !

MYRIANT TECHNOLOGIES

Cette start up nord-américaine, créée en 2004, valorisait initialement un savoir-faire de l'université de Floride. Myriant a développé la technologie de production d'acide D-lactique, dont **Purac** a acquis la licence exclusive.

Myriant finalise une technologie de production d'acide succinique par fermentation et a reçu à ce titre l'engagement d'un soutien de 50 millions de dollars du ministère de l'énergie américain pour construire une unité de production en Louisiane, à partir de sorgho. Myriant travaille également sur la production par fermentation d'acides fumarique et malique.

NOVOZYMES est une filiale du groupe pharmaceutique danois **NOVO NORDISK**.

Novozymes est le **leader mondial du marché des enzymes industriels** (47 % de part de marché, devant **Danisco**). La société produit et commercialise également ses souches de microorganismes à usage industriel et des ingrédients pharmaceutiques. En 2009 son chiffre d'affaire a été de 8.5 milliards de couronnes danoises.

Novozymes est partenaire de **Cargill** dans un projet de production de 3 HPA (acide 3-hydroxypropionique), précurseur potentiel d'acide acrylique à partir de glucose de maïs.

Novozymes est également le partenaire de **Braskem** dans un projet de production de polypropylène à partir de sucre de canne.

Novozymes développe activement de nouvelles enzymes et de technologies permettant d'améliorer la fragmentation et de matières premières lignocellulosiques ainsi que la production de biocarburants de seconde génération. Au Brésil, Novozymes est partenaire du centre technique de la canne à sucre (**Centro de Technologica Canaviera**) sur un projet valorisant la bagasse. En Chine, Novozymes collabore avec le **China National Cereals, Oil and Foodstuff Corporation (COFCO)** et **Sinopec** (valorisation de rafles de maïs).

OPX BIOTECHNOLOGIES est une entreprise nord américaine de biologie synthétique et d'ingénierie métabolique, portée par différents fonds d'investissements. OPX développe une technologie de production d'acide acrylique par fermentation à partir de sucres, sur une plateforme *E. coli*. OPX travaille également sur la production de biodiesel.

PURAC

Purac est une filiale du groupe agroalimentaire **CSM**, un leader des ingrédients pour la boulangerie, qui a réalisé, en 2009, 2.6 milliards d'euros de chiffre d'affaires et emploie plus de 8400 employés dans 25 pays. Purac est spécialisé dans les technologies de fermentation, avec un chiffre d'affaires 2009 de 355 millions d'€ et 1000 employés.

PURAC est le premier producteur mondial d'acide lactique, totalisant 200 000 t sur 3 sites : en Thaïlande (à partir d'amidon de manioc), au Brésil (à partir de sucre) et aux Etats-Unis (à partir

de glucose de maïs). Les principaux dérivés de l'acide lactique sont produits aux Pays Bas tandis que les lactides et l'acide lactique D sont produits en Espagne.

Une usine de 75 000 tonnes de lactides, représentant un investissement de 45 millions d'euros, est en cours de construction en Thaïlande sur le site de Rayong. Cette unité produira des lactides L et D à partir de l'acide lactique produit par différentes usines Purac. La société compte pouvoir ainsi développer des PLA de deuxième génération, à températures de fusion élevée.

La technologie de production de l'acide lactique D provient de l'entreprise de biotechnologies **Myriant technologies**.

Avec la société hollandaise **Symbra Technologies**, spécialiste du polystyrène expansé, et la compagnie suisse d'ingénierie **Sulzer Chemtec Ltd**, Purac construit une usine de production de mousse de PLA.

PURAC et l'entreprise japonaise **Totobo** ont initié une collaboration pour la production de PLA pour des applications particulières qui sont vendues sous la marque Vylcoecol®.

Avec l'appui technologique d'une filiale de **BASF**, Purac développe une production d'acide succinique biosourcé sur son site espagnol.

PROTEUS

Protéus est une entreprise française de biotechnologie, spécialiste des protéines et de leur ingénierie, qui développe des procédés de biocatalyse innovants.

Protéus avait créé en 2006 avec **PCAS** une filiale commune **PCAS Bio solution** dont la vocation est la mise au point de procédés de fabrication de molécules d'intérêt pharmaceutique.

Plus récemment, Protéus a engagé en 2009 un partenariat avec **ARD**. La même année, l'entreprise a initié un partenariat avec le groupe **Singent** pour développer des enzymes destinées à la fabrication de biocarburants.

SYNTHETIC GENOMICS Inc. (SGI)

SGI est une entreprise nord-américaine engagée dans le développement des technologies de biologie synthétique.

SGI collabore avec Exxon Mobil sur la production de biocarburants à partir de micro algues. L'entreprise est également partenaire du groupe BP.

TETRAVITAE Biosciences Inc. est une société nord américaine qui développe une technologie de production de butanol par fermentation en utilisant une souche particulière de *Clostridie beijerinckii*.

VERDEZYNE – CODAGENOMICS

Cette société nord américaine, portée par des fonds d'investissements, est active en ingénierie métabolique et en biologie synthétique. Sur une plateforme de levure, elle développe deux projets spécifiques, l'un sur la production plus efficace d'éthanol à partir de sucres en C6 et C5 et l'autre sur l'obtention d'acide adipique à partir d'huiles végétales ou d'alcanes. Elle collabore tant avec des entreprises comme **Lallemand** sur l'amélioration de souches de levures OGM productrices d'éthanol qu'avec **Novozymes** et **Genencor** pour modifier les propriétés d'enzymes industrielles. Verdezyne est également partenaire de **Syngenta**.

VERENIUM

Entreprise nord-américaine, Verenium développe des enzymes mais aussi des technologies de production d'éthanol de seconde génération à partir de biomasse cellulosique.

Dans le développement d'enzymes, Verenium collabore avec ou travaille pour le compte de groupes importants comme **BASF, Bunge, Cargill, Danisco** et **Syngenta**.

En ce qui concerne la production d'éthanol cellulosique, son pilote de Louisiane, en cours d'optimisation, a une capacité de 5300 m³ par an. Un autre pilote de 1400 m³ par an est opérationnel au Japon. Il utilise des déchets de bois de construction. En Thaïlande, un troisième pilote de 3000 m³/an valorise en Thaïlande des coproduits de canne à sucre. Verenium avait également initié en 2008 une collaboration avec BP sur le développement de technologies de production d'éthanol cellulosique.

ZEACHEM est une entreprise nord-américaine développant des technologies combinant des procédés biochimiques et thermochimiques pour fabriquer de l'éthanol, de l'acide acétique et de l'acétate d'éthyle à partir de biomasse cellulosique. La biomasse utilisée provient du bois, de switchgrass ou de rafles de maïs. Elle est fragmentée selon un procédé chimique, en sucres en C5 et en C6 puis subit une fermentation acétogène. Un pilote d'une capacité de 250 000 gallons (9500 hl) par an démarre ses activités dans l'Oregon. Zeachem projette de développer également un ensemble de molécules en C3 (acide propionique, propanol et propylène).