

La biomasse, matière première renouvelable d'avenir

Jean-François Rous est directeur de l'Innovation du groupe Sofiprotéol¹ depuis 2010. Sa principale mission est de développer et de conduire la vision Innovation du groupe dans les secteurs de l'énergie et de la chimie durables, de l'alimentation humaine et de la nutrition animale. Dans ce chapitre, il aborde la biomasse en tant que matière renouvelable pour l'énergie.

En abordant la biomasse en tant que matière renouvelable pour l'énergie, un point important à savoir est que l'enjeu de la biomasse est principalement de fournir de la matière alimentaire pour la population. Ce point clé est essentiel pour comprendre les évolutions au cours des âges, et surtout à venir, concernant cette matière première.

Il faut de plus noter que le développement de l'utilisation de la biomasse comme matière première énergétique dans des usages diversifiés est ré-

cent, et que les thématiques qui y sont liées n'ont pas encore atteint leur maturité industrielle.

1 Les grandes évolutions

Sans examiner dans le détail l'historique des grandes évolutions de l'énergie, les quelques points de repère figurés en rouge sur la **Figure 1** montrent que la matière végétale – et l'huile en particulier – est depuis très longtemps utilisée à autre chose

1. www.sofiproteol.com

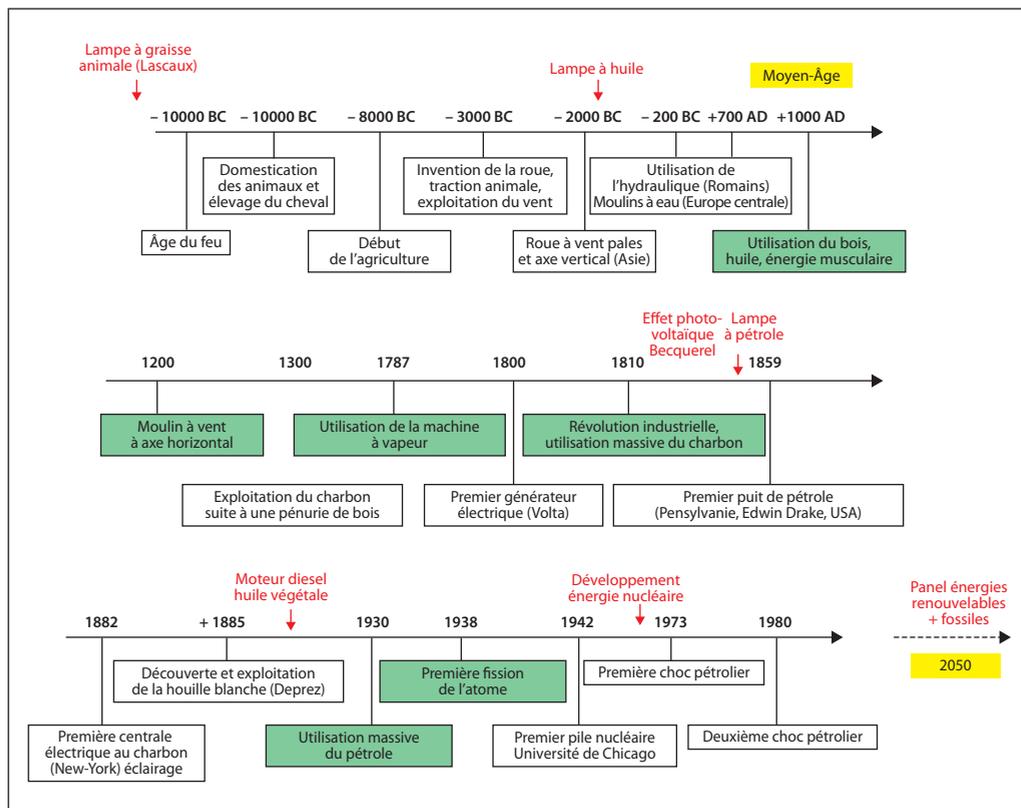


Figure 1

Historique des grandes évolutions de l'énergie.

que juste nourrir les populations.

On s'éclairait déjà avec de la graisse il y a 12 000 ans et il est intéressant de constater que le premier moteur Diesel dans les années 1900 fonctionnait à partir d'huiles végétales et non de carburants fossiles. Faire des biocarburants à partir de l'huile n'est donc pas une invention récente.

De fait, le second biocarburant connu avant l'arrivée du pétrole était l'avoine : 5 millions d'hectares étaient utilisés pour produire l'avoine qui servait de nourriture aux chevaux pour véhiculer les populations, les marchandises. C'est une autre forme de biocarburant, même si elle était utilisée à l'état na-

turel et biotransformée par les chevaux en énergie.

Concernant la transition énergétique à venir, plusieurs autres chapitres de cet ouvrage montrent clairement qu'il sera nécessaire de recourir à un mix énergétique, dans lequel la biomasse interviendra sans faillir à sa mission première qui est de nourrir les gens.

L'évolution des productions des énergies fossiles (elle aussi présentée par d'autres auteurs de cet ouvrage) est rappelée sur la **Figure 2** et montre que, quoi qu'il arrive, ces énergies fossiles auront tendance à disparaître à des horizons plus ou moins lointains.

L'autre élément à prendre en compte (rappelé lui aussi tout

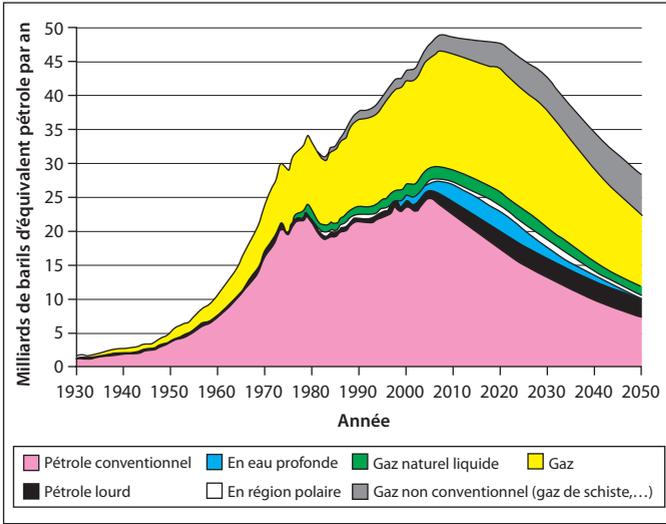


Figure 2

Profils de l'évolution des productions mondiales de pétrole et de gaz.

Source : ASPO (Association for the Study of Peak Oil and Gas) Base Case, 2009

au long de cet ouvrage) est l'accroissement de la population mondiale (Figure 3) qui atteindra plus de 9 milliards d'habitants en 2050. Nous devons donc aussi trouver des solutions pour nourrir cette population qui croît beaucoup plus rapidement que les productions agricoles.

Si l'on considère donc maintenant l'évolution possible des terres cultivées dans les différents pays du monde,

elle est heureusement plus optimiste. On constate sur la Figure 4 que, en 2005, seulement 31 % des terres arables sont cultivées dans le monde et force est de constater que l'on est encore loin d'exploiter toutes les surfaces agricoles potentielles ; mais ce potentiel est géographiquement très différemment reparté et il est en particulier beaucoup plus faible en Europe et en Asie du Sud-Est qu'en Afrique, en

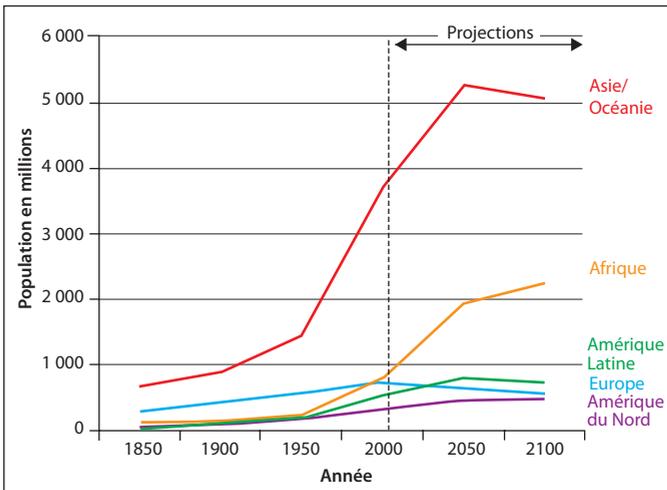


Figure 3

Évolution de la population mondiale par continent.

Source : ONU, World Population Prospect. The 2006 revision population database

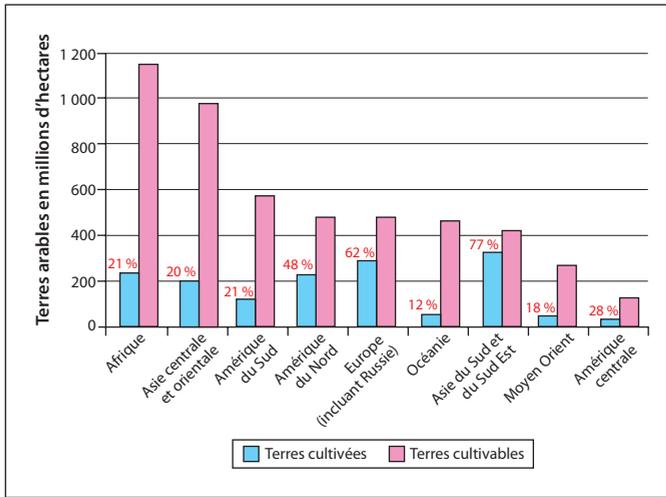


Figure 4

Évolution des terres arables. D'après la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 31 % des terres arables sont cultivées dans le monde en 2005. Écart global : 2 200-2 600 M hectares.

Source : Centre d'étude du MAAP (Mission Agro-Alimentaire Pyrénées)

Asie centrale et orientale ou en Amérique du Sud qui sont des zones sur lesquelles il reste une marge de progrès.

2 Comment augmenter les ressources végétales ?

2.1. Optimiser l'occupation des sols

Le premier facteur sur lequel on peut agir est l'optimisation de l'occupation des sols.

Actuellement, les cultures, représentées en jaune sur la Figure 5, n'occupent que

1 513 millions d'hectares, la majorité des terres arables étant occupée par la forêt et les pâturages. En préservant les surfaces forestières, on dispose néanmoins d'un potentiel considérable en pâturages (3 340 millions d'hectares) sur lequel on pourrait prélever d'ici 2050, 500 millions d'hectares qui seraient transformés en cultures, en intégrant un mode de gestion minimisant les émissions de gaz à effet de serre.

2.2. Accroître les rendements

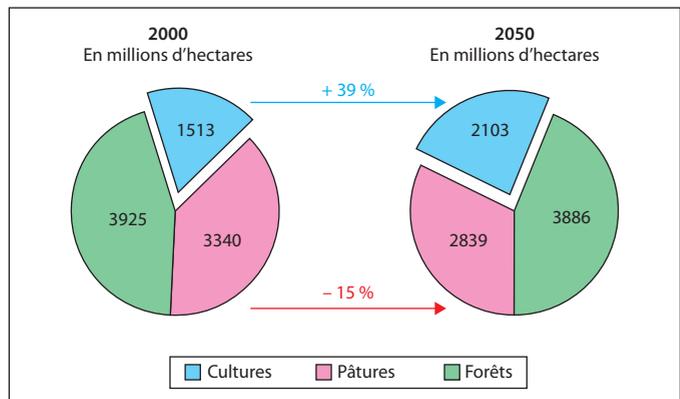
Un autre facteur important sur lequel il est possible d'agir est l'accroissement des rendements.

La Figure 6 montre l'évolution mondiale de rendements pour différentes cultures sur les 45 dernières années. La betterave n'est pas reportée sur ce graphique, car cette culture est spécifique à l'Europe. Elle a pourtant connu une croissance extraordinaire sur les 15-20 dernières années avec un accroissement par 4 de la production, une multiplication par 4 des rendements, tout en ayant diminué par 4 l'utilisation d'intrants.

Figure 5

Potentiel d'optimisation des sols. 500 millions d'hectares (+ 39 %) sont potentiellement transformables en cultures, avec une bonne gestion de l'eau, des fertilisants et une croissance modérée des rendements, tout en préservant les zones naturelles et les forêts.

Source : Agrimonde (2010), scénario 1 (système alimentaire et agricole durable)



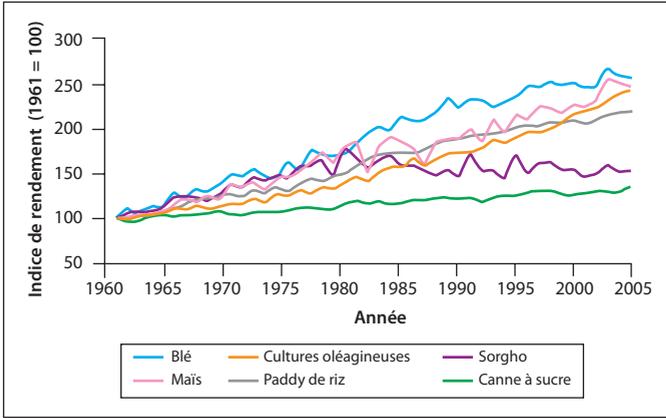


Figure 6

Augmentation du rendement de production à l'hectare pour une gamme d'aliments de base et de plantes à fibres, entre 1961 et 2005. Remarque : depuis 2005, on voit une tendance au tassement.

Source : FAOSTAT, 2007

Ces éléments factuels démontrent la nécessité de prendre en compte des spécificités locales et, par conséquent, les solutions tendant vers la transition énergétique passeront effectivement par un mix, adapté aux logiques et stratégies territoriales. Il s'agit réellement d'un atout que de disposer de filières de productions végétales performantes et dans cet exemple la culture de betterave présente des marges de progrès. La quantité de sucre obtenue par hectare et par an est supérieure à la production de la canne à sucre, qui demande deux récoltes par an. La canne à sucre conserve cependant le leadership au niveau mondial.

On observe globalement depuis quelques années une stagnation des rendements des productions végétales au niveau mondial, probablement en raison de certains aléas climatiques survenus ces dernières années, zone par zone. L'accroissement des rendements est un des grands enjeux pour les semenciers, la recherche et le développement agricole, les producteurs et les organismes agri-

coles. La sélection variétale, la mise en place de nouvelles techniques agronomiques, l'adaptation au changement climatique nécessiteront des efforts considérables dans les prochaines années.

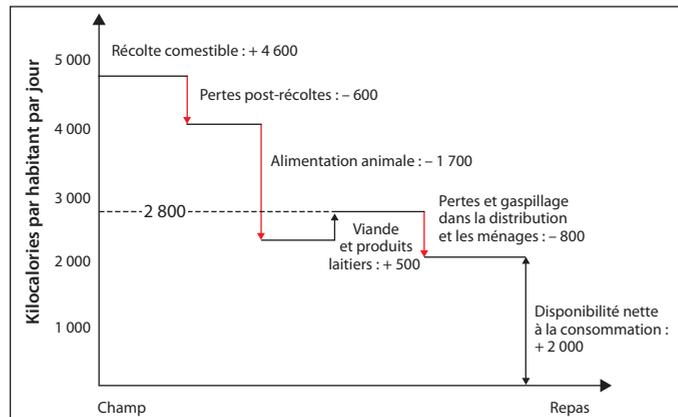
2.3. Réduire les pertes

L'agriculture produit 4 600 kilocalories par être humain et par jour sur la planète. Mais dès la récolte, des pertes de matières interviennent au niveau de la collecte, du transport et du stockage, qui contribuent à réduire cette disponibilité énergétique de 600 kilocalories (Figure 7). La production de protéines

Figure 7

Pertes d'énergie, conversions et gaspillages dans la chaîne alimentaire, du champ à nos repas !

Source : Smil (2000). Illustration : Britt-Louise Andersson, SIWI



animales (régime carné) consomme environ 1 700 kilocalories sous forme d'aliments végétaux et restitue pour l'alimentation humaine de l'ordre de 500 kilocalories. Dans les pays développés, s'ajoute une perte supplémentaire due à la distribution et à la consommation. Le résultat net est qu'il reste 2 000 kilocalories disponibles sur les 4 600 produites au départ (**Figure 7**). On dispose donc d'un potentiel très conséquent d'économie : en récupérant 1 500 kilocalories sur les 2 600 perdues, un grand pas serait fait vers l'amélioration de notre capacité à nourrir la planète.

3 Les grands usages de la biomasse

3.1. L'alimentation, une priorité

Le premier usage de la biomasse est l'alimentation ; la biomasse – et l'agriculture en particulier – sert avant tout à nourrir les populations. Plusieurs scénarios prospectifs sont proposés par les grands organismes pour prévoir les besoins alimentaires du monde en 2050 et en déduire les surfaces à cultiver.

Le premier scénario, celui de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), estime que 90 % des besoins alimentaires seront satisfaits par l'accroissement des rendements. Cela semble difficile, car nous avons vu précédemment que l'on observe maintenant une tendance à une stagnation des rendements pour les grandes cultures. Les 10 % restants seraient couverts par l'augmentation des

surfaces cultivées ; cette prévision est beaucoup plus réaliste : elle ne représente que 70 millions d'hectares, à comparer aux 500 millions d'hectares de pâtures qui pourraient basculer vers la culture.

Le deuxième scénario est proposé par Agrimonde 2050, organisme de prospective mis en place par l'Institut national de la recherche agronomique (INRA). L'analyse semble plus réaliste aujourd'hui en termes de faisabilité, puisqu'il inclut la préservation des zones naturelles forestières et considère un faible accroissement des rendements. Dans ces conditions, l'augmentation des surfaces supplémentaires à cultiver s'élèverait à 336 millions d'hectares, pouvant satisfaire les besoins alimentaires de la population en 2050. Cet objectif est théoriquement possible à atteindre, en comparaison des 500 millions d'hectares potentiellement mobilisables dans ce scénario « délicat ».

3.2. La transition énergétique

L'autre enjeu pour la biomasse concerne son rôle dans le mix énergétique (**Figure 8**). Le débat sur la répartition en 2050 des différentes ressources énergétiques laisse place à de nombreuses hypothèses. Néanmoins, il est admis globalement d'aller vers une diminution de la disponibilité en énergies fossiles, une réduction ou une stagnation de la production d'énergie nucléaire, un développement des ressources en énergies renouvelables, dont partiellement l'utilisation de la biomasse pour couvrir les demandes en électricité, en chaleur, en carburants.

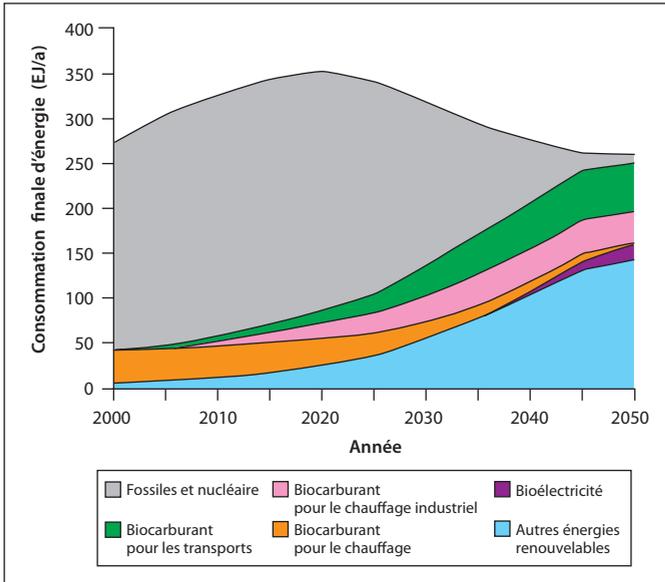


Figure 8

Utilisation mondiale de la bioénergie comparée aux autres sources d'énergie, renouvelables et non renouvelables. Prédiction de la répartition des ressources en énergie pour 2050 :

- énergies renouvelables : pour le GIEC : 77 % (mai 2011) ; pour Ecofys (2010) : 90 % ;
- la biomasse représenterait 40 % du marché de l'énergie.

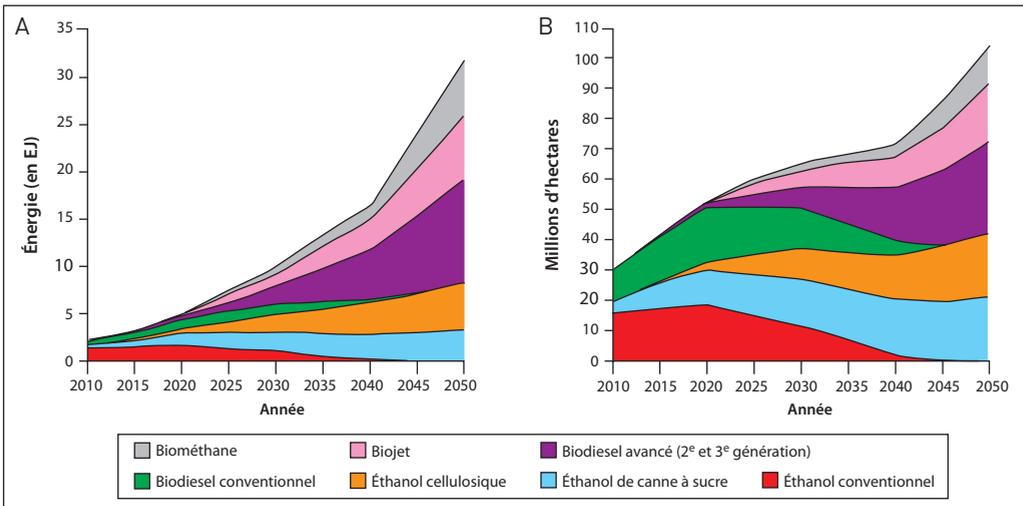
3.3. Les transports : prospective de l'évolution des biocarburants

Dans le cadre des études de l'IEA (International Energy Agency), un rapport prospectif sur l'évolution des biocarburants à l'horizon 2050 a été réalisé, dont les résultats sont résumés sur la **Figure 9A**.

Ce scénario prévoit un accroissement des productions de biodiesel et bioéthanol issus de ressources lignocellulosiques et la disparition du biodiesel ex-huiles végétales et bioéthanol ex-betterave, ex-blé, ex-maïs de première génération. Dans cette prospective, le bioéthanol ex-canne à sucre

Figure 9

Besoins en biocarburants (A) et en terres (B). Besoins de surface pour les biocarburants en 2050 : 58 millions d'ha selon la FAO, 100 millions d'ha selon l'IAE 2008, 224 millions d'ha selon Agrimonde. Source : IEA analysis based on IEA, 2010



poursuit son développement. Actuellement, les biocarburants avancés, bio-jet et bio-méthane sont encore marginaux ou non existants aujourd'hui et représentent des hypothèses de marchés à ce stade.

L'avenir de ces biocarburants s'affirme comme un véritable défi qui exigera un mix de solutions en fonction des usages, associé à un mix de ressources locales de biomasse en qualité et quantité.

À titre d'exemple, pour les futurs biodiesels, la voie de recherche prépondérante aujourd'hui est la voie thermo-chimique dite BTL (*Biomass to liquid*), avec des enjeux considérables de recherche pour les chimistes pour transformer différents types de biomasse en hydrocarbures (voir aussi le [Chapitre de S. Jullian](#)).

3.4. La biomasse : un vaste chantier pour la chimie

Une stratégie consiste à scinder les molécules issues de la nature en monoxyde de carbone et hydrogène, et de les recombinaison pour former des hydrocarbures par une réaction de synthèse dite de type Fischer-Tropsch. Ce procédé est ancien puisqu'il a été développé en 1918 pour valoriser le charbon² sous forme de carburant liquide.

2. Le procédé Fischer-Tropsch permet de produire du pétrole brut de synthèse à partir de charbon ou de gaz, selon une réaction chimique où du monoxyde de carbone CO et de l'hydrogène sont convertis en hydrocarbures $C_n H_{2n+2}$ en présence d'un catalyseur (par exemple à base de fer, cobalt, ruthénium, etc.) : $(2n + 1)H_2 + n CO \rightarrow C_n H_{2n+2} + n H_2O$.

La transformation de la biomasse par cette voie induit de prendre en compte les caractéristiques de la composition organique et minérale de la matière végétale (présence de silice, de chlore...). Il sera nécessaire par exemple de trouver des solutions dans le domaine de la catalyse pour développer des technologies permettant à la fois de purifier efficacement le mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène en amont, et de contrôler la réaction de Fischer-Tropsch ; les catalyseurs actuels ont tendance à vieillir prématurément.

Dans l'optique d'atteindre en 2050 les productions de biocarburants précédemment évoquées, l'enjeu est aussi de soutenir une recherche coûteuse sur ces procédés. On dénombre aujourd'hui dans le monde davantage de projets qui s'arrêtent, que de projets qui démarrent sur ce sujet !

La chimie, qui suit cette étape, est elle aussi un vaste chantier de recherche, si la finalité est de substituer des produits issus de la biomasse au naphta. La [Figure 10](#) en résume à la fois l'intérêt et la difficulté. Le pétrole est constitué principalement de carbone, d'hydrogène, et d'une faible proportion d'autres éléments. La biomasse se compose de carbone, d'hydrogène, mais aussi d'oxygène et d'azote, dans des ratios variables. Par exemple, le glucose comprend autant d'oxygène que de carbone, ce qui induit une approche différente d'une chimie développée à partir du charbon ou du pétrole, pour lesquels les transformations demandent d'apporter de l'oxygène.

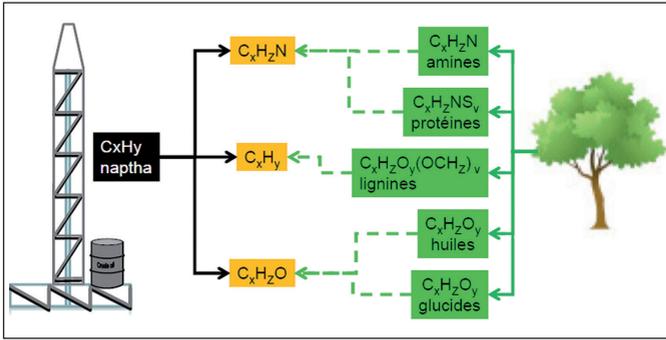


Figure 10

Un vaste chantier attend les chimistes pour remplacer le naphta pétrolier par la biomasse.

Cet apprentissage à « faire des chimies de réduction » devrait viser à revenir aux molécules usuelles de base, voire à développer d'autres types de molécules et par conséquent à mettre au point de nouveaux procédés.

D'autre part, la question se pose de la nécessité de « déconstruire » la biomasse dans sa totalité, pour construire à nouveau et réassembler ensuite les fractions. La biomasse est riche de multiples composants, à extraire et purifier, valorisables comme ressources directes de matières premières dans des types variés de réactions chimiques. Quelles sont les combinaisons les plus prometteuses ?

4 Perspectives du secteur agro-industriel

4.1. La connaissance détaillée des ressources

Il faut admettre parler de « biomasses », en raison de la diversité des ressources et des caractéristiques de la biomasse. Des biomasses agricoles et forestières multiples et variées (plantes entières, graines, résidus de graines,

pailles, plaquettes forestières, branches, troncs...), des biomasses ligno-cellulosiques, des biomasses constituées de déchets fermentescibles d'ordures ménagères... constituent un ensemble disparate très complexe, au niveau national (**Tableau 1**), et encore plus au niveau international.

On attend des acteurs du secteur industriel une connaissance approfondie de ces biomasses, de leurs potentiels, de leurs disponibilités en quantité et qualité, puis d'acquiescer le savoir-faire dans la collecte, le stockage, la distribution – et le développement.

Pour bâtir des stratégies, il revient aux organismes de recherche et de développement d'analyser les potentialités de développement des ressources. De nombreuses études ont été engagées pour identifier les forces et les faiblesses d'une mobilisation des biomasses. Par exemple, la **Figure 11** montre l'efficacité de la photosynthèse pour la production végétale agricole et forestière sur le territoire national. Les zones vertes représentent des conditions climatiques optimales de croissance sur le territoire national. Une stratégie

Tableau 1

Mobilisation massive de la biomasse en respect réglementaire des politiques énergétiques de substitution des énergies d'origine fossile. Tep = tonnes d'équivalent pétrole.

Référence : Claude Roy

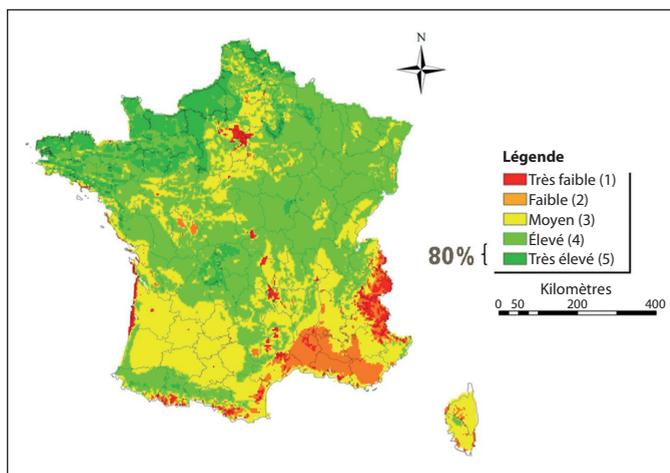
Ressources mobilisables (tep primaires/an)	2008	2020/2030	~ 2050 ?
Bio-déchets	1 M tep	3-4 M tep	6 M tep ?
Déchet industriel banal bois	1,5 M tep	3 M tep	4 M tep ?
Bois bûche	7 M tep	7 M tep ?	7 M tep ?
Plaquettes forestières/élagage	0,2 M tep	3-4 M tep	6 M tep ?
Paille et co-produits agricoles	~ 0	1-2 M tep	1-2 M tep ?
Nouvelles productions dédiées	2 M tep (1 M ha)	5 M tep (2,2 Mha)	4-5 Mha ? (> 10 M tep ?)
Total	~ 12 M tep/an	~ 24 M tep/an	> 35 M tep/an ?

Figure 11

Efficiences de la photosynthèse pour la production végétale en France.

Référence : FranceAgrimer, Observatoire de la biomasse.

Sources : Météo France, 2009. IGN, BD Alti®, MNT 250 m, 2009. IGN, GEOFLA® Départements, 2009. Union européenne – Soes, CORINE Land Cover, 2009. © INFOSOL, INRA Orléans, 1998. Adapté par la Chambre Régionale d'Agriculture du Centre, 2009.



pourrait consister à reconsidérer les productions et l'occupation des sols dans ces régions pour s'orienter vers des cultures plus productives en biomasse.

Le **Tableau 2** fait état du recensement par FranceAgriMer des ressources prévisionnelles mobilisables pouvant être destinées à l'implanta-

tion d'unités industrielles de valorisation, sans porter préjudice aux usages existants.

4.2. Le développement de procédés efficaces

Le secteur agro-industriel doit développer des procédés efficaces pour permettre l'accès aux molécules intermédiaires

Tableau 2

Potentiel annuel de production de biomasse agricole brute en France (potentialité pédo-climatique + accessibilité) :
 – 140 millions de tonnes (intégrant cultures, vignes, pâture...);
 – soit environ 47 millions de tep.

Potentiel annuel de production de biomasse forestière brute en France (potentialité pédo-climatique + accessibilité) :
 – 64 millions de tonnes (pour un stock de 2 000 millions de tonnes);
 – soit environ 19 millions de tep.

tMS : tonne matière sèche ; tMB : tonne matière brute

Ressources			Unité	Volume total produit	Volume supp. Disponible
1. Agriculture	1.01. Cultures dédiées		milliers tMS/an	33	0
	1.02. Résidus cultures annuelles	Pailles de céréales	milliers tMS/an	66 397	7 515
		Pailles d'oléagineux	milliers tMS/an	2 645	1 190
		Cannes de maïs	Milliers tMS/an	5 800	2 900
	1.03. Déchets cultures pérennes	Entretien/ renouvellement vignes	milliers tMS/an	1 750	nd
		Entretien/ renouvellement vergers	milliers tMS/an	646	nd
	1.04. Issues de silo		milliers t/an	439	nd
	1.05. Effluents d'élevage	Fumier	milliers tMB/an	89 647	481 (H1) 89 647 (H2)
		Lisier	milliers tMB/an	180 240	7 500 (H1) 32 140 (H2)
	1.06 Bois de taille haies et alignements		milliers m ³ /an	3 619	1 774
2. Forêts	2.01. Forêts (hors peupleraies)	BIBE	milliers m ³ /an	68 100	28 300
		MB	milliers m ³ /an	13 400	8 100
	2.02. Peupleraies	BIBE	milliers m ³ /an	547	100
		MB	milliers m ³ /an	236	189

Source : FranceAgriMer, Observatoire national des ressources en biomasse 2012

ou aux molécules-briques de base (*building-blocks*), qui seront ensuite utilisées par les acteurs de la chimie comme matière première pour les procédés chimiques existants. Concernant les nouveaux processus de transformation à

développer, deux grandes familles se distinguent : la voie de la thermo-chimie et la voie de la biotechnologie/chimie (**Figure 12**). Le domaine des biotechnologies est en plein essor et la biotechnologie industrielle est en phase de

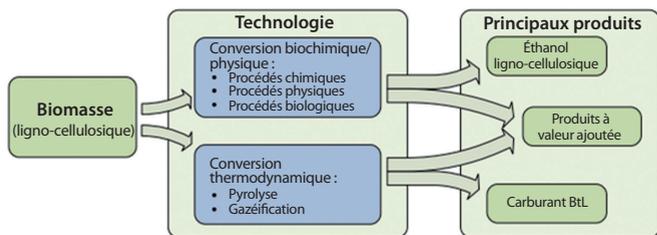


Figure 12

Les deux grandes familles de procédés à développer. Produire en quantité et en qualité la plante la plus adaptée, en jouant sur la sélection variétale, les meilleures conditions agropédoclimatiques tout en permettant de limiter les opérations de conversion (éco-procédés simplifiés) et en étant compétitif sur les marchés.

progression constante depuis une quinzaine voire une vingtaine d'années, avec des perspectives très prometteuses de développement technologique. De nombreuses connaissances restent à acquérir à l'interface entre la biomasse, la production de la biomasse et sa bioconversion ou sa biotransformation en molécules d'intérêt.

L'une des stratégies mise en œuvre vise à cibler le besoin en termes de molécules, afin de rechercher le type de « bioconvertisseur » et la nature de la biomasse à utiliser pour faciliter cette bioconversion. Cette approche nécessite des échanges réels et soutenus entre biochimistes et chimistes, mais aussi en amont, avec les spécialistes de la sélection variétale, de la physiologie végétale, des agronomes et des biologistes.

Le développement des procédés dans ce domaine est en phase de démarrage et il existe en exploitation uniquement deux ou trois unités industrielles de bioconversion dans le monde. Les bioproductions « chimiques » se chiffrent de quelques dizaines à quelques centaines de milliers de tonnes, comparées aux millions de tonnes produites en chimie. Il reste une grande marge de progrès à accomplir avant de disposer d'outils optimisés en biotechnologie industrielle. L'objectif suivant consistera à élaborer

différents produits à partir de la ligno-cellulose et des bio-carburants.

4.3. Fournir les molécules de base pour la chimie

La richesse et la complexité des voies de valorisation de la chimie sont illustrées sur la Figure 13 en prenant pour exemple la biomasse comme matière première. Outre l'origine des ressources en matières végétales, le fractionnement de ces biomasses mettra à disposition des produits intermédiaires tels que des amidons, des celluloses, des hémicelluloses, des lignines, des sucres simples, des huiles (acides gras), des protéines (acides aminés), des composés mineurs...

Les premières transformations conduiront aux *building-blocks*, ces molécules qui vont homogénéiser et standardiser cet ensemble et qui serviront de briques de base à l'industrie chimique pour permettre la préparation de produits déjà utilisés.

On rêverait de synthétiser de nouvelles molécules, mais cette option exigerait de créer de nouveaux outils de transformation en aval. Dans le cas de la conception de biopolymères très novateurs par exemple, cette démarche impliquerait de changer toutes les unités de polymérisation actuelles, ce qui est évidemment non envisageable sur le plan économique. La démarche adoptée consiste à obtenir des monomères similaires à ceux issus du pétrole et exploitables dans les unités de production actuelles.

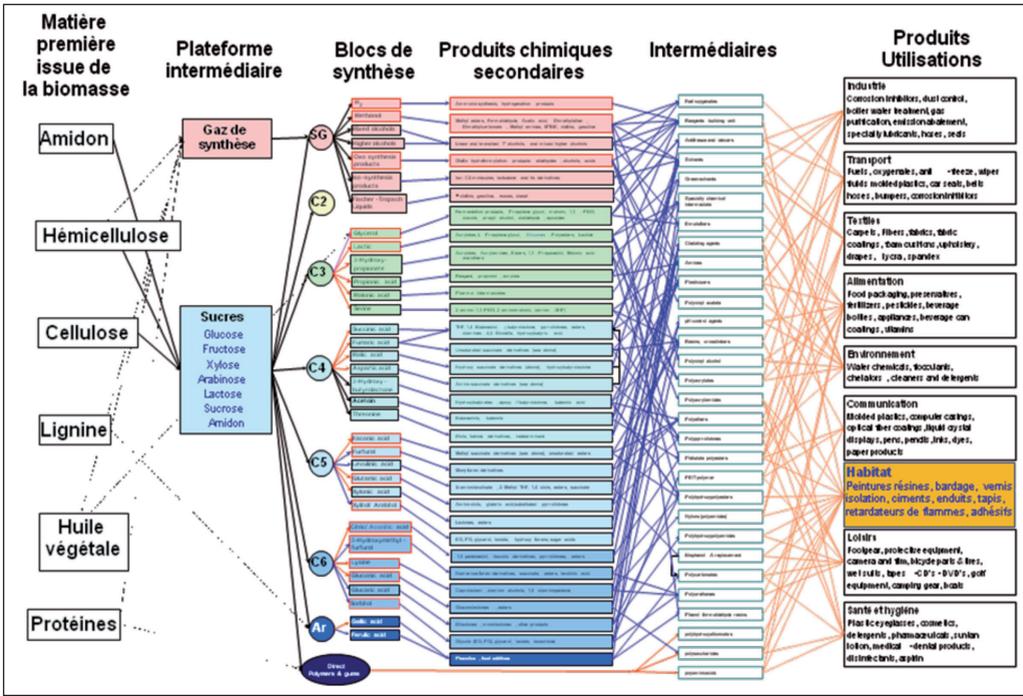


Figure 13

Ce schéma complexe et illisible montre la multitude des voies d'accès à divers produits de consommation à partir de la biomasse.

Source : DOE (Department Of Energy, États-Unis).

L'enjeu économique est considérable et la connaissance se limite aujourd'hui à une partie infime (quelques pourcents) de ce qui pourrait être conçu comme briques de base. L'aventure de la chimie du végétal ne fait que commencer !

de mieux concilier les productions de biomasses à usages alimentaires et industriels. Au niveau national, le potentiel global biologique est de 140 millions de tonnes par an, ce qui représente un équivalent énergétique de 47 mil-

4.4. Concilier les usages alimentaires et industriels de la biomasse

La **Figure 11** montrait l'efficacité de la photosynthèse pour la production végétale, c'est-à-dire l'intégralité de la biomasse en France. La **Figure 14** montre de la même façon l'efficacité de la photosynthèse, mais cette fois spécifique pour l'agriculture, les zones vertes étant celles d'efficacité maximum.

Les zones vertes sont notamment concentrées au nord d'un axe ouest-centre au nord-est. Comme mentionné précédemment, une optimisation dans la gestion de l'occupation des sols est susceptible

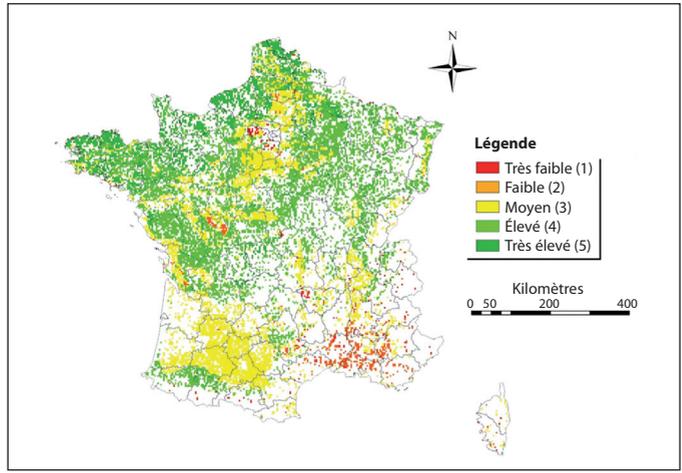


Figure 14

Efficacité de la photosynthèse pour l'agriculture française.
Sources : Météo France, 2009. IGN, BD Alti®, MNT 250 m, 2009. IGN, GEOFLA® Départements, 2009 ; Union européenne – Soes, CORINE Land Cover, 2006 ; © INFOSOL, INRA Orléans, 1998.

lions de tonnes équivalent pétrole (tep). Ce potentiel représenté par la biomasse est significatif si on le compare à nos consommations énergétiques actuelles, soit :

- 135 millions tep/an d'énergie fossile ;
- 112 millions tep/an d'électricité ;
- 17 millions tep/an d'énergies nouvelles renouvelables.

Il est raisonnable d'envisager de consacrer un certain pourcentage de l'usage de la biomasse nationale pour des applications chimiques et énergétiques, tout en sachant que l'essentiel concerne les besoins pour l'usage alimentaire.

4.5. L'utilisation multi-usage des oléagineux

Un exemple de l'utilisation multi-usage de la biomasse est illustré par la filière de valorisation des productions oléagineuses, assez représentative de ce que le secteur agroindustriel peut être amené à faire. Le **Tableau 3** donne les chiffres pour la France, l'Union européenne et le monde, des surfaces utilisées pour la culture des oléagineux, ainsi que ceux de l'évolution comparée sur les dix dernières années des surfaces consacrées à la production d'huile et de tourteaux pour l'alimentation animale.

L'Europe est actuellement très dépendante de l'importation des protéines à usage alimentaire animal, qui représentent 75 % de ses consommations essentiellement sous forme de tourteaux de soja. Ils proviennent majoritairement des États-Unis et de l'Amé-

rique du Sud, qui s'y substitue de plus en plus. L'engagement européen est de développer la production européenne de protéines. La France a pris la décision de s'organiser au niveau national, en développant la production du colza contenant à la fois de l'huile (environ 45 % dans la graine) et des protéines (environ 25 % dans la graine et 40 % dans le tourteau), autrefois utilisée pour la nourriture des porcs. La valorisation de l'huile était économiquement indispensable pour parvenir à des équilibres financiers. Suite aux travaux de mise au point de biocarburant en collaboration avec l'Institut français du pétrole (IFP), le groupe Sofiprotéol a pris la décision, dès 1992, d'installer la première unité industrielle de production de biodiesel au monde produisant sur le site de Compiègne 20 000 tonnes d'ester d'huile végétale à partir du colza. Aujourd'hui, le Groupe produit deux millions de tonnes de diester et environ 2,6-2,7 millions de tonnes de protéines, qui se substituent aux importations. La France fait figure de cas à part au niveau européen car la dépendance a été réduite de façon drastique (passage de 75 % à moins de 50 %). Les partenaires européens sont toujours fortement importateurs de protéines de soja, partiellement OGM.

Cet exemple illustre l'intérêt de développer le multi-usage, le multi-marché : le développement d'un produit tel que le biocarburant a permis de conforter la disponibilité en protéines, qui était la production ciblée initialement. À cette

Tableau 3

Surfaces d'oléagineux, production d'huile et de tourteau : évolution 2001-2011.

Source : Oil World. Unité : Mn ha, MnT 2001/02.

		2001/02			2011/12		
		Surface	prod. huile	prod. tourteau	Surface	prod. huile	prod. tourteau
Colza	France	1,08	0,59	0,75	1,56	1,75	2,28
	UE-27	4,09	4,32	5,93	6,72	8,94	12,07
	Monde	23,87	13,46	20,27	33,16	23,64	33,68
Tournesol	France	0,71	0,47	0,6	0,74	0,69	0,85
	UE-27	3,48	2,03	2,61	4,21	2,9	3,64
	Monde	18,44	7,45	8,64	25,65	14,63	16,24
Soja	UE-27	0,45	3,27	14,04	0,43	2,11	8,99
	Monde	79,72	29,44	127,04	103,37	41,27	177,48
Palme	Monde	7,19*	25,07		13,31**	51,49	

*2000-01, **2010-11

Déficit en protéines (bilan MRP-source UNIP)			Production de biodiesel MnT Source : CPDP/EBB			
	France	UE		France	UE	
1980-81	71 %	78 %				
1990-91	31 %					
1993-94		69 %				
2003-04		76 %	2004	0,323	1,933	
2005-06	45 %	74 %	2006	0,567	4,074*	
2007-08	53 %	73 %	2008	2,085	7,755	
2010-11	40 %	68 %	2010	2,12	9,57	
			2011	1,695	nc	

*consommation

Consommation de tourteaux. Source : Oil Word – Unité : MnT								
		1981-	1990-	1993-94	2003-04	2005-06	2007-08	2010-11
Colza	France*	0,23	0,71	0,7	1,17	1,72	2,34	2,45
	UE**	1,84	4,27	4,77	6,3	8,61	10,87	12,52
	Monde	7,04	14,06	15,28	22,01	26,94	28,84	33,87
Tournesol	France*	0,14	0,68	0,74	0,78	0,71	0,61	1,02
	UE**	1,79	3,8	3,72	5,01	4,53	3,79	5,44
	Monde	5,98	9,82	9,12	11,01	12,06	11,48	14,03
	France*	3,69	3,58	4,24	4,45	4,2	4,59	3,76
	UE**	19,35	20,48	22,51	33,89	33,82	36,52	32,61
	Monde	56,93	70,34	80,69	133	146,55	159,76	174,94

*2000-01, **2010-11

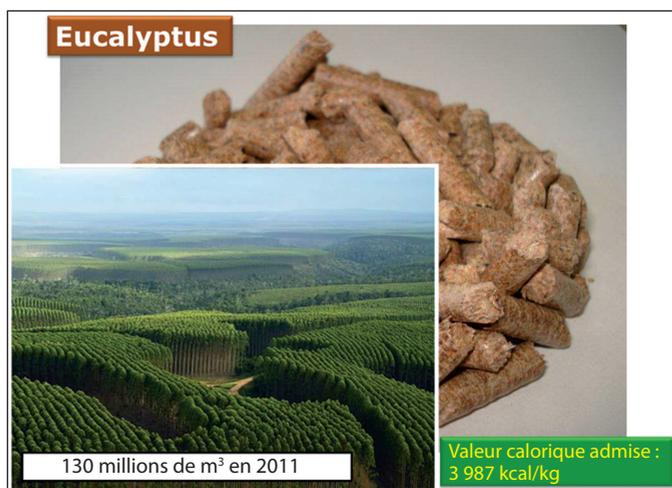
période, l'huile de colza était impropre à la consommation humaine en raison de la présence dans sa composition d'acide érucique et de facteurs anti-nutritionnels. Les semenciers ont sélectionné des plantes plus adaptées à des usages alimentaires et selon les derniers rapports de fin 2010, cette huile est remarquable par sa valeur nutritionnelle. Le cheminement de la production des protéines, du biodiesel est parvenu à créer une nouvelle variété de colza qui est aujourd'hui une matière alimentaire de grande qualité ! Cet exemple est remarquable des possibilités de créativité entre les sciences et l'économie.

Malgré des qualités nutritionnelles reconnues, la consommation alimentaire d'huile de colza atteint aujourd'hui 100 000 tonnes en France, pour une consommation totale de 600 000 tonnes (huiles de tournesol, olive...). Cette situation ouvre le champ de nouvelles valorisations de l'huile de colza, en particulier dans le domaine de l'oléochimie.

Figure 15

L'eucalyptus au Brésil.

Source : Columbia, Vinicius Casseli, AEBIOM 2012



5 Quelques exemples de biomasses mobilisables

L'eucalyptus au Brésil, l'acacia dans le Sud-Est asiatique sont maintenant des espèces extensivement exploitées (*Figure 15*).

La culture de canne à sucre, bien connue pour ses divers usages, dispose de résidus végétaux (feuilles et panicules), non encore utilisés. Le potentiel de ressources est considérable. Actuellement, on produit 620 millions de tonnes de sucre, et la « bagasse³ » représente un « réservoir » de 155 millions de tonnes, dont 34 millions de tonnes de feuilles et panicules (*Figure 16*).

L'huile de palme est extraite des fruits du palme (*Figure 17*), dont la production mondiale est de 155 millions de tonnes. La Malaisie et l'Indonésie en sont les producteurs les plus importants. Lorsque le palmier est en phase de croissance, les feuilles sont élaguées (que l'on appelle les fonds) et, à l'issue de l'exploitation, les troncs sont considérés comme résidus de culture (coupés tous les 25-26 ans). Cette ressource représente 60 millions de tonnes de biomasse ligno-cellulosique par an, uniquement pour ces deux pays, et elle est peu valorisée aujourd'hui. À cela s'ajoutent 32 millions de tonnes de résidus d'exploitation constitués par la matière cellulosique, après récupération de l'huile.

3. La bagasse est le résidu fibreux de la canne à sucre après passage au broyeur et extraction du sucre. Elle est composée principalement par la cellulose de la plante.

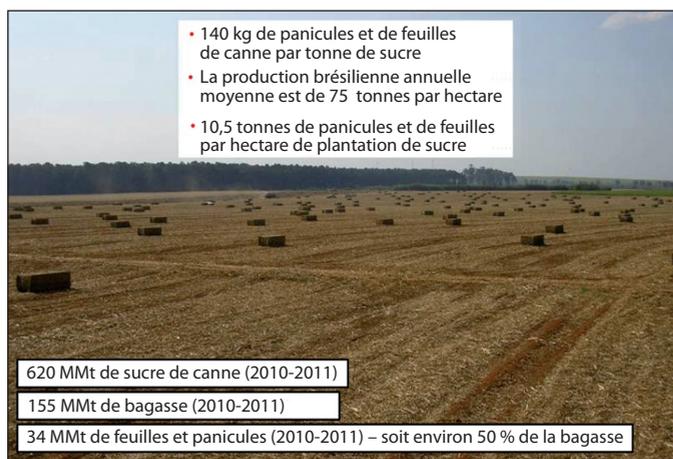


Figure 16

La culture de la canne à sucre.
 Source : Columbia, Vinicius Casseli, AEBIOM 2012



Figure 17

La Malaisie et l'Indonésie sont les plus gros producteurs d'huile de palme.

6 Optimisation de l'exploitation de la biomasse : les verrous pour l'avenir

6.1. La mobilisation à grande échelle des efforts de production

La diversité des sources de biomasse existantes, la diversité des espèces, les larges étendues des bassins de production, la difficulté d'organisation des collectes ont été évoquées. Par ailleurs, l'émergence de filières va nécessiter l'adaptation d'un machinisme agricole et forestier, des équipements

de stockage et de manutention, voire de moyens de transport. Des équipes aux États-Unis travaillent par exemple sur des méthodes permettant de récupérer en même temps les grains de maïs, les rafles, les tiges, les feuilles, en un seul passage au champ. Des travaux de recherche et développement sont menés activement pour optimiser la production conjuguant hauts rendements, durabilité, écologie. Il s'agit d'améliorer les niveaux de production de la biomasse, d'accroître les qualités variétales, d'optimiser les itinéraires techniques

dans le sens des économies financière, énergétique, de consommation de fertilisants et produits phytosanitaires, d'améliorer les bilans environnementaux. Il convient notamment de réfléchir à la manière de gérer très efficacement les intrants – principalement les engrais azotés – qui sont à la source d'émission de protoxyde d'azote (N_2O), gaz à effet de serre puissant, comparable à celui du méthane CH_4 .

Il y a lieu de développer également les outils de modélisation : économie et intermodalité, éco-calculateurs, critères d'implantation d'unités (aménagement), gestion des ressources (eau, intrants...). Dans l'économie de ces filières, la part des dépenses logistiques est très conséquente et mérite un intérêt tout particulier. La densification des matières (technologie de compactage), le stockage et la conservation des matières premières, les équipements de collectes, les moyens de transport (routier, ferroviaire, fluvial), la standardisation des produits pour une offre industrielle... sont autant de voies à explorer dans une approche intégrée.

6.2. Le développement de la chimie du végétal

La chimie du végétal a été largement décrite dans *Chimie et nature*, autre ouvrage de cette collection (notamment dans les articles de Pierre Monsan et de Christophe Rupp-Dahlem). Le **Tableau 4** résume quelques enjeux de recherche et développement actuels de

la chimie du végétal⁴. L'une des difficultés à résoudre est l'optimisation des procédés en vue de produire des molécules à des prix compétitifs par rapport à ceux obtenus à partir de la matière première fossile. L'industrie chimique traditionnelle a mis plus de cinquante ans pour se mettre en place ; la chimie du végétal est récente, elle progresse, avec des enjeux décisifs en termes de recherche et développement.

6.3. L'exemple de la chimie des lignines

Le niveau des efforts consentis aujourd'hui au niveau mondial dans ce domaine peut être illustré par l'exemple des lignines (**Tableau 5**). La première colonne de ce tableau indique l'état d'avancement des technologies. On constate que le nombre de technologies bien développées (H) est encore très limité, alors que dans la seconde colonne « Difficultés attendues », le nombre est encore élevé dans beaucoup de cas. La colonne « Volume du marché » aide à bien cibler les produits dérivés sur lesquels doivent porter les efforts. Ce type de tableau peut être réalisé sur tous les types de biomasse et permet d'imaginer les progrès à réaliser dans l'innovation.

4. La chimie du végétal a été largement décrite dans l'ouvrage *La chimie et la nature*, Chapitres de P. Monsan et C. Rupp-Dahlem. Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Danièle Olivier et Paul Rigny, EDP Sciences, 2012.

Tableau 4

Les enjeux de la R&D en chimie du végétal.

	Substitution	Nouvelles molécules	Intermédiaires de synthèse
Caractéristiques	Compétition directe avec les mêmes produits, déjà en place, issus du fossile	Délivre des propriétés nouvelles et/ou améliorées par rapport au produit existant délivrant la même fonctionnalité, ou nouvelle application	Permet d'accéder à des multiples produits à partir d'un même « intermédiaire »
Exemples	Acide acrylique obtenu à partir du propylène ou de l'acide lactique MPG, épichlorhydrine obtenu à partir de la glycérine ou du propylène	Acide polyactique (PLA)	Acide succinique, lévulinique, glutamique Glycérol Syngas
Aspect positifs	Marchés existants Compréhension des coûts de structure du marché et des potentiels de croissance Risque marché limité	Nouveau produit avec de nouvelles propriétés, donc le coût a une moindre importance Pas de concurrent issu du fossile Différentiation faite sur la performance Nouvelles opportunités de marché Meilleur usage fait des spécificités de la biomasse	Différents marchés potentiels, donc risques moindres Croissance des marchés potentiels Diversification du coût du capital Combine les avantages de la substitution et des nouvelles molécules
Verrous	Compétition uniquement sur les coûts et contre des produits à coût de capital amorti (<i>versus</i> nouvelles installations) Très peu de différenciation du fait du label « biosourcé »	Marché potentiels non clairement établis Risque en capital très élevé « TTM » peut être long	Dispersion des efforts de R&D Dispersion du aux nombreux constituants de la biomasse

7 Biomasse et enjeux énergétiques

Afin d'assurer la transition énergétique dans le mix énergétique mondial, il faudra consacrer de l'ordre de 500 millions d'hectares à la production de biomasse.

L'utilisation prévisionnelle vers les secteurs de l'énergie et des matériaux est présentée sur la **Figure 18**.

L'accroissement des terres cultivées concernera principalement des zones géographiques telles que l'Afrique

Tableau 5

Produits qui peuvent être obtenus à partir de la lignine et niveau d'effort consenti dans le monde : H = Haut (bien développé) ; M = Modéré (développement partiel) ; B = Bas (besoin d'efforts intensifs) ; ? = inconnu ; NA = ? non accessible.

Produits dérivés de la lignine	État actuel de la technologie	Difficultés attendues	Volume du marché	Valeur marchande	Risque du marché	Utilité comme bloc de synthèse	Lignine attendue en mélange
Syringols	B	H	?	M-H	?	?	oui
Coniférols	B	H	?	M-H	?	?	oui
Gaiacols	B	H	?	M-H	?	?	oui
<hr/>							
Vaniline	H	B	L	5,90 \$/livre	H	B	non
Acide vanilique	M	M	?	?	H	?	?
DMSO	H	B	M	< 1 \$/livre	H	B	non
Acides aromatiques	B	H	H	0,40-0,50 \$/livre	B	H	oui
Acides aliphatiques	B	H	H	0,45-0,65 \$/livre	B	M-H	oui
Syringaldéhyde et aldéhydes	B	H	?	?	M-H	M	oui
Quinones	B	H	L-M	> 1 \$/livre	?	B	?
Cyclohexanol/al	B	H	H	> 0,75 \$/livre	B	H	oui
Bêta céto-adipate			?	?	H	M	?
<hr/>							
Fibre de carbone	B-M	M-H	H	Objectif : 3-5 \$/livre	M	B	non
Polyélectrolytes	B-M	M	M	1,5-3 \$/livre	M-B	M	oui
Alliages polymères	B-M	M	?	1-2 \$/livre	M	NA	oui
Charges, allongeurs de polymères	M	H	M	< 1 \$/livre	M-H	NA	oui
Lignines polysubstituées							
Carbonylées	B	H	?	?	M-H	?	oui
Éthoxylées	B	M	B	1,50-2,50 \$	M-H	?	oui
Carboxylées	B	M	B	1,50-2,50 \$	M-H	?	oui
Époxydées	B	H	?	?	M-H	?	oui

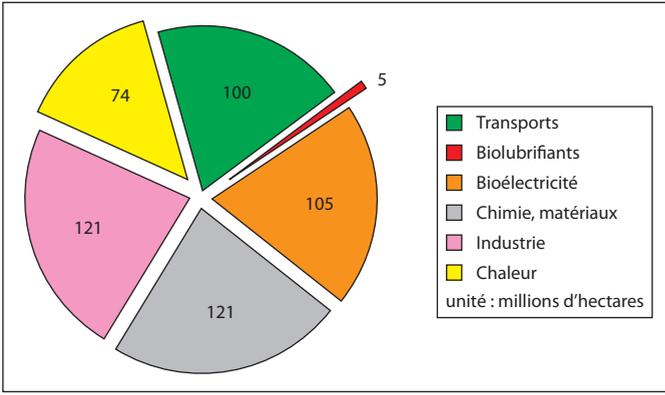


Figure 18

Les besoins hors alimentaires pour 2050.
Scénario IEA 2008 : 525 millions d'hectares.

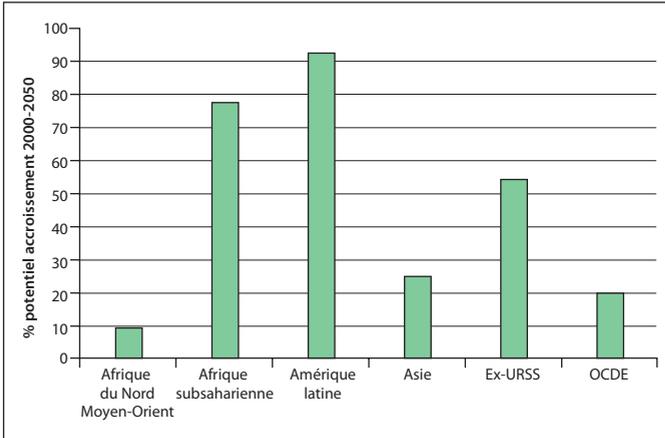


Figure 19

Potentiel d'accroissement entre 2000 et 2050. Cultures : + 39 % = 500 millions d'hectares ; pâtures : - 15 % ; forêts : - 1 %.

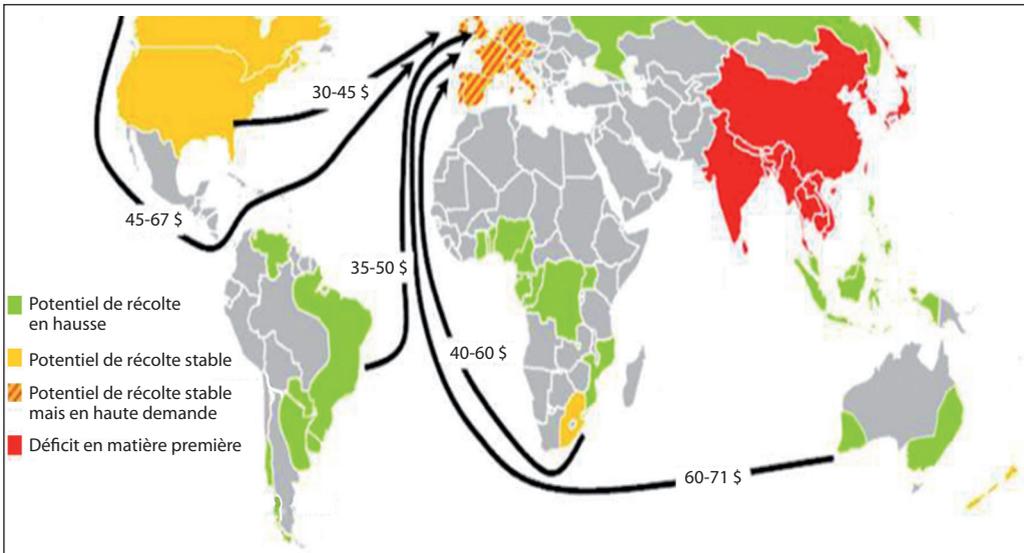


Figure 20

Flux prévisibles des échanges mondiaux en dollars américains.

Source : POYRY, Enviva data

sub-saharienne, l'Amérique latine, mais aussi de l'ex-URSS (*Figure 19*).

Dans ce cadre, la *Figure 20* montre l'évolution à prévoir des terres cultivées sur la planète et les flux d'échanges qui en résulteraient. Il est important de noter que le coût de la matière première n'a pas été pris en compte dans ces calculs. Il serait probablement antiéconomique d'importer de la biomasse en provenance

d'Australie pour fournir de l'énergie en France !

Un autre point à noter est que la Chine et l'Inde sont les seuls pays où la biomasse apparaît déficitaire. La consommation d'huile est en train d'exploser en Chine, et d'une façon générale, ce pays attire toutes les matières agricoles de la planète. Pour faire face à ce déficit, les Chinois ont pour stratégie d'acquérir des terres en Afrique.

Nous avons de la biomasse, il faut en faire un bon usage pour protéger notre indépendance alimentaire et assurer notre transition énergétique.

La biomasse est, et sera, multi-usage : il est indispensable de réfléchir aux « synergies d'usage » des productions.

Des matières abondantes et très diversifiées sont à gérer.

Il faut amplifier la mobilisation et optimiser la logistique, le prétraitement et la standardisation (normalisation).

Il faut construire des filières durables et consolider les outils de définition des prix.

Des caractéristiques physico-chimiques variées sont à mettre en adéquation avec les usages.

Il faut développer une synergie des initiatives locales et des unités de grandes capacités énergie/chimie/matériau dans la conception de bioraffineries.