



HAL
open science

La biomasse, simple source d'énergie ou source de matières premières renouvelables ?

Michael O'Donohue

► **To cite this version:**

Michael O'Donohue. La biomasse, simple source d'énergie ou source de matières premières renouvelables ?. Innovations Agronomiques, 2013, 26, pp.41-50. hal-01268036

HAL Id: hal-01268036

<https://hal.science/hal-01268036>

Submitted on 29 May 2020

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

La biomasse, simple source d'énergie ou source de matières premières renouvelables ?

O'Donohue Michael J.¹

¹INRA UMR 792, LISBP, INSA, 137 avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse cedex 04

Correspondance : michael.odonohue@insa-toulouse.fr

Résumé

La fin du 20^{ème} siècle a été marquée par le double constat que les ressources fossiles s'épuisent peu à peu et que leur utilisation est néfaste pour l'équilibre de la planète. Ce constat est inquiétant, car notre économie dépend de ces ressources. Pour relever le défi du remplacement des ressources fossiles, un grand nombre de pays ont engagé des politiques visant à introduire dans l'économie des sources d'énergies et de carbone « propres » et renouvelables. C'est ainsi que nous sommes aujourd'hui habitués à assimiler le terme biomasse à la notion d'énergie et le terme bioraffinerie à une activité industrielle à finalité énergétique. Cependant, cette mise en adéquation trop rapide est maladroite, car elle fait oublier le fait que la biomasse est avant toute chose une formidable source de carbone renouvelable.

Le projet FP7 BIOCORE a pour objectif de développer un concept de bioraffinage de la matière lignocellulosique qui privilégie la fabrication de matériaux et de produits chimiques, plutôt que celle de l'énergie. Le projet apporte une belle démonstration des nombreuses possibilités offertes par la biomasse lignocellulosique.

Mots-clés : Bioraffinerie, lignocellulose, pentoses, lignines, cellulose, éthanol

Abstract : Biomass, simply a source of energy, or a feedstock for renewable chemicals and materials ?

The end of the 20th century was marked by the acknowledgement that fossil resources are inevitably finite, and that the use of these is damaging for the planet's equilibrium. Recognition of these truths is worrying, because our modern economy is highly dependent on fossil resources. To meet the challenge of replacing fossil resources, many countries have adopted policies that aim to introduce 'clean' and renewable carbon sources into the economy. Accordingly, we have become accustomed to the association of the terms biomass and energy, and biorefining and biofuels. However, this rather hasty association of words and concepts is unfortunate, because it somewhat masks the fact that biomass is first and foremost a source of renewable carbon.

The FP7 project entitled BIOCORE aims to develop a biorefining concept for lignocellulosic biomass that is primarily focused on the production of chemicals and materials, rather than energy vectors. Built around several workpackages, the projet is a fine demonstration of the numerous product opportunities offered by lignocellulosic biomass.

Keywords : Lignocellulosics, biobased chemicals, lignins, cellulose, ethanol

Introduction

La biomasse végétale résulte de la photosynthèse. Ce processus bioénergétique transforme l'énergie solaire, le CO₂ et l'eau en glucides qui constituent les réserves de carbone des végétaux. Les glucides de stockage, comme l'amidon ou le saccharose, ou encore les substances lipidiques, comme les triglycérides, constituent les matières premières dites de première génération. Les macromolécules qui participent à la structuration des plantes sont dites de deuxième génération (ou 2G). Comme l'a montrée la récente polémique sur les biocarburants de première génération, il est particulièrement important de bien différencier ces deux types de biomasses. Contrairement à la seconde, la première catégorie fait généralement partie des ressources alimentaires exploitées par l'homme. Il est cependant intéressant de noter que le glucose, peut être à la fois obtenu à partir d'amidon ou de cellulose, la seule différence étant la difficulté relative de son extraction à partir de cette dernière.

Les grands défis liés à l'utilisation de la biomasse lignocellulosique sont de natures différentes. Parmi ceux-ci, le premier concerne sans aucun doute la localisation des gisements de biomasse nécessaires pour garantir l'approvisionnement stable de bioraffineries en matières premières. Le second défi concerne la déconstruction maîtrisée de la biomasse permettant d'extraire les molécules qui serviront aux procédés de conversion. De nombreuses technologies existent, mais la plupart ne permettent pas d'attendre l'objectif numéro un d'une bioraffinerie, à savoir la fabrication d'une large gamme de produits. Enfin, le dernier défi est de concevoir des produits commercialisables qui répondent aux attentes des industriels et des consommateurs en termes de qualité technique et de performance environnementale.

1. La disponibilité de la biomasse lignocellulosique

Une analyse rapide de la littérature permet de constater que la question de la disponibilité de la biomasse n'est pas simple. Il est en effet nécessaire de tenir compte non seulement de la production potentielle nette de la biomasse par unité géographique, mais également d'autres facteurs tenant compte de la durabilité du système (ex. la quantité récoltée, les usages alternatifs, les contraintes de transport, le comportement des agriculteurs et des forestiers etc.). En intégrant ces facteurs, le bilan peut être très différent d'une ressource à l'autre, et d'un lieu à l'autre. En conséquence, pour établir une industrie de bioraffinage, il est indispensable de déterminer la disponibilité et la stabilité (pour des périodes longues) de l'approvisionnement en biomasse dans différentes régions du monde, et ce à des échelles pertinentes.

Le projet BIOCORE, a pour ambition de modéliser, par une approche d'étude de cas, le fonctionnement d'une bioraffinerie dans plusieurs régions en Europe et en Inde. Pour définir les régions à étudier, nous avons d'abord cherché à estimer la disponibilité de la biomasse des différents gisements.

Pour la paille de céréale, les quantités disponibles en Europe ont été estimées en utilisant la formule suivante :

$$PP = PR \times A - PL \times (1 - B) - PE$$

où **PP**= paille extractible ; **PR** = paille récoltée ; **PL** = paille utilisée en litière animale, **PE** = paille utilisée à des fins énergétiques ; **A** = coefficient de durabilité (pour le maintien du carbone organique dans le sol) ; **B** = % de fumier retourné au champ.

A l'aide de cette formule et de l'emploi de définitions strictes pour calculer les valeurs de PR et PL et Pe, il a été possible d'établir des estimations de la biomasse réellement disponible pour le bioraffinage par pays européen, et à l'intérieur de chaque pays, des estimations par région (NUTS2)¹.

Le Tableau 1 et la Figure 1 illustrent une étape (détermination de la valeur PR) dans cette procédure pour la Hongrie.

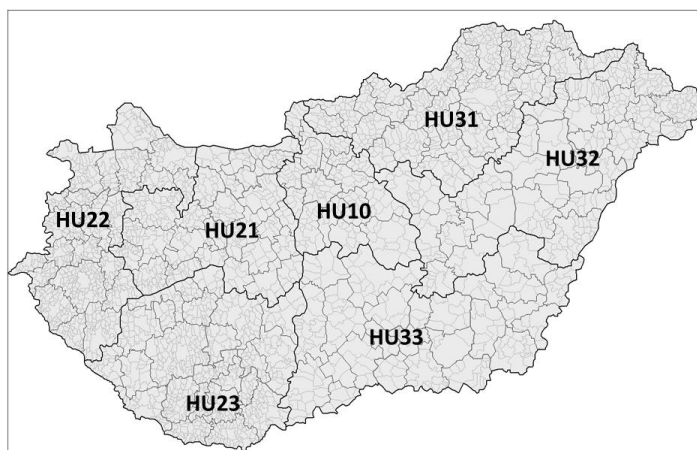


Figure 1 : Subdivisions NUTS 2 pour la Hongrie

Code NUTS2	PR sans maïs	PR avec maïs
HU10	76	132
HU21	175	339
HU22	186	320
HU23	227	597
HU31	170	224
HU32	243	533
HU33	370	643
Total	1447	2789

Tableau 1 : Quantité annuelle de paille extractible (en millier de tonnes de matière sèche) en Hongrie

Selon nos résultats globaux, l'Europe disposerait de 215 millions de tonnes (Mt) de paille récoltable (dont 50% de paille de blé, 25% de paille d'orge et 25% de tiges de maïs). La moitié de ce gisement se localise dans seulement trois pays, la France, l'Allemagne et l'Ukraine. Cependant, en tenant compte des différentes contraintes évoquées ci-dessus, la quantité de paille extractible, donc réellement

¹ La classification NUTS ou Nomenclature d'unités territoriales statistiques a été établie par la Commission Européenne pour subdiviser les différents pays de l'Union en unités territoriales. NUTS2 fait référence aux unités présentant une population de 800 000 à 3 000 000 habitants.

disponible pour des activités de bioraffinage, serait de l'ordre de 47 Mt, dont environ 21 Mt localisés dans les trois pays cités précédemment.

A l'aide de ces chiffres, il est possible de cibler une ou plusieurs régions, et de réaliser une étude de cas, ce qui permet d'apprécier d'autres facteurs tels que la qualité et la densité du réseau routier et la propension des acteurs locaux à participer à un projet de bioraffinerie. Dans le projet BIOCORE, ces études sont actuellement en cours de finalisation. Cependant, nous sommes déjà en mesure de dire que, pour certaines régions françaises, des facteurs tels que l'introduction de nouvelles pratiques (ex. le développement de l'agriculture biologique) et des sécheresses à répétition compromettraient la réalisation de projets de bioraffinerie d'une capacité de 150.000 tonnes (matière sèche par an), si les unités industrielles ne devaient dépendre que d'un approvisionnement local (dans un rayon d'environ 50 km au tour de l'usine) en paille de blé.

2. La déconstruction de la biomasse lignocellulosique

2.1 La structure et la complexité de la biomasse lignocellulosique

Pour comprendre les difficultés qui caractérisent la mise au point de technologies de déconstruction de la biomasse, il convient d'abord de rappeler la complexité de cette matière première.

La biomasse lignocellulosique est une matière composite, qui présente au moins deux niveaux de complexité. Le premier niveau est chimique, car en effet la biomasse lignocellulosique est une matière hétérogène, composée de différentes macromolécules. Concernant les polysaccharides, ceux-ci représentent la majeure partie de la matière sèche, avec la cellulose comme polysaccharide majoritairement. La cellulose est un homopolymère constitué uniquement d'unités de D-glucose reliées entre elles par des liaisons β -1,4. Les chaînes de D-glucanes qui composent la cellulose s'organisent entre elles grâce à un réseau de liaisons hydrogène qui confèrent à la cellulose la capacité de s'organiser en structures cristallines. Le deuxième composant glucidique majeur de la biomasse lignocellulosique est un groupe hétérogène de polysaccharides désignés par le terme hémicelluloses. Ces polysaccharides constituent la deuxième source terrestre de carbone renouvelable, après la cellulose. Chez les graminées et les feuillus, les hémicelluloses sont des xylanes, des polymères qui présentent une chaîne principale composée de D-xylose (un glucide à cinq carbones) et des ramifications (ou branchements), variables en nature et en quantité selon les espèces. Chez les arbres conifères, les hémicelluloses sont majoritairement des galactoglucomannanes, dont les chaînes principales sont formées d'unités de glucose et mannose et décorées par des unités de galactose (Scheller et Ulvskov, 2010). Quant au troisième composant majeur de la biomasse lignocellulosique, il s'agit des lignines. Ces macromolécules hautement ramifiées sont des polymères phénoliques dont les sous-unités sont des composés phénylpropanoïdes (Boerjan *et al.*, 2003; Vanholme *et al.*, 2010).

Le deuxième niveau de complexité de la biomasse est structural, car les différentes macromolécules décrites ci-dessus s'associent de façon intime dans une maille tridimensionnelle qui constitue les parois de cellules végétales. Schématiquement, les hémicelluloses recouvrent les micro-fibrilles de cellulose et forment des liaisons covalentes, d'une part, entre chaînes d'hémicelluloses et, d'autre part, avec les lignines (Lapierre *et al.*, 2001). Ainsi, les hémicelluloses sont souvent considérées comme un facteur important d'adhésion des parois. L'ensemble se présente sous la forme d'une maille composite, plutôt hydrophobe, qui contribue au maintien de la superstructure des végétaux et constitue une barrière efficace contre des agressions biotiques et abiotiques.

2.2 Les technologies de déconstruction de la biomasse

En tenant compte de l'extrême complexité de la biomasse lignocellulosique, il est facile de comprendre que la déconstruction de cette matière n'est pas aisée, surtout si l'objectif est de préserver au mieux l'intégrité chimique des sous-unités glucidiques et de produire des lignines sous une forme valorisable. En ce qui concerne la voie dite de bioconversion, la biomasse est d'abord soumise à un prétraitement qui a pour objectif de séparer les composants majeurs de la matière première et d'augmenter l'accessibilité de la cellulose aux enzymes. Dans une deuxième étape, des enzymes (en particulier des cellulases) sont déployées pour produire un sirop de sucres fermentescibles qui constitue la matière première de bioconversions catalysées par des microorganismes.

D'un point de vue historique, la notion de déconstruction de la biomasse lignocellulosique a été toujours associée à celle de l'extraction de cellulose, et donc la production de glucose, sans doute parce que ce glucide constitue une molécule intermédiaire idéale pour la réalisation de bioconversions par voie microbienne (ex. fermentation alcoolique). Ainsi la plupart des méthodes de prétraitement développées visent en priorité à extraire la cellulose, passant volontairement ou non les autres composants au second rang. Cette stratégie, que l'on peut qualifier de « glucocentrique », a parfois des conséquences importantes pour l'économie globale des procédés (Dumon *et al.*, 2012).

Les grandes familles de technologies développées sont maintenant connues depuis plus de 40 ans, et dans le cas de l'hydrolyse acide, depuis presque deux siècles (O'Donohue, 2005). Cependant, l'étape de prétraitement reste difficile, car c'est à la fois une opération coûteuse en énergie et déterminante pour l'efficacité de la suite du procédé. De façon générale, sous ces différentes formes, l'hydrolyse acide requiert l'utilisation de températures élevées (>160 °C) et conduit à la déshydratation d'une partie des glucides, formant ainsi des sous-produits non-désirés. Par ailleurs, les lignines produites par des protocoles à catalyse acide présentent des structures assez condensées et contiennent des glucides résiduels (Kumar *et al.*, 2009).

Un variant de la catalyse acide est l'explosion à la vapeur qui exploite la vapeur d'eau sous pression pour porter la biomasse à une température située entre 160 à 260 °C. Après plusieurs dizaines de secondes, voire quelques minutes, la pression est relâchée, ce qui provoque l'explosion et donc le défibrage de la biomasse (Kumar *et al.*, 2009). Cette technologie est la plus couramment utilisée aujourd'hui. Souvent pratiquée en présence de quantités catalytiques d'acide minéral, cette technologie, typiquement glucocentrique, produit une cellulose de relativement bonne qualité technique, facilitant donc les opérations ultérieures, mais elle sacrifie quelque peu les hémicelluloses et les lignines.

De nombreuses technologies faisant appel aux traitements alcalins ont également été développées. Les plus connues sont des procédés papetiers, notamment le procédé Kraft qui emploie le sulfate de sodium en conditions alcalines. Ce procédé est glucocentrique par excellence, car il a été développé pour fabriquer des pâtes papetières. En conséquence, les lignines dissoutes dans la liqueur noire (fluide de cuisson issu de la fabrication des pâtes) sont transformées en lignosulfonates dont la pureté est généralement faible. Ces lignosulfonates sont majoritairement utilisés comme combustibles pour la cogénération de chaleur et d'électricité, ce qui permet par ailleurs aux papeteries d'être souvent énergétiquement autonomes.

L'objectif du projet BIOCORE, étant de développer un concept de bioraffinage qui exploite au mieux l'ensemble des constituants de la biomasse lignocellulosique, il a été indispensable de choisir une technologie de prétraitement permettant d'isoler les trois composants majeurs de cette matière première sous des formes non-dénaturées et donc potentiellement valorisables. Ainsi, nous avons sélectionné une technologie organosolv qui emploie un système de solvants organiques pour déconstruire la biomasse, notamment par la dissolution des lignines. La technologie retenue est celle de la société CIMV S.A. (Levallois-Perret, France). Celle-ci utilise un mélange d'acides formique et acétique pour imprégner la biomasse à pression atmosphérique et à environ 105 °C. Cette procédure provoque la dissolution des lignines et la solubilisation par hydrolyse des hémicelluloses, et procure une pâte brute

de cellulose. Dans une deuxième étape, la cellulose est blanchie à l'aide de peroxyde d'hydrogène et les lignines sont récupérées par précipitation dans l'eau, laissant ainsi les hémicelluloses solubles dans une solution aqueuse (Figure 2). Dans le projet BIOCORE la technologie de CIMV a été validée pour plusieurs types de ressources lignocellulosiques, notamment les pailles de blé et de riz, ainsi que le bois de peuplier et de bouleau. Par ailleurs, cette technologie a été validée, entre autres, pour la bagasse de sorgho sucrier et les tiges de bananiers, ce qui démontre l'adaptabilité de ce procédé (Lam *et al.*, 1999 ; Delmas, 2008).

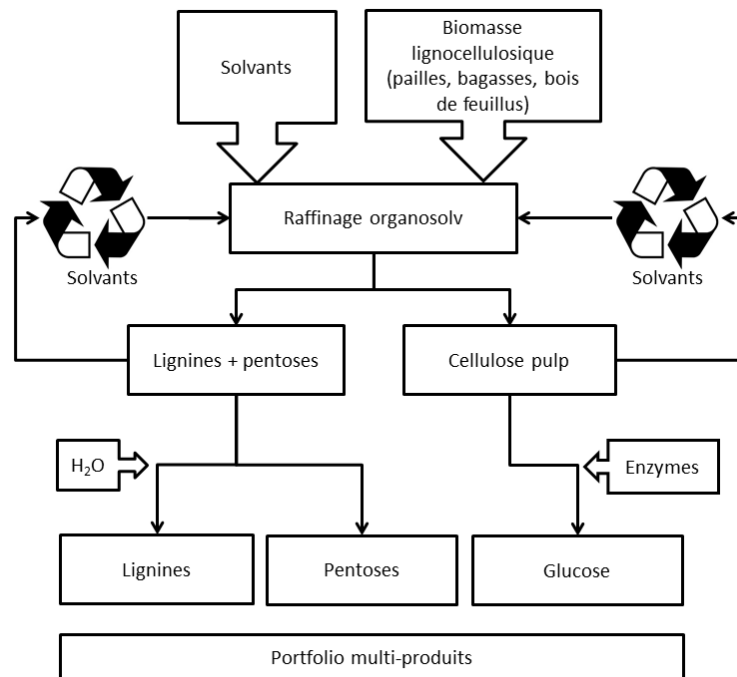


Figure 2 : Procédé organosolv développé par la société CIMV

La pâte de cellulose obtenue par prétraitement organosolv est d'une très bonne qualité, car son hydrolyse ultérieure par voie enzymatique est relativement aisée (voir ci-dessous). Par ailleurs, les lignines sont d'une qualité supérieure comparées à celles obtenues par d'autres méthodes, étant plus pures et présentant des propriétés intéressantes pour des applications diverses, telles que la fabrication de résines phénoliques, mousses et élastomères de polyuréthane, ou encore pour la substitution de la noir de carbone, substance utilisée notamment pour la fabrication de pneumatiques. Enfin, les hémicelluloses sont obtenues sous la forme d'un sirop qui présente une teneur en sucres d'environ 60 % p/p et contient à la fois des monomères (majoritairement du xylose) et des oligomères de faible degré de polymérisation (essentiellement du xylobiose).

Ayant obtenu une pâte de cellulose, la suite des opérations consiste en l'hydrolyse de cette matière intermédiaire pour fabriquer un sirop de glucose. Cette hydrolyse est généralement conduite à l'aide d'un mélange de cellulases, qui sont des enzymes qui agissent spécifiquement sur les liaisons β -1,4 reliant les unités de glucose. Depuis une quinzaine d'années les principaux producteurs de cellulases commerciales ont engagé des recherches visant à développer des préparations cellulolytiques performantes à moindre coût. En effet, la charge enzymatique (masse de protéines) généralement nécessaire pour hydrolyser la cellulose, étant bien supérieure à celle déployée pour l'hydrolyse de l'amidon, rend cette opération coûteuse (Wilson, 2009). Selon les chiffres disponibles dans la littérature, le coût des cellulases s'élèverait actuellement à 0.05 à 0.1 €/litre d'éthanol, alors que le coût des

amylases utilisées pour fabriquer de l'éthanol de première génération serait de l'ordre de 0.008 €/litre, mais la fiabilité des données disponibles est incertaine (McAloon *et al.*, 2000 ; Klein-Marcuschamer *et al.*, 2012).

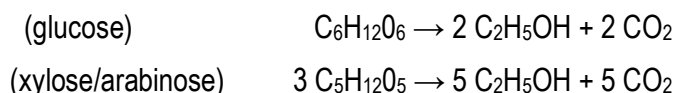
Pour réduire le coût de l'hydrolyse de la cellulose, le développeur de cellulases dispose de deux leviers principaux : l'augmentation de l'efficacité intrinsèque des enzymes et la diminution de la charge enzymatique. En ce qui concerne l'activité des cellulases, l'aptitude à fonctionner dans des conditions de forte teneur en matière sèche et la résistance à l'inhibition sont des facteurs particulièrement importants à l'échelle industrielle. En effet, pour obtenir un sirop de glucose concentré, il convient de travailler à une teneur en cellulose élevée (au minimum 20 % poids/poids). Dans ces conditions, en raison de la forte viscosité le contact entre l'enzyme et son substrat est plus difficile, et la concentration en produits (cellodextrines et glucose) devient très vite élevée, ce qui peut induire une inhibition de certaines cellulases par leurs produits. Pour pallier ces problèmes, plusieurs solutions sont envisageables, notamment au niveau de l'organisation des opérations unitaires. D'abord, pour réduire les problèmes liés à la viscosité, il existe la possibilité de réaliser une liquéfaction, c'est-à-dire, une dépolymérisation des chaînes de D-glucanes, à une température plus élevée que la normale (35 à 40°C). Le changement de ce paramètre permet d'accélérer la vitesse de réaction enzymatique et de fluidifier le mélange réactionnel. Cependant, cette configuration nécessite l'utilisation de cellulases plus ou moins thermostable selon la température choisie. Une deuxième option consiste en un couplage de la saccharification, c'est-à-dire l'hydrolyse enzymatique des cellodextrines en glucose, et la fermentation. Cette association de deux opérations unitaires permettrait de consommer le glucose au fur et mesure de sa production. Dans le projet BIOCORE, ces deux options ont été retenues, car la société DSM (Biotechnology Center, Delft), partenaire du projet, a développé des cellulases thermostables. En utilisant cette configuration de procédés, il a été possible de réaliser avec succès l'hydrolyse des lots (>500 kg) de cellulose produite par CIMV, en obtenant des rendements en glucose (environ 80% rendement théorique) compatibles avec les attentes d'un procédé commercial.

3. Les voies de valorisation des molécules issues de la biomasse lignocellulosique

Comme nous l'avons évoqué, la biomasse lignocellulosique est la source terrestre principale de carbone renouvelable. En plus du glucose, qui peut être converti en produits chimiques grâce à des bioprocédés parfois très bien maîtrisés (ex. la fermentation alcoolique), la biomasse contient très souvent une quantité non-négligeable de pentoses (ou sucres à cinq carbones) et de lignines. En ce qui concerne ces deux catégories, les voies de valorisation sont moins faciles et ces molécules sont donc parfois considérées plus comme des déchets plutôt que comme des ressources. Cet état de fait est bien illustré par l'adage industriel « on est capable de tout faire avec les lignines, sauf de se faire de l'argent ! ». Cependant, ces molécules sont aussi une source de carbone renouvelable et leur exploitation est vitale, à la fois pour l'utilisation efficace et durable des ressources, et pour rendre compétitif les procédés de bioraffinage.

3.1 La valorisation des pentoses

Depuis plusieurs décennies, de nombreuses équipes de recherche travaillent sur l'utilisation des pentoses comme matières premières pour la fabrication d'éthanol. En effet, comme le montre les deux équations ci-dessous, le xylose (et l'arabinose) constitue également une matière première pour la fabrication de l'éthanol :



Cependant, l'utilisation des pentoses pour la fabrication d'éthanol est complexe, car le microorganisme majeur de la biotechnologie industrielle, *Saccharomyces cerevisiae*, n'est pas capable de métaboliser directement ces sucres. En conséquence, il est nécessaire, soit de réaliser des travaux d'ingénierie génétique pour conférer à *S. cerevisiae* la capacité de métaboliser les pentoses, soit de trouver un autre microorganisme doué de cette fonction. Ces deux approches ont été étudiées, mais *S. cerevisiae* demeure aujourd'hui le microorganisme de choix, et il existe désormais des souches capables de consommer à la fois du glucose et du xylose.

Dans le projet BIOCORE, l'utilisation du xylose comme matière première pour la fabrication d'éthanol n'est qu'une option parmi d'autres. En effet, les pentoses peuvent aussi servir à la production d'autres molécules à valeur ajoutée. Un exemple de celles-ci est le xylitol, un polyol couramment utilisé dans l'industrie alimentaire (notamment pour la confiserie), mais aussi pour la synthèse de polymères et comme ingrédient dans certains produits cosmétiques (Granström *et al.*, 2007a, 2007b). Le marché mondial représente environ 160 000 T, pour une valeur de 200 à 300 M€ (Toyoda et Ohtaguchi, 2009). Actuellement, le xylitol est généralement fabriqué à partir du xylose en utilisant un catalyseur composé d'un alliage de nickel et d'aluminium (Raney nickel). Cependant la fabrication du xylitol par voie microbienne est aussi possible, mais jusqu'ici la performance des microorganismes n'a pas été suffisante. Dans BIOCORE, des travaux d'ingénierie de souches de levures (réalisé par le centre national de recherche appliquée - VTT, Finlande) ont permis d'obtenir un microorganisme très performant, dont la productivité est compatible avec les exigences d'un procédé industriel. La prochaine étape, déjà envisagée par la société Tereos Syral S.A., serait la réalisation d'essais pilote afin de valider l'économie du procédé.

3.2 La valorisation des lignines

Inéluctablement les lignines constituent un produit du bioraffinage de la biomasse lignocellulosique. En conséquence, en raison de l'émergence de bioraffineries, la quantité de lignines disponibles va croître pour atteindre, selon certains experts, 16 Mt dans l'Union Européenne (UE-25). A courte échéance, la transformation des lignines en produits à forte valeur ajoutée sera difficilement réalisable puisque les procédés les plus couramment utilisés seront basés sur l'explosion à la vapeur. Cependant, les travaux réalisés dans BIOCORE montrent qu'en utilisant d'autres méthodes de prétraitement, plus à même de fournir des lignines de bonne qualité chimique, leur valorisation ne serait pas seulement souhaitable, mais réellement faisable et profitable d'un point de vue économique (Figure 3). En effet, les lignines extraites par voie organosolv sont des molécules de bonne pureté, stables, quasi-linéaires et composées de plusieurs cycles aromatiques, qui présentent plusieurs fonctions hydroxyles. En conséquence, techniquement, ces lignines peuvent être considérées comme des oligo-phénols et, à ce titre, comme des substituants du phénol issu de la pétrochimie.

Le phénol est utilisé pour la fabrication d'un grand nombre d'objets de notre quotidien. Parmi ces objets, il est pertinent de citer les résines phénol-formaldéhyde qui sont utilisées comme adhésifs dans l'élaboration de panneaux de particules (du type MDF) et de contreplaqué. Ce produit représente une consommation annuelle d'environ 15 Mt par an, et un marché de 9 milliard €. Dans le projet BIOCORE, les sociétés CIMV et CHIMAR (une société grecque) ont préparé plusieurs formulations de résine contenant des Biolignins^{TM2} à la place du phénol. Ainsi, en utilisant des lignines ayant subi uniquement une étape de broyage et une étape de lavage à l'eau, il a été possible de remplacer jusqu'à 60% p/p du phénol dans les panneaux. Par ailleurs, en utilisant des lignines chimiquement modifiées, 70% du

² BioligninsTM est le nom commercial attribué par la société CIMV aux lignines obtenues par extraction organosolv.

phénol a été substitué et le besoin du formaldéhyde quasi-éliminé. En sachant que ce dernier produit chimique est désormais classé en tant que molécule cancérigène, son élimination des produits manufacturés constitue un avantage majeur. De façon pertinente, les panneaux fabriqués à l'aide de ces 'bio-résines' présentent des propriétés mécaniques tout à fait intéressantes, et conformes aux normes européennes EN314.1 et 2, ce qui indique que ces panneaux sont aussi bien adaptés aux usages intérieurs qu'extérieurs. Ces résultats montrent donc que cette voie de valorisation est complètement mature et que lignines fabriquées par la société CIMV auraient une valeur commerciale d'environ 1300 € par tonne, équivalente à la valeur actuelle du phénol utilisé dans les panneaux de bois (Figure 3).

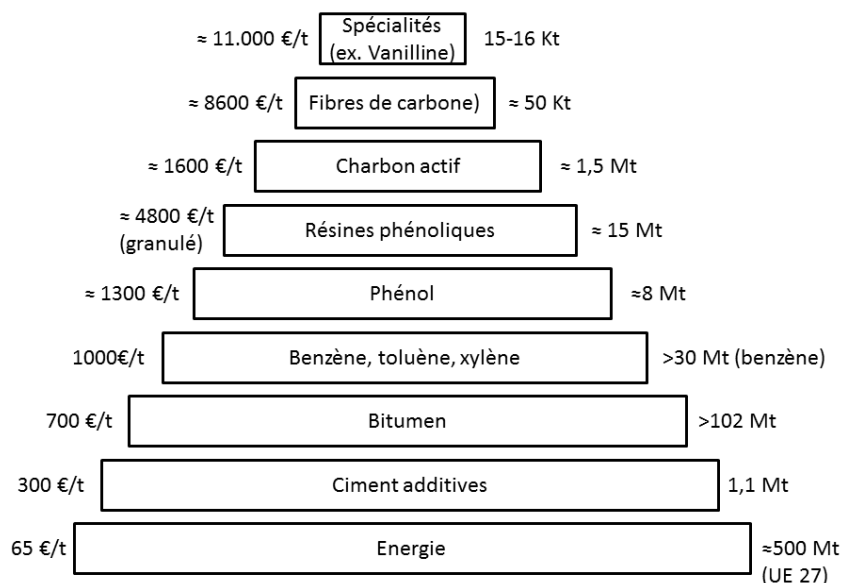


Figure 3 : Valeur et volume des marchés des produits pouvant potentiellement être fabriqués à partir de lignines.

Conclusions

Au cours de ces dix dernières années, plusieurs annonces de mise en ligne d'unités d'éthanol 2G ont été faites, sans que ces projets ne se réalisent. A ce jour, aucune unité industrielle n'exploite la biomasse lignocellulosique pour produire de l'éthanol à l'échelle commerciale, mais plusieurs sont en voie de planification ou de construction. Aux Etats-Unis, le projet Liberty, une joint-venture entre Poet et DSM, est actuellement en tête de peloton avec un projet de mise en ligne en 2013, alors qu'en Europe, c'est Chemtex SRL qui est en position de chef de file, avec une unité localisée à Crescentino (Italie) prochainement opérationnelle. Cependant, le marché de l'éthanol carburant en Europe est toujours sous-développé, notamment parce que ce carburant renouvelable est utilisé comme additif pour l'essence (le carburant E10 est un mélange d'éthanol, à 10%, et d'essence, à 90%). Or, l'Europe comprend un parc automobile plutôt diesel, notamment en France (60% des voitures).

En ce qui concerne la viabilité économique des unités en construction, l'avenir nous dira si les industriels ont su déployer les bonnes technologies et viser les bons marchés. Selon l'annonce publique faite par Poet en 2009, la première usine issue du projet Liberty (localisée à Emmetsburg, Iowa) fabriquera de l'éthanol 2G pour un coût total inférieur à 0.41 €/litre d'éthanol. Cependant, il sera très difficile de créer en Europe une industrie compétitive sur la base d'une bioraffinerie qui ne produirait qu'une commodité énergétique telle que l'éthanol à relativement faible valeur commerciale. Par ailleurs, du point de vue de la durabilité environnementale, il est clair qu'à l'avenir l'utilisation sous-optimale des ressources serait à bannir. En conséquence, il serait sans doute nécessaire de rechercher davantage

l'équilibre économique et environnemental en se tournant vers des concepts de bioraffinage plus englobant, offrant des opportunités de valorisation pour l'ensemble des composants de la biomasse.

Les premiers résultats de BIOCORE sont prometteurs et dégagent des perspectives pour l'avenir, notamment en montrant comment les lignines pourraient devenir une source de revenu majeur. Ce projet se terminant en 2014, la prochaine étape serait de construire une unité de démonstration commerciale qui aurait pour objectif de confirmer la potentialité du concept, notamment en démontrant comment la commercialisation de lignines comme molécules plateformes pour la chimie peut influencer favorablement l'économie et le bilan carbone globale de la bioraffinerie.

Remerciements

Cet article restitue certains résultats obtenus dans le cadre du projet BIOCORE (FP7 contrat 241566). L'ensemble des partenaires du projet sont donc remerciés de leur participation à ce travail et la Commission Européenne est remerciée de sa contribution financière. Enfin, je remercie Aurélie Faure pour ses corrections linguistiques.

Références bibliographiques

- Boerjan W., Ralph J., Baucher M., 2003. Lignin biosynthesis. *Ann Rev Plant Biol* 54, 519–46.
- Delmas M., 2008. Vegetal refining and agrochemistry. *Chem Eng Technol* 31, 792–797.
- Dumon C., Song L., Bozonnet S., Fauré R., O'Donohue M.J., 2012. Progress and future prospects for pentose-specific biocatalysts in biorefining. *Process Biochem* 47, 346–357.
- Granström T.B., Izumori K., Leisola M., 2007a. A rare sugar xylitol. Part I: the biochemistry and biosynthesis of xylitol. *Appl Microbiol Biotechnol* 74, 277–81.
- Granström T.B., Izumori K., Leisola M., 2007b. A rare sugar xylitol. Part II: biotechnological production and future applications of xylitol. *Appl Microbiol Biotechnol* 74, 273–6.
- Klein-Marcuschamer D., Oleskowicz-Popiel P., Simmons B.A., Blanch H.W., 2012. The challenge of enzyme cost in the production of lignocellulosic biofuels. *Biotechnol Bioeng* 109, 1083–7.
- Kumar P., Barrett D.M., Delwiche M.J., Stroeve P., 2009. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Indust Eng Chem Res* 48, 3713–3729.
- Lam H.Q., Le Biogot Y., Delmas M., Avignon G., 1999. La pâte de sorgho sucrier. *La revue du papier carton* 74–75.
- Lapierre C., Pollet B., Ralet M.C., Saulnier L., 2001. The phenolic fraction of maize bran: evidence for lignin-heteroxytan association. *Phytochemistry* 57, 765–772.
- McAloon A., Taylor F., Yee W., Ibsen K., Wooley R., 2000. Determining the cost of producing ethanol from corn starch and lignocellulosic feedstocks. NREL/TP-580-28893, Golden (CO, USA).
- O'Donohue M.J., 2005. Fractionnement de la biomasse lignocellulosique en synthons, in: Colonna, P. (Ed.), *La Chimie Verte*. pp. 21–40.
- Scheller H.V., Ulvskov P., 2010. Hemicelluloses. *Annual review of plant biology* 61, 263–89.
- Toyoda T., Ohtaguchi K., 2009. Xylitol production from lactose by biotransformation. *J Biochem Tech* 2, 126–132.
- Vanholme R., Demedts B., Morreel K., Ralph J., Boerjan W., 2010. Lignin biosynthesis and structure. *Plant physiology* 153, 895–905.
- Wilson D.B., 2009. Cellulases and biofuels. *Curr Opin Biotechnol* 20, 295–299.