

Les Biocarburants, situation, perspectives

C. Acket

1) Introduction

Les carburants d'origine végétale ont représenté une part significative de la consommation des transports jusqu'aux années 50, avant d'être négligés et quasiment abandonnés, en raison de la concurrence économique du pétrole. Pour la mobilité, qui repose à plus de 97 % sur le pétrole et est le poste de consommation énergétique en plus forte expansion, les biocarburants ne couvrent que moins de 1 % des besoins pour le monde entier comme en France.

Si les biocarburants demeurent encore pénalisés par un coût de production élevé, l'accroissement récent du prix du baril de pétrole au-delà des 70 \$, permet d'envisager un avenir prometteur, en substitution au pétrole au moins en partie et ainsi diminuer la dépendance et limiter les rejets de gaz à effet de serre. La Communauté Européenne a ainsi proposé en 2003, qu'en 2010, les biocarburants puissent contribuer pour 5,75% à l'approvisionnement énergétique des transports terrestres. Mais il faudrait aller beaucoup plus loin pour que les biocarburants jouent un rôle significatif dans la réduction des rejets de gaz carbonique, notamment pour viser le facteur 4 en 2050.

Le sujet est particulièrement d'actualité et ce fort développement est accueilli avec enthousiasme par la grande majorité de la population qui pour beaucoup y voit la réponse à tous les problèmes : « grâce aux biocarburants on continuera à se déplacer librement et on ne touchera pas à la sacro-sainte auto ! ». Toutefois des voix se font entendre notamment pour l'affectation des terres agricoles « il faudra choisir : se nourrir ou se déplacer » et pour l'affectation des ressources de la forêt pour lesquelles de même « se chauffer ou se déplacer » Certains écologistes craignent même que l'exploitation intensive de la biomasse porte atteinte à l'environnement « au seul bénéfice des embouteillages dans les villes et des bouchons sur les autoroutes ».

Nous essayerons de faire le point, en sachant que dans ces filières techniques en plein développement, rien n'est définitif et que des nouvelles découvertes et mises au point peuvent modifier en élargissant les perspectives.

2) Situation actuelle de l'emploi des biocarburants et objectifs à court terme

L'emploi des biocarburants actuel, sous ses 2 formes : éthanol (équivalent essence) ou bio-diesel, peut se définir comme anodin, à la fois par la faiblesse relative des quantités en jeu et aussi par son caractère semi-confidentiel, puisque souvent le biocarburant est incorporé en faible quantité, mélangé au produit pétrolier sans information de l'utilisateur (distribution banalisée)

Seul au niveau mondial le Brésil se distingue. Dans ce pays aucune voiture ne fonctionne à l'essence seule. Globalement avec 14 Millions de m³ d'éthanol, ce sont plus de 30 % des transports qui reposent sur l'éthanol tiré de la canne à sucre. Les voitures utilisent soit de l'éthanol pur, soit un mélange de 24% d'éthanol dans l'essence, soit des mélanges variables allant jusqu'à 85%. Aux Etats Unis la production d'éthanol est importante dans l'absolu et assez proche de celle du Brésil avec plus de 10 Mm³ fabriqués (à partir de maïs) mais ceci reste insignifiant à l'échelle du parc automobile de ce pays.

En France le pourcentage d'utilisation de biocarburants dans les transports est proche de 1 % avec la répartition suivante pour les 2 filières :

- 0.7 % du volume d'essence sur un total annuel de 17 Mm³
- 1.1 % du volume de gazole, sur un total annuel de 35.3 Mm³

Cette utilisation est discrète, puisque l'éthanol peut être incorporé sans indication à la pompe, directement jusqu'à 5% dans l'essence et indirectement sous forme d'ETBE à raison de 15% de ce produit constitué pour moins de moitié d'éthanol. De même dans la filière gazole 5% de bio-diesel, sous forme de EMHV (90% de biocarburant) peuvent être incorporés sans indication. A ceci s'ajoute le cas de l'incorporation jusqu'à 30 % d'EMHV, mais l'utilisation se limite à quelques flottes captives, notamment d'autobus.

Dans le cadre de l'Union Européenne, une directive pose les bases pour développer les biocarburants de façon qu'ils représentent 5.75 % du contenu énergétique des carburants en 2010, soit plus de 5 fois plus

qu'actuellement. Il faut noter qu'une première directive prévoyait, pour 2005, l'incorporation à 2%, valeur qui ne fût pas obtenue. Mais l'accroissement récent du prix du baril, la sensibilisation grandissante à l'effet de serre, pourraient donner plus de chance au respect de cette nouvelle directive pour 2010.

3) Les filières actuelles dites de première génération

3.1 L'éthanol et l'ETBE

Les plantes dites sucrières, comme la betterave, la canne à sucre, renferment des sucres, directement fermentescibles en éthanol. Les plantes céréalières comme le blé, le maïs, l'orge, les tubercules (pommes de terre ...) renferment des sucres sous forme d'un polymère : l'amidon qui doit être hydrolysé (hydrolyse enzymatique) pour produire du glucose qui sera fermenté. Le processus de fermentation du glucose en éthanol est illustré par l'équation chimique suivante : $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 C_2H_5OH + 2 CO_2$

De nombreuses espèces de microorganismes ont la capacité de produire de l'éthanol à partir de sucres, parmi lesquelles les levures du genre *Saccharomyces*. L'éthanol obtenu doit être déshydraté, opération réalisée essentiellement par distillation ce qui est très consommateur d'énergie. Par exemple, pour la betterave, partant du jus pour obtenir 1 litre d'éthanol qui représente un potentiel énergétique de 21 MJ, il faut actuellement dépenser 6.6 MJ sous forme de vapeur et d'électricité, soit 1/3 de l'énergie finale. Pour le blé cette dépense énergétique se monte à 12 MJ, soit la moitié de l'énergie finale. A ces consommations liées à la distillation, il faut ajouter d'autres dépenses énergétiques de moindre importance (transports, broyages) et aussi celles associées à la culture. Il faut noter que des recherches sont en cours pour développer de nouvelles techniques permettant de réduire ces postes de dépenses énergétiques.

Production d'éthanol

Le Brésil produit ainsi plus de 12 Mm³ par an d'éthanol à partir de la canne à sucre¹, les Etats Unis plus de 10 Mm³ à partir du maïs. En France les deux-tiers de la production d'éthanol 60.000 t (75.000 m³) viennent de la betterave à sucre le reste 36.000 t étant fabriqué à partir du blé.

Les productions d'éthanol mesurées en m³ à l'hectare et évaluées en énergie brute à l'hectare (hors besoins pour l'exploitation agricole, les transports et opérations industrielles en fabrication) sont :

- la canne à sucre : 7 à 8 m³ / ha soit 3.5 à 4 tep / ha
- la betterave : 6.5 à 7 m³ / ha soit 3.3 à 3.5 tep / ha
- le blé : 2.7 à 3.1 m³ / ha soit 1.4 à 1.6 tep / ha
- le maïs : 2.9 à 3.4 m³ / ha soit 1.5 à 1.7 tep / ha

Bien que le blé produise moins à l'hectare que la betterave, il présente l'avantage de pouvoir être travaillé toute l'année (stockage à sec) ce qui n'est pas le cas de la betterave disponible 2 mois par an.

Le calcul de la production énergétique nette doit prendre en compte l'ensemble du cycle, avec la part principale liée à l'énergie dépensée pour la distillation, mais également les autres dépenses du cycle ainsi que celle associée à la seule culture (estimation entre 0.2 et 0.4 tep / ha pour les machines agricoles, transports, engrais...) Pour la canne à sucre, une grande part de l'énergie est fournie par le sous produit : la bagasse brûlée avec production de vapeur et d'électricité. Pour le blé et la betterave, il y a en totalité appel à de l'énergie extérieure, conduisant à des productions énergétiques nettes beaucoup plus faibles.

La détermination du rendement net conduit à des résultats très différents selon la façon d'affecter une partie de l'énergie dépensée aux sous produits ou co-produits (voir Annexe 1 et réf 1) Ces co-produits sont très importants en quantité et pour une tonne de biocarburants, ils peuvent représenter par exemple de 1 à 2 tonnes utilisables pour nourrir les animaux. Le résultat net sera donc très différent selon que l'on affecte la totalité de l'énergie dépensée au seul produit éthanol ou, au contraire, si on affecte la dépense énergétique proportionnellement aux masses de tous les produits (prorata des masses) Avec cette dernière règle, on peut ainsi, ne prendre en compte qu'entre le tiers et la moitié des dépenses énergétiques totales et les productions énergétiques nettes approchent ainsi 1 tep / ha dans le cas du blé et du maïs. Par contre si on affecte la totalité des dépenses énergétiques (voir réf 4) dont la distillation au seul éthanol, la production tombe à des valeurs très basses, conduisant même certains à trouver pratiquement zéro pour le

¹ 5 Millions d'hectares sont au Brésil dédiés à la canne à sucre, un peu moins de la moitié étant orientée vers la fabrication d'éthanol

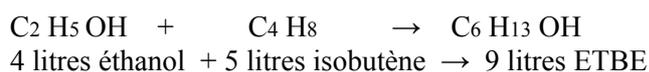
blé, affirmant qu'il serait préférable d'utiliser directement son potentiel d'énergie thermique, plutôt que de l'utiliser dans la filière biocarburants. Bien que la règle du prorata massique soit très souvent mise en avant, par des organismes officiels, elle ne reflète guère la réalité, car on pourrait nourrir directement les animaux sans dépenser l'énergie de distillation par exemple. Sans affecter la totalité des dépenses énergétiques au biocarburant, une autre approche dite de substitution a été utilisée, qui ne retenant que les dépenses nécessaires à la fabrication directe des sous produits, semble plus représentative de la réalité (voir réf 1 et 3)

Le tableau ci dessous (chiffres à ne prendre qu'à titre indicatif) montre que les évaluations sur le réel potentiel des biocarburants de la filière éthanol peuvent être très différentes.

	Prod. brute tep / ha	Prod. nette (prorata masse) tep/ha	Prod nette (substitution) tep/ha
Betterave	3.5	2.01	0.67
Blé	1.6	0.92	0.19

L'ETBE

Si chez les principaux producteurs, Brésil et USA, l'éthanol est directement incorporé à l'essence, en Europe (sauf en Suède) l'éthanol est transformé en ETBE (Ethyl Tertio Butyl Ether) avant d'être mélangé à l'essence. Ce choix de l'ETBE vise à corriger les problèmes posés par l'éthanol mélangé à l'essence (accroissement de la volatilité, miscibilité à l'eau et compatibilité avec certains matériaux) L'ETBE est obtenu sur la base de la réaction :



L'isobutène est issu de l'isomérisation du butane donc d'origine fossile.

L'ETBE ne contient donc que 44 % d'éthanol et donc plus des 2/3 du carbone contenu (et donc des émissions de CO² lors de sa combustion) proviennent de l'isobutène.

Les caractéristiques de l'ETBE sont ainsi très proches de celles de l'essence

	Essence	Ethanol	ETBE
Masse moléculaire	102	46	102
Pouvoir calorifique kJ/kg	42.690	26.800	35.880
RON ²	95	111	117
MON	85	92	101

Bilan CO² effet de serre

Toute utilisation d'un produit issu de la biomasse, permet un gain théorique sur les rejets de CO², puisque s'il y a rejet de CO², il correspond à du gaz déjà fixé auparavant par la plante. Mais comme le cycle complet fait appel actuellement à des combustibles fossiles, le bilan réel n'est pas évident et il variera beaucoup selon l'affectation des co-produits évoquée ci dessus.

	Affectation au prorata		Affectation substitution	
	Emissions	Gain / essence	Emissions	Gain / essence
Ethanol blé	35 g CO ² / MJ	60 %	73 g CO ² / MJ	15 %
ETBE	63 g CO ² / MJ	25 %	80 g CO ² / MJ	6 %

Rapporté à la même quantité d'énergie produite, si l'essence émet 85 g de CO² par MJ, l'utilisation de l'éthanol blé en émettra 35 g CO² / MJ soit un gain de 60 % dans l'hypothèse du prorata co-produit, mais ce gain n'est que 15 % dans l'hypothèse affectation partielle (substitution). Ce gain est limité pour l'

² ROM, MOM : indices d'octane (valeurs anti-détonante)

ETBE blé à 25 % (63 g CO² / MJ) dans l'hypothèse du prorata et de l'ordre de 6 % dans l'hypothèse de l'affectation partielle par substitution.³

Coûts

Le coût de l'éthanol et de l'ETBE sont essentiellement fixés par les coûts de la matière première, de l'énergie apportée et de l'isobutène (produit pétrolier).

Le premier poste: matière première sera le « prix du marché » avec en concurrence notamment les besoins de l'industrie alimentaire. Il est clair et ceci a déjà pu être constaté que l'arrivée de besoins à destination de la filière biocarburants conduit à l'augmentation du coût de la matière première. Ce coût des matières premières devrait croître à l'avenir.

Il faut aussi beaucoup d'énergie pour produire les biocarburants de la filière éthanol. Le prix du biocarburant va donc dépendre du prix de l'énergie externe. Si le prix du pétrole double, le prix de l'éthanol va lui aussi augmenter de façon sensible. Seule la canne à sucre échappe à cet effet dans la mesure où l'énergie « externe » est en grande partie fournie par la bagasse.

Mais, pour l'éthanol produit à partir de betterave, par exemple, où on consomme 2,8 tep pour en produire 3,5 (soit 0.8 l pour en produire 1), la part de l'énergie dans le coût est de l'ordre de 0,3 \$ pour une essence à 0,4 \$/l, mais le double pour une essence à 0,8 \$/l.

Pour l'Europe, actuellement, l'éthanol issu de la betterave revient entre 0.8 et 1 \$ / litre d'équivalent essence. Il y a donc encore un très grand écart pour s'approcher de la compétitivité, indépendamment des augmentations à prévoir.

Momentanément, des réductions fiscales de 0.4 € / litre devraient permettre le décollage de la filière.

Situation industrielle France

La production d'éthanol est répartie entre de nombreux producteurs, dans la lignée de production du sucre alimentaire. Par contre celle d'ETBE est très concentrée en 3 grosses unités du groupe Total en partenariat avec les betteraviers et céréaliers (Feyzin, Dunkerque, Gonfreville)

3.2 Le biodiesel (de l'huile à l'EMHV)

De l'huile pure est obtenue après trituration en pressurant les graines d'oléagineux (ex: colza, tournesol, soja) puis en filtrant. Le raffinage de l'huile comprend essentiellement des opérations de lavage. Les opérations pour obtenir l'huile à partir des graines, nécessitent peu d'énergie et beaucoup moins que pour la production d'éthanol. Il faut par exemple 2.45 MJ / litre d'huile pour les opérations de trituration, d'extraction et de raffinage pour une énergie finale de 36.8 MJ / litre, soit au total environ 7 % du potentiel énergétique final. Des huiles végétales ont pu être utilisées directement comme carburant Diesel, mais ceci a des limites qui se sont accentuées avec l'évolution des technologies moteurs. Les principales limites portent sur la viscosité à froid, le délai d'auto inflammation (indice de cétane) les dépôts, notamment à l'injection et enfin sur la qualité des émissions (pollution locale) Ceci conduit à ne pas retenir l'utilisation directe⁴, mais à passer par un produit tel que les EMHV.

Les EMHV (esters méthyliques d'huiles végétales) résultent de la réaction de l'huile végétale, constituée de triglycérides avec le méthanol (CH³OH) Le méthanol est un des produits de la chimie organique le plus fabriqué au monde, essentiellement à partir du gaz de synthèse (CO + H²) lui-même obtenu à partir du méthane ou d'hydrocarbures. Ceci donne des esters méthyliques d'acides gras (R-COOH) et du glycérol (C₃H₈ O₃) :

1 tonne d'huile + 100 kg de méthanol → 1 tonne de biodiesel + 100 kg de glycérine.

La glycérine est le sous-produit de la réaction. Il est actuellement très utilisé en produits de soins, pharmacie, résines. Si sa production augmente à l'avenir avec le développement du biodiesel, le problème de son utilisation pourrait se poser et il faudrait trouver de nouvelles valorisations à ce co-produit.

³ Ces derniers chiffres soulèvent des doutes, quant à la force des arguments avancés, pour justifier cette filière, par la seule réduction de l'effet de serre, tant que l'énergie de fabrication reposera surtout sur des combustibles fossiles (voir § 5)

⁴ sauf peut-être dans les tracteurs

Globalement nous obtenons par exemple :

Colza (3500 kg) → Trituration → huile (1320 kg) + méthanol (155 kg) → 1500 litres de biodiesel + 155 kg de glycérine + tourteaux (2180 kg)

Les caractéristiques des EMHV sont ainsi très proches de celles du gazole comme indiqué dans le tableau suivant, pour le colza.

	Gazole	Huile de colza	Ester de colza
Masse spécifique kg/m ³	820-860	920	880-885
Viscosité	2-4.5	30.2	4.5
Indice de cétane ⁵	> 49	35	50

La réaction d'estérification nécessite un catalyseur. Différents types de catalyseurs sont possibles : basiques, acides ou autres alcoolates de méthanol, oxyde de métaux... Les procédés peuvent être discontinus: mélange dans un réacteur avec agitation, mise en température et pression, avant ajout de la solution catalytique et maintien en l'état, par exemple 1 heure. Actuellement avec l'accroissement des tailles d'unités, les procédés sont plutôt continus.

De nouveaux développements utilisent la catalyse hétérogène, qui supprime quasiment tout rejet polluant.

Production

La production mondiale d'EMHV est de 1.6 Millions de tonnes (Allemagne 44 %, France 22 %). On constatera que c'est en Europe avec le fort développement des motorisations Diesel que se fabrique l'essentiel des EMHV

Les productions en huiles et énergétiques brutes (hors besoins en fabrication) rapportées à l'hectare sont :

Colza 1.2 à 1.3 t / ha (1.1 à 1.2 tep / ha) + 1.8 t de tourteaux
Tournesol 0.7 à 0.8 t / ha (0.66 à 0.75 tep / ha) + 0.6 t de tourteaux

Il faut noter que des plantes plus « exotiques » produisent beaucoup plus, exemple palme : 6 à 7 t / ha. L'estimation des productions nettes est moins sujette à débat que celle vue ci-dessus pour l'éthanol, car les besoins énergétiques de la graine à l'huile sont relativement plus faibles et on obtient environ 0.9 tep/ha pour le colza et 0.6 tep/ha pour le tournesol. Si des gains significatifs sont à espérer, ils sont à rechercher non pas dans les procédés de fabrication, mais plutôt dans la production sur pied (OGM ?).

Bilan CO² (effet de serre)

Pour les émissions de CO², il faut comptabiliser celles liées à la production de méthanol, aux dépenses énergétiques associées à l'agriculture, aux engrais et enfin au processus industriel, cette dernière étant peu énergétivore. Rapporté à la même quantité d'énergie produite, alors que le gazole émet 80 g de CO² par MegaJoule (MJ) les EMHV issus du colza en émettent 23 g par MJ, soit un gain de 70 % en prenant l'estimation du prorata massique avec les co-produits et un gain de 43% avec l'affectation partielle de substitution. Quelle que soit l'hypothèse retenue, le gain vis à vis des rejets de CO² est dans tous les cas plus élevé avec les bio-diesels qu'avec l'éthanol.

	Affectation au prorata		Affectation substitution	
	Emissions	Gain / gazole	Emission	Gain / gazole
EMHV colza	23 g CO ² / MJ	70 %	45 g CO ² / MJ	43 %

Coûts

Le prix est essentiellement fixé par celui de la matière première (80 % du prix total)

Pour les EMHV les prix obtenus varient de 0.42 à 0.69 \$ / litre équivalent gazole (en retenant qu'il faut 1.06 litre d'EMHV pour 1 litre de gazole).

⁵ Aptitude à l'allumage

Un parallèle peut être fait avec le prix du gazole qui pour un baril à 60 \$ revient à 0.48 \$ / litre. Au prix actuel des matières premières la compétitivité est presque assurée, mais ce prix des matières premières a déjà et aura encore plus tendance à croître du fait de la concurrence avec les besoins alimentaires. Comme le prix du gazole risque lui aussi d'augmenter, il est impossible de prévoir qui sortira vainqueur.

Situation industrielle France

En 2004 la production était essentiellement assurée par 4 usines : Grand Couronne (260.000 t / an), Compiègne (100.000 t / an), Verdun Baleyecourt (100.000 t / an), Boussens en Haute Garonne (40.000 t / an). L'usine de Compiègne première référence industrielle mondiale en 1993, fait suite à la création de la société Diester Industrie. Dans le cadre du développement prévu des biocarburants (directive européenne, loi programme énergie) vont être construites, entre autres, les unités industrielles suivantes: St Nazaire (200.000 t / an) Sète (160.000 t / an) Compiègne 2 (100.000 t / an). Pour 2007 la France pourrait produire 980.000 tonnes d'EMHV.

3.3 Perspectives pour ces 2 filières classiques

A partir de la situation actuelle, nous pouvons voir comment il est envisagé de répondre à moyen terme à la directive européenne pour intégrer 5.75 % de biocarburants⁶ d'ici 2010, par l'augmentation forte des surfaces et aussi une amélioration des rendements.

	Sole actuelle ha	Surface. actuelles biocarb ha	Masses actuelles brutes t. de bioc	Surf. bio Obj 2010 ha	Masses Obj 2010 Brutes t.de bioc	Energies Obj 2010 Brutes Mtep	Energies Obj 2010 Nettes Mtep prorata	Energies Obj 2010 Nettes Mtep substitution
Ethanol								
Betterave	430.000	12.000	60.000	60.000	300.000	0.2	0.12	0.04
Blé	5.000.000	14.400	36.000	270.000	700.000	0.4	0.25	0.05
EMHV oléagineux	1.500.000	280.000	357.000	1.900.000	2.400.000	2.2	1.5	1.45
Total	6.930.000	306.400		2.230.000		2.8 (5.7 %)	1.9 (3.4 %)	1.5 (2.8 %)

Globalement pour répondre à l'objectif de 5.75 %, avec les 2 filières classiques, il faudrait mettre en culture environ 1.9 millions d'hectares supplémentaires, soit plus que la surface en jachère non encore affectée, par dérogation, à ces productions dites industrielles.

Les besoins relatifs s'ils restent limités pour le blé (5.4 % de la sole) sont déjà significatifs pour la betterave (14 % de la sole) mais sont en revanche très importants pour les oléagineux, puisqu'il faudrait plus que doubler les terres utilisées pour la production d'oléagineux. Les terres utilisées à ce jour pour la production d'oléagineux seront à peine suffisantes. Cette question est d'autant plus cruciale, qu'en France comme en Europe, le diesel représente la part majeure de la consommation.

Si des améliorations de rendements agricoles sont possibles, sans pour autant recourir à plus d'engrais et plus d'irrigation, il est clair qu'une compétition avec les autres utilisations, surtout alimentaires, des terres agricoles, se présente et que pour aller au-delà du bien modeste 5.75 % en brut et en réalité environ 3 % en net, il faut trouver d'autres voies.

4) Nouvelles filières en développement dites de 2^o génération

L'élargissement du périmètre des bio- ressources mobilisables, peut venir des résidus d'origine agricole (pailles des céréales ...) forestiers (taillis, produits de première éclaircie...) et sous produits des industries associées. Il est aussi envisageable de s'orienter vers des cultures dédiées annuelles comme les taillis à courtes rotations, peupliers, eucalyptus ... Le gisement est particulièrement étendu. Ceci permettrait de ne

⁶ Nota : le taux d'intégration visé est le taux énergétique brut qui ne prend pas en compte les dépenses énergétiques sous forme de combustibles fossiles. Or, si celles-ci sont modérées pour les EMHV, elles sont élevées pour l'éthanol et l'ETBE : le bilan net donnera de toute façon beaucoup moins que 5 % de la consommation actuelle.

pas être en compétition avec la filière alimentaire, de maîtriser les coûts des matières premières, qui au départ sont plus faibles et de limiter la coproduction de sous produits qui comme la glycérine risquent de ne pas trouver de débouchés.

Dès à présent certains résidus sont utilisés comme source d'énergie directe en combustion. Le cas typique est la bagasse de la canne à sucre, mais même dans ce cas des déchets importants, restent sur champ.

En France, il existe un gisement potentiel important de biomasse lignocellulosique. Seule une fraction peut être récupérée et pour certains déchets, surtout agricoles, il est bon d'en laisser sur champ en préparation des sols pour les récoltes suivantes. Il reste néanmoins qu'une partie de ces déchets pourrait être affectée directement à la production d'énergie (électricité et chaleur) qui elle aussi doit être fortement développée et une autre partie à la production de biocarburants selon les nouvelles filières.

Ces filières, en cours de développement, sont pour certaines à des stades semi-industriels, mais il reste encore quelques verrous technologiques à lever.

Les matières premières lignocellulosiques

Les parois cellulaires des plantes sont constituées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine.

Le tableau ci dessous donne un exemple de répartition de ces composés

	cellulose	hémicelluloses	lignine
Paille de blé	33 – 43 %	20 – 25 %	15 – 20 %
Bois tendre	35 – 40 %	25 – 30 %	27 – 30 %
Bois dur	45 – 50 %	20 – 25 %	20 – 25 %

La cellulose est un homopolymère linéaire d'hexoses (sucres en C6)

Les hémicelluloses sont composées de pentoses (sucres en C5), d'hexoses et d'acides uroniques.

La lignine est un polymère fortement réticulé de composés aromatiques.

Partant de la biomasse lignocellulosique, différentes techniques de transformation peuvent ainsi aboutir à la production de biocarburants soit par voies thermochimiques (ou voies sèches) soit par voie biochimique (ou voie humide)

Voies thermochimiques

La thermochimie utilise la chaleur pour décomposer la matière lignocellulosique.

Selon les conditions physiques de température, de vitesse de variation de la température, de la présence ou non de gaz de réaction, différents produits sont obtenus, certains aptes à être transformés en biocarburants. En température, ses constituants se décomposent en phases solide (charbon) liquide (huiles) et gazeuse, la part de ces deux dernières croissant avec la température de réaction.

Gazéification

L'objectif est de transformer l'essentiel de la biomasse en un mélange gazeux appelé gaz de synthèse ($\text{CO} + \text{H}_2$) qui sera toutefois accompagné d'impuretés gazeuses telles que : CH_4 , CO_2 , H_2O .

La gazéification est réalisée à des températures élevées (1.000 à 1.500 ° C) en pression et en présence d'un réactif gazeux : air, vapeur d'eau (vaporeformage et oxydation partielle) Les techniques sont essentiellement celles retenues pour la gazéification du charbon (par exemple réacteurs à flux entraîné) Parmi les autres procédés, on notera celui breveté par l'IFP et le CEA, du lit mixte, avec catalyseur entraîné. Les réactions en jeu sont très endothermiques (environ la moitié de l'énergie potentielle) mais les énergies nécessaires sont en général fournies (autothermie) par une combustion partielle des masses carbonées avec injection d'air (ou d'oxygène) Ceci donnera en plus des gaz recherchés du CO_2 et H_2O qu'il faudra séparer.

Après purification, le gaz de synthèse peut être transformé en hydrocarbures selon la technique Fischer Tropsch. Cette technique a été développée en Allemagne dans les années 1920 et fut très utilisée ces dernières décennies en Afrique du Sud pour produire un carburant du type gazole à partir du charbon. Son application s'étend pour produire du carburant liquide à partir du gaz naturel. Selon les conditions de fonctionnement, le catalyseur, des hydrocarbures de type $\text{C}_n \text{H}_{2n}$ ou $\text{C}_n \text{H}_{2n+2}$ sont obtenus et de l'eau.

Globalement le rendement massique (rapport masse équivalent pétrole produit sur masse sèche initiale) est à ce jour compris entre 15 % et 20 %, avec des espoirs d'améliorations. En faisant appel à d'autres sources d'énergies externes (allothermie) des rendements au-delà de 40 % peuvent être espérés.

Cet apport d'énergie externe se traduirait de la façon suivante : au lieu de produire 1 tep en consommant une partie de la biomasse pour fournir la chaleur nécessaire, on pourrait produire, à partir de la même quantité de biomasse, 2 à 2,5 tep de biocarburant en apportant 1 à 1,5 tep d'énergie extérieure (par exemple 11 à 17 MWh d'électricité)

Thermolyse

Dans la thermolyse, la décomposition qui s'effectue à des températures plus basses et en absence d'oxygène, conduit à la production des 3 phases : solide, liquide et gazeuse. Le niveau de température et la vitesse de variation de température fixeront leurs teneurs respectives.

Dans la thermolyse lente, des basses températures et un long temps de séjour, favorisent la formation de phase solide (charbon)

Dans la thermolyse rapide ou flash, des températures plus élevées (entre 450 ° C et 650 ° C) et des courts temps de séjour (quelques secondes) favorisent la production d'huiles. L'huile assez lourde (densité 1.2) visqueuse peut être utilisée directement comme combustible, mais des progrès sont indispensables (recherches en cours sur l'hydrotraitement) pour passer à la production de biocarburants.

On peut citer en intermédiaire, le procédé EDDITH développé par l'IFP, plus destiné aux déchets en général. Les résidus sont portés entre 450 et 700 ° C pendant 45 à 60 minutes (pression atmosphérique en absence d'air) Partant de 1.000 kg de déchets humides, sont produits 155 kg de « carbor » (proche du charbon) et 380 kg de gaz de thermolyse.

La liquéfaction directe ou conversion hydrothermale

Différents solvants sont envisagés, dont simplement l'eau. Les conditions de réaction sont réalisées dans la gamme 250 à 450 °C, avec une gamme de pression très large, depuis la pression atmosphérique, jusqu'à la pression critique de l'eau (221 bar) Ces procédés conduisent aussi à la production d'huile.

Potentiel de production

Nous pouvons couvrir 2 domaines : les terres agricoles et la forêt.

- L'ensemble des résidus agricoles (pailles, tiges...) est estimé à 110 millions de tonnes par an.

Ils présentent un contenu énergétique moyen d'environ 15 GJ/t (rappel 1 tep : 42 GJ)

En considérant que seule une fraction est récupérable, le potentiel énergétique reste néanmoins important : exemple : 13 Mtep en chaleur directe, si le tiers est récupéré.

- L'exploitation de la forêt est à ce jour loin d'être complète (réf 5). Sur une production d'environ 110 Mm³ par an, seuls 51 sont récoltés avec la répartition suivante : 19.3 Mm³ vers le bois de feu en direct, 20.7 Mm³ vers le bois d'œuvre, 10.9 Mm³ vers l'industrie en notant qu'une fraction de ces derniers (9.4 Mm³) rejoint sous forme de déchets de fabrication, la filière bois de feu.

A plus long terme, il est possible par les effets cumulés d'une exploitation complète et d'un meilleur choix des essences (arbres à croissance rapide: eucalyptus, peupliers, saules, aunes ...) d'obtenir 150 Mm³/an desquels il faut retirer la mortalité, les difficultés de récoltes (montagnes...) pour aboutir à une fourniture potentielle de 130 Mm³ soit sensiblement 80 de plus qu'actuellement.

En dépit d'un fort accroissement du bois d'œuvre à prévoir et espéré notamment avec le développement des constructions bois, il resterait disponible un fort potentiel d'accroissement du bois énergie de 60 Mm³. Ceci donne au total 90 Mm³ à répartir entre le bois de chauffe (plaquettes, granulés) et les biocarburants.

Nous obtenons le bilan global suivant :

	Production totale biomasse	Production récupérable	Disponible pour l'énergie
Déchets des terres agricoles	110 Mt	36 Mt	36 Mt
Forêts	150 Mm ³	130 Mm ³	90 Mm ³ 66 Mt

en notant, qu'ici aussi, une concurrence entre diverses utilisations se présente. Nous pouvons envisager que la chaleur directe passe de 9 Mtep actuellement à environ 15 Mtep utilisant 52 Mt de bois. Il resterait 50 Mt de matières sèches pour produire des biocarburants. Avec un rendement massique biocarburant compris entre 15 et 20 % cela donnerait entre 7.5 et 10 Mt de carburant

Bilan CO² effet de serre

Le bilan est particulièrement favorable, puisque rapporté à la même quantité d'énergie produite, le gain peut être de 90 % (environ 7 g de CO² / MJ au lieu de 80 pour le gazole) pour une même quantité d'énergie fournie (il faut souligner l'importance de l'auto consommation directe)

Les coûts

Pour la filière thermochimique les prévisions sont de 0.5 à 0.75 \$ / litre d'équivalent gazole

Voie biologique

Un parallèle peut être fait avec la voie biologique qui partant des plantes sucrières aboutit à l'éthanol. De nombreux procédés sont étudiés et développés dans cette voie.

Schématiquement les opérations comprendraient successivement un prétraitement, l'hydrolyse de la cellulose et des hémicelluloses, la fermentation et enfin la distillation. Un pré-traitement est indispensable pour améliorer l'accessibilité de la cellulose aux enzymes. Ce pré-traitement sépare les pentoses (issus des hémicelluloses) de la cellulose et la lignine. Les voies étudiées sont diverses (thermolyse, thermohydrolyse, chimique...)

L'hydrolyse, en dépit du prétraitement, reste une opération difficile. Elle peut être chimique (acide ou basique) ou enzymatique. Les sucres issus de l'hydrolyse sont ensuite transformés en éthanol par fermentation.

De grands espoirs sont fondés sur ces techniques essentiellement pour produire de l'éthanol, 100 kg de matières sèches pouvant produire 20 kg d'éthanol⁷ à un coût estimé entre 0.3 et 0.6 \$ / litre équivalent essence⁸.

5) Conclusions, perspectives

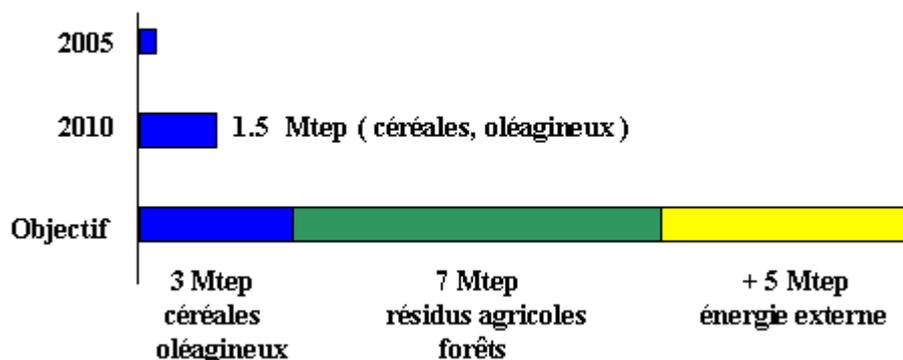
Les perspectives de pénurie des énergies fossiles, de pétrole en particulier, entraînant en premier lieu un accroissement des coûts, ainsi que l'importance de limiter les rejets de gaz carbonique à l'atmosphère, conduisent impérativement à développer la production de biocarburants pour répondre au moins partiellement aux besoins de mobilité.

Partant des filières actuelles basées sur l'agriculture classique à partir des céréales et des oléagineux, il est déjà possible d'accroître la production. Aller au-delà passe par le développement de nouvelles filières traitant les résidus d'origine agricoles et forestiers. Mais ces productions consomment de l'énergie.

Pour éviter de recourir à l'auto consommation, l'idéal dans un objectif de réduction des rejets de CO² à l'atmosphère serait de faire appel à des sources externes d'énergie non émettrices de CO².

⁷ En supposant que les matières sèches résidus agricoles récupérables soient de 33 Mt, cela donnerait 6.6 Mt d'éthanol soit l'équivalent de 4 Mt d'essence.

⁸ équivalent à 50 – 100 \$ / baril



Le premier objectif de fournir 5.75 % de nos besoins en carburants (2.8 Mtep) à partir des cultures classiques d'ici 2010 est souvent présenté comme accessible. Mais cette affirmation est un peu trompeuse, car ce sont des chiffres bruts. En prenant en compte l'énergie (fossile) consommée pour les produire le chiffre réel net est 1.5 Mtep ⁹. Aller fortement au-delà semble problématique (limite 3 Mtep ?) sauf à importer la matière première, car les ressources agricoles sont limitées. Très vite la mobilité va entrer en compétition avec l'alimentaire. Des capacités potentielles complémentaires, s'offrent avec la valorisation de la biomasse lignocellulosique, débouchant par ailleurs sur de meilleurs bilans CO². Leur faisabilité technico-économique devra être cependant très sensiblement améliorée.

Cette nouvelle voie pourrait permettre de fournir entre 7.5 et 10 Mt de carburant en bilan net.

Globalement compter en fourniture nette entre 10 et 13 Mt de biocarburant apparaît faisable

Comme nous l'avons vu ci dessus la consommation énergétique pour produire ces biocarburants est importante. Si l'objectif est de réduire au maximum les rejets de gaz carbonique, il est possible d'accroître fortement la production en faisant appel à de l'énergie externe. Ces sources externes, ne devraient provenir ni de la biomasse elle-même, ni des énergies fossiles émettrices de CO², ce qui conduit à l'électricité produite à partir de sources d'énergie non émettrices de gaz à effet de serre comme le nucléaire ou les renouvelables type hydraulique, éolien ou thermoélectricité.

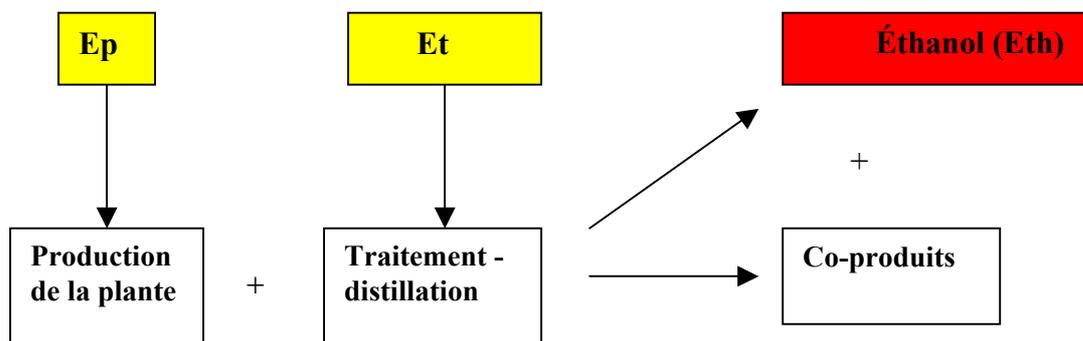
Ce choix permettrait de conforter une fourniture d'au moins 15 Mt de biocarburants par an, voire un peu plus moyennant un apport extérieur d'énergie de 5 à 10 Mtep, ce qui est réalisable à partir de 60 à 120 TWh d'électricité

Références

- 1) « Les biocarburants » par Daniel Ballerini IFP Publications aux Editions TECHNIP
- 2) « L'énergie de demain » sous la direction de J.L. Bobin, E. Huffer, H. Nifenecker aux éditions EDP Sciences, chapitre la valorisation énergétique de la biomasse par Gérard Claudet
- 3) - Rapport de l' European Environment Agency: EEA Report N° 7/2006: How much bioenergie can Europe produce without harming the environment.
- 4) - Que pouvons nous espérer des biocarburants ? Jean Marc Jancovici 12/ 2004 www.manicore.com
- 5) - « Le défi forestier » par Michel de Galbert Editions ING

⁹ Rappelons ici que le bilan net de la production d'éthanol et d'ETBE à partir de cultures est particulièrement décevant en Europe. Seule la production à partir de la canne à sucre est intéressante, car l'énergie requise est fournie par la bagasse et la main d'œuvre est particulièrement bon marché.

Annexe 1 : schéma énergétique pour la production d'éthanol



Ep énergie nécessaire pour produire la plante (engrais, cultures, irrigation)

Et énergie nécessaire pour extraire le sucre, le transformer en alcool, distiller, sécher les co-produits.

Quatre méthodes sont parfois utilisées pour évaluer le bilan énergétique (**En**) :

- La première passe sous silence les apports d'énergie **Ep** et **Et** et affiche la production d'éthanol **Eth** comme si elle était nette : **En = Eth** ; c'est ce qui est fait implicitement dans les annonces officielles relatives au pourcentage de biocarburants produits.
- La deuxième, au contraire, affectent **Ep** et **Et** à la seule production d'éthanol, auquel cas le bilan énergétique net **En** est : **En = Eth - (Ep + Et)**
- La troisième affecte **Ep** et **Et** à l'éthanol et aux co-produits au prorata α et $1 - \alpha$ de leurs masses respectives : **En = Eth - α (Ep + Et)**
- La quatrième distingue les dépenses d'énergie spécifiques à chaque produit et la lui affecte, en ne partageant au prorata des masses que celles qui sont communes (méthode dite de substitution).

La première méthode devrait être écartée, car elle est trompeuse, en particulier quand tout ou partie de **Ep** et **Et** sont fournis par du pétrole.

La seconde méthode, au contraire, est très pénalisante pour les biocarburants : elle conduit par exemple, dans le cas du blé, à un bilan net quasi nul (c'est ce qui motive les critiques).

La troisième méthode est très favorable aux biocarburants, surtout quand la masse des co-produits est importante par rapport à la masse de biocarburant (cas de la betterave). C'est la méthode la plus souvent utilisée par les promoteurs des biocarburants

La quatrième méthode est sans doute la plus rigoureuse, mais plus compliquée à mettre en oeuvre.

Dans les tableaux du corps de la note, nous donnons les productions nettes obtenues avec les deux dernières méthodes.