

Enjeux technologiques et écologiques majeurs des biocarburants

Anne-Lise HANTSON^{1*} et Diane THOMAS²

¹Service de Chimie et Biochimie Appliquées, Faculté Polytechnique de l'UMONS

²Service de Génie des Procédés Chimiques, Faculté Polytechnique de l'UMONS

Rue de l'Épargne, 56 – 7000 Mons, Belgique

*(auteur correspondant : anne-lise.hantson@umons.ac.be)

Résumé

Dans le contexte d'une nécessaire réduction mondiale des émissions de gaz à effet de serre et d'une économie forcée des énergies d'origine fossile, l'utilisation des biocarburants dans le transport routier, plus ou moins poussée, et de façon transitoire, s'avère incontournable. Les législateurs européens prennent d'ailleurs nombre de mesures en ce sens.

Un panorama résumé des diverses filières de production des biocarburants est proposé ici, mettant en exergue la balance avantages/inconvénients sur des considérations tout à la fois d'ordres technologique, écologique et législatif.

1. Généralités

1.1 Contexte du développement des biocarburants [1,2]

L'utilisation de produits agricoles comme carburants n'est pas une innovation : le premier moteur diesel, développé en 1890, fonctionnait déjà avec de l'huile d'arachide, de nombreux autres exemples d'utilisation d'huiles végétales brutes ont jalonné l'histoire et la France avait aussi déjà produit et consommé du bioéthanol dans l'entre-deux-guerres. L'objectif poursuivi alors consistait à réduire les importations de pétrole et donc à limiter le déséquilibre de la balance commerciale... Toujours d'actualité (face à un approvisionnement de plus en plus incertain, par des pays producteurs souvent caractérisés par une situation géopolitique difficile), mais aujourd'hui devancé par un autre souci, plutôt d'ordre environnemental : un impact positif des biocarburants sur la pollution de l'air avec une question de pollution des sols devenue nettement moins aigüe grâce à des pratiques agricoles mieux adaptées à la production de la biomasse, et à l'émergence de nouveaux types de biocarburants. C'est aujourd'hui essentiellement la contribution des biocarburants à la réduction des gaz à effet de serre qui est mise en avant, dans le contexte des engagements pris par divers pays dans le cadre du protocole de Kyoto et de ses suites. Le transport routier ne génère qu'une part (~25%) des sources de gaz à effet de serre, mais il est impératif d'agir à son niveau, surtout que cette contribution devrait augmenter.

Vu le contexte écologique et la pénurie probable de carburants liquides dans un avenir plus ou moins proche, il est particulièrement crucial actuellement de mettre au point, pour les transports, des substituts du pétrole peu ou non émetteurs de gaz à effet de serre. Les enjeux actuels des biocarburants sont donc tout à la fois d'ordres énergétique et environnemental, mais aussi économiques. Ces problématiques diverses ont parfois des solutions contradictoires. Le biocarburant résulte donc d'un certain compromis et constitue un produit de transition énergétique intéressant.

1.2 Législation et normes en matière de biocarburants

Dans le cadre législatif des biocarburants utilisés dans le transport, deux aspects sont à prendre en considération : celui visant la promotion de l'incorporation des biocarburants et celui de la compatibilité avec les moteurs actuellement employés dans le transport. La Commission Européenne relayée par les Etats membres propose un véritable plan d'action destiné à porter la part des biocarburants à plus de 20% de la consommation européenne d'essence et de diesel d'ici à 2020. En l'absence de mesures d'économies d'énergie, la consommation de carburant diesel et d'essence par les transports devrait atteindre environ 304 millions tep (tonnes équivalent pétrole) en 2010 dans l'ensemble de l'Union européenne.

1.2.1 Directives européennes

La promotion des biocarburants donnant des objectifs indicatifs à l'horizon 2010 est fixée par la directive européenne 2003/30/CE [3]. Cette dernière impose aux États membres l'obligation d'adopter la législation et les mesures nécessaires pour que, à partir de 2005, les biocarburants représentent une part minimale des carburants vendus sur leur territoire. Les objectifs sont de diminuer les émissions classiques de CO₂ mais aussi d'autres polluants néfastes pour la santé et l'environnement.

Les différents types de biocarburants ciblés par la directive sont le bioéthanol, le biodiesel, l'ETBE, le biogaz, le biométhanol et la biohuile ; ils peuvent se présenter sous les 3 formes traditionnelles : à l'état pur, en mélange ou liquides dérivés de biocarburants.

Une valeur de référence pour ces objectifs est donnée sur la base de la teneur énergétique, à savoir : 2% pour le 31 décembre 2005 au plus tard (en pourcentage de la quantité totale d'essence et de diesel mise en vente sur le marché à des fins de transport) et 5,75% pour le 31 décembre 2010 au plus tard. Tout État membre qui fixe des objectifs moins élevés devra le justifier à l'aide de critères objectifs.

Il existe une grande variabilité dans la transposition de la directive par les états Membres en termes d'objectifs et calendriers, d'applications de mesures fiscales, d'obligation et dans la possibilité de combiner les deux systèmes précités. On trouve par exemple les objectifs en terme énergétique suivants : pour la Belgique : 13% en 2020 (2% en 2005), pour la France : 23% en 2020 (10,3% en 2005) et pour les Pays-Bas : 14% en 2020 (2,4 % en 2005).

La directive 2003/30/CE est abrogée par la directive 2009/28/CE entrant en vigueur à partir du 1^{er} janvier 2012. Dans ce cadre, chaque État membre a un objectif calculé concernant sa part d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans sa consommation d'énergie finale brute pour 2020. Cet objectif concorde avec l'objectif global « 20-20-20 » qui signifie une réduction de 20% de la consommation d'énergie primaire de l'Union et des émissions de gaz à effet de serre, ainsi que l'inclusion de 20% d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergies. Concernant les biocarburants et bioliquides, ceux-ci doivent, en outre, contribuer à une réduction d'au moins 35% des émissions de gaz à effet de serre pour être pris en considération ; part portée à 50 % à partir du 1er janvier 2017.

1.2.2 Cadre légal belge

La directive 2003/30/CE a été transposée en Belgique dans la loi du 22 juillet 2009 ; elle est entrée en vigueur le 1er juillet 2009 et cessera d'être en vigueur le 30 juin 2011 [4], sauf prolongation. Cette loi traduit l'obligation pour toute société pétrolière enregistrée, commercialisant des produits essence et/ou diesel, de mettre également à la consommation au cours d'une même année civile une quantité de biocarburants durables (EMAG (ester

méthyllique d'acide gras) ou bioéthanol pur ou sous la forme de ETBE) à concurrence d'au moins 4 %vol. de la quantité de produits carburants classiques mis à la consommation.

La Belgique a aussi défini des quotas (pour un volume total annuel de 250 000 m³) pour le bioéthanol, octroyés à des unités de production jusqu'en 2013 et opté pour des réductions d'accises sur la partie « bio » (égale à une augmentation d'accises sur la partie « hydrocarbures ») en accord avec la directive 2003/96/CE [4]. De manière évidente, les mesures belges actuelles ne sont pas suffisantes pour atteindre un objectif de 13% énergétique, qui requiert un pourcentage en volume supérieur.

1.2.3 Cadre légal français [5]

Le premier outil utilisé par la France pour soutenir le développement des biocarburants a été leur défiscalisation, dès 2002. Les biocarburants, produits sous contrôle fiscal, fabriqués dans des unités de production agréées, peuvent bénéficier d'une réduction de la taxe intérieure sur les produits pétroliers (TIPP) dans la limite de certains contingents. Cette diminution de fiscalité varie en fonction de la nature du biocarburant considéré. Elle s'établit à 25 €/hl pour les EMAG, le biogazole de synthèse, à 30 €/hl pour les esters éthyliques d'huile végétale incorporés au gazole ou au fioul domestique et 33 €/hl pour l'ETBE ou l'éthanol incorporé aux supercarburants.

Cette défiscalisation a été complétée en 2005 par la création d'une sanction financière : prélèvement supplémentaire de la taxe générale sur les activités polluantes (TGAP). Cette dernière a accéléré l'incorporation en France, au point que l'objectif de 1,75 % d'intégration de biocarburants dans les carburants fossiles, fixé pour 2006 a été atteint, alors que le taux d'incorporation cible de la taxe pour l'année 2005, soit 1,2 % ne l'avait pas été. Les objectifs 2007 et 2008, nécessitant plus du doublement du taux d'incorporation ont requis une augmentation de la production ou nécessité le recours aux importations.

Le gouvernement français a déposé un amendement favorisant le développement d'un nouveau biocarburant, caractérisé par l'incorporation de 70 à 85 % d'éthanol aux supercarburants, l'E85. Le dispositif proposé comprend un ensemble de mesures fiscales très incitatives.

Notons que l'huile végétale pure utilisée comme carburant agricole, tant en France qu'en Belgique, par les exploitants ayant produit les plantes dont l'huile est issue, est totalement exonérée de TIPP.

1.2.4 Disponibilité réelle actuelle / point de vue économique.

En ce qui concerne le bioéthanol dans le monde en 2008, le producteur n°1 est les Etats-Unis d'Amérique (à partir de maïs essentiellement, mais également de blé), suivi par le Brésil (à partir de canne à sucre) ; à eux deux, ils comptabilisent 95% de la production. La France se situe loin derrière avec ses exploitations de betteraves (Figure 1a) Pour le biodiesel en Europe, l'Allemagne est le premier producteur -en 2004, plus de 1700 stations-service délivraient déjà du biodiesel-, devant la France puis l'Italie (Figure 1b). Notons que mondialement, les Etats-Unis sont les seconds producteurs de biodiesel (2008).

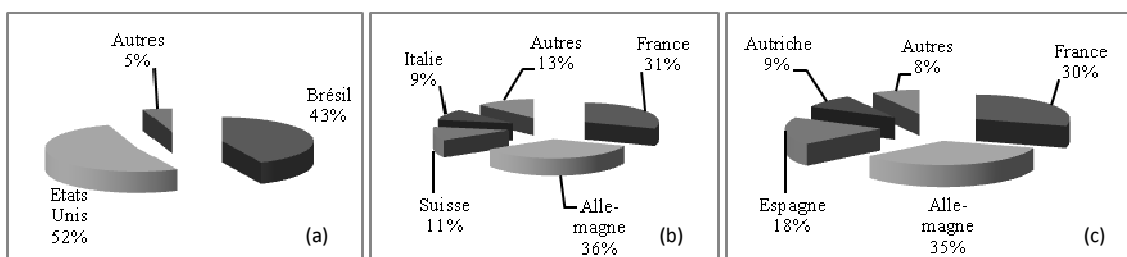


Figure 1 : Répartition mondiale de la production de bioéthanol (a) ; répartitions européennes des productions de biodiesel (Total Europe 2008 = 7630 Ml) (b) et de bioéthanol (Total Europe 2008 = 4245 Ml) (c)[6]

L'évolution de la production et des besoins futurs de bioéthanol et de biodiesel dans l'Union Européenne est représentée à la Figure 2 où l'on peut observer une intensification de la production des biocarburants de 1^{ère} génération depuis le début des années 2000.

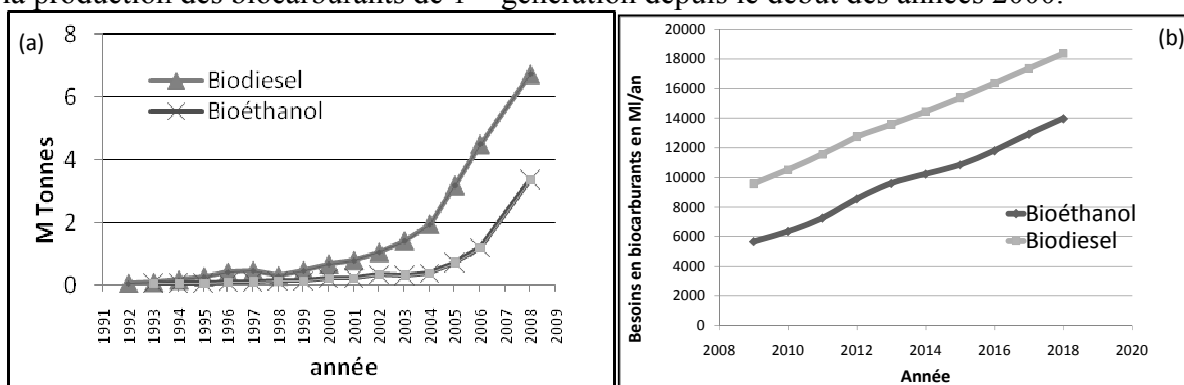


Figure 2 : Evolution de la production (a) de bioéthanol et de biodiesel et perspectives des besoins (b) entre 2009 et 2018 dans l'Union Européenne (OCDE [7])

1.3 Biocarburants et transports : compatibilité et limitations

1.3.1 Cadre normatif

L'établissement de normes est incontournable pour garantir la qualité des carburants et les véhicules qui les utiliseront. Les directives européennes concernant la qualité des carburants sont 98/70/CE et 2003/17 [3]. Les normes actuelles de l'essence (NBN EN 228) et du diesel (NBN EN 590) permettent d'incorporer respectivement 5 %vol. d'éthanol (ou 15 %vol. d'ETBE) et 5 %vol. de biodiesel, mélanges appelés respectivement E5 et B5. L'éthanol et les esters méthyliques (EMAG) font aussi l'objet de normes définies par le Comité Européen de Normalisation, soit NBN EN 15376 et NBN EN14214 respectivement, mais pas par contre pour les huiles végétales pures. Après négociation avec l'industrie automobile, un standard B7 paraît acceptable, alors que le dossier de l'E10 semble bloqué.

1.3.2 Compatibilité moteurs des biocarburants.

Les problèmes à prendre en considération lors de l'utilisation des biocarburants dans les moteurs traditionnels sont de type technologique et environnemental :

- **Compatibilité moteur :** L'incorporation des biocarburants doit garantir les performances des moteurs, assurer la durabilité et la maintenance des véhicules. Les nouvelles contraintes liées à l'utilisation de systèmes d'injection récents sont aussi importantes (hautes températures, hautes pressions,...). Pour les moteurs diesel, les problèmes possibles sont liés aux différences de viscosité et de volatilité (tableau 1) ; expliquant pourquoi les constructeurs déconseillent l'utilisation directe des huiles végétales. Pour les moteurs à explosion, la volatilité et l'indice d'octane sont des propriétés critiques. L'ETBE produit présente des propriétés plus intéressantes (tableau 1) que l'éthanol dont il est issu: niveau d'octane supérieur, faible pression de vapeur et tolérance parfaite à l'eau.

Il faut aussi, pour les dérivés de l'éthanol produits par fermentation ou par synthèse, se préoccuper des risques de corrosion dus entre autres à la présence de traces d'eau. L'utilisation immédiate dans l'ensemble des véhicules du parc des biocarburants pose néanmoins la question du respect de spécifications qui sont imposées aux carburants classiques. Jusqu'alors, la transformation des huiles végétales en ester pour la filière diesel ainsi que la transformation de l'éthanol en ETBE (éthyltertiobutyléther) pour la filière essence répond à la question de compatibilité de mélange, tant du point de vue de la distribution des carburants que de leur utilisation. Notons, cependant, que plus de 10% du parc automobile essence n'est pas compatible au-delà de 5 %vol. d'éthanol et plus de 90% du parc diesel ne l'est pas au-delà de 7 %vol. d'EMAG.

Par contre, l'incorporation directe d'éthanol, si les constructeurs n'y sont pas opposés, requiert un respect des spécifications du carburant final. Des véhicules conçus pour l'utilisation de mélanges riches en biocarburants existent, mais cela reste marginal en Europe. Le Brésil développe depuis 2003 la filière des FFV (Fuel Flexible Vehicles), proposés notamment par des constructeurs européens et nord américains, pouvant fonctionner avec tous mélanges entre 25% et 95% d'éthanol, et de permettre l'utilisation d'éthanol hydraté.

- **Comptabilité carburant :** D'autres aspects techniques sont à souligner, notamment la sensibilité de l'éthanol à l'eau. Le mélange éthanol hydraté/essence peut se séparer en deux phases (démixtion) dont aucune n'est adéquate pour les moteurs, nécessitant de protéger le système de distribution de la présence d'eau, d'injecter l'éthanol le plus tard possible (au chargement des camions), d'incorporer l'éthanol anhydre dans des proportions maximales de 25 %. Des contrôles de compatibilités entre les matériaux utilisés pour les réservoirs et les joints doivent être réalisés en particulier pour l'incorporation d'EMAG.

L'ETBE est miscible en toutes proportions avec l'essence, comme les EMAG le sont avec le diesel.

Caractéristiques	Filière ESSENCE			Filière DIESEL	
	Eurosuper	Ethanol	ETBE	Gazole	Ester méthylique de colza
Masse volumique (kg/l)	0,755	0,794	0,750	0,840	0,883
Tension de vapeur du mélange (bar)	0,7-0,8	1,54	0,40		
Pouvoir calorifique inférieur (kJ/l)	32389	21283	26910	35952	33024
Chaleur de vaporisation (°C)	289	854	321		
Viscosité à 20°C (cSt)		-		3,80 à 8,52	7,5
Viscosité à 40°C (cSt)				2 à 4,5	4,46

Nombre d'octane	MON	>85	99	100	-	
	RON	95	120	118		
Indice de cétane		-			48	48,7

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques de l'éthanol, de l'ETBE, du MTBE et de l'euro-super + du gazole et des esters méthyliques de colza (source IFP[8])

- **Compatibilité émissions** : l'absence de polluants nouveaux lors de la combustion doit être démontrée : une attention particulière est portée sur la compatibilité avec les filtres à particules et les systèmes de post-traitement (catalyseurs). La formulation des carburants actuels répond à des spécifications très strictes qu'il est indispensable de respecter compte tenu des réglementations antipollution Euro 4, Euro 5... qui sont imposées aux constructeurs automobiles. L'incorporation de biocarburants ne lève pas ces exigences de spécifications rigoureuses.

2. Panel des biocarburants

Le biocarburant est un carburant d'origine agricole ou végétale, combustible utilisé pour le transport et produit, après divers traitements plus ou moins importants, à partir de la biomasse consistant en la fraction biodégradable des produits, déchets ou résidus provenant de l'agriculture, de la sylviculture...

Il existe diverses grandes filières de production des biocarburants (voir Figure 3), qui n'ont en commun que le terme générique de biocarburants.

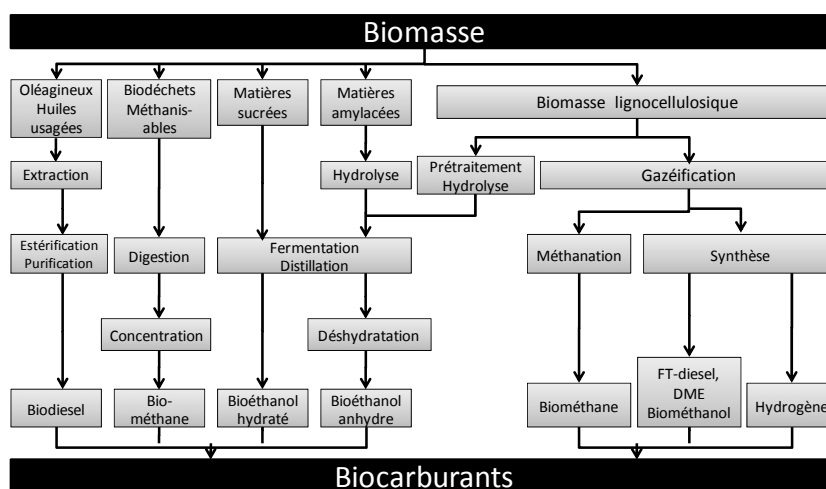


Figure 3 : Vue schématique des grandes filières de production des biocarburants

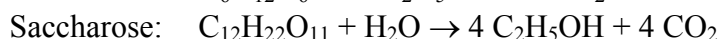
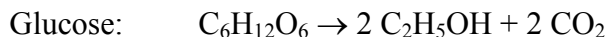
3. Biocarburants de première génération

Les biocarburants dits « conventionnels », les seuls disponibles actuellement, ou encore appelés agrocarburants, constituent les biocarburants dits de première génération. Ils sont produits par deux filières distinctes :

- La filière **bioéthanol** qui comprend l'éthanol et l'**éthyltertiobutyléther** (ETBE) pour alimenter, en mélange, les véhicules **essence** ;
- Et la filière **huiles végétales** avec l'**ester méthylique d'huiles végétales** (EMHV), ou **d'acides gras** (EMAG), pour les véhicules **diesel**.

3.1 Production du bioéthanol de 1^{ière} génération [9]

Tous les sucres de type hexose (en C6) fermentescibles, principalement le glucose, et aussi le saccharose, peuvent être convertis en éthanol (alcool de bouche) et en dioxyde de carbone après fermentation. Celle-ci est anaérobie et réalisée à l'aide d'une levure, *Saccharomyces Cerevisiae*. Cette dernière produit une enzyme qui catalyse la fermentation. Les équations des réactions de fermentation sont les suivantes :



Les sucres utilisés dans la filière de 1^{ière} génération sont présents à l'état plus ou moins polymérisé (dimère ou polymère simple) dans le monde végétal. Les plantes dites sucrières ou saccharifères (betteraves à sucre, cannes à sucre, sorgho sucrier) produisent directement du saccharose et dans ce cas, le sucre fermentescible est extrait par diffusion. Les plantes amylacées telles les céréales produisent de l'amidon qu'il est nécessaire d'hydrolyser par voie enzymatique, qui exploite les amylases. Les sucres obtenus sont, après traitement, un mélange de glucose et de maltose.

L'éthanol produit actuellement en France et en Belgique pour un usage de biocarburants provient essentiellement de betteraves à sucre et de blé.

3.1.1 Procédé de fabrication du bioéthanol.

Selon la biomasse utilisée, les différentes phases de production de bioéthanol sont : l'extraction du jus précédée d'un broyage (par exemple pour la canne), la dilution, l'hydrolyse de l'amidon dans le cas des plantes amylacées, la fermentation anaérobie, la récupération, la distillation et déshydratation sur tamis moléculaire, par exemple, de l'éthanol.

a. L'hydrolyse

L'hydrolyse est appliquée industriellement à l'amidon céréalier suivant deux procédés :

- la voie humide : le grain est moulu et ses constituants (son, gluten, amidon...) sont séparés de façon classique pour le son et en partie par lavage. Seul, l'amidon est traité au cours de l'hydrolyse enzymatique puis fermenté. ;
- la voie sèche : le grain est également moulu et la totalité de ses constituants subit l'hydrolyse enzymatique et la fermentation. Le débouché du coproduit principal, les drèches est très important.

b. La fermentation

La fermentation des sucres en C6 (hexoses) par la levure est la voie industrielle traditionnelle de production de l'éthanol. Un nombre important de travaux de recherche ont abordé des fermentations différentes avec des bactéries, d'autres levures, voire même des champignons ; mais rien n'est encore transposé. Au niveau industriel, la principale distinction est à opérer entre les procédés discontinus et les procédés continus de fermentation. Ces derniers sont plus productifs, avec un rendement supérieur de 1 à 6 % aux procédés discontinus, mais ils sont aussi nettement plus sensibles aux contaminations bactériennes.

c. La purification

Le fractionnement du vin obtenu après l'étape de fermentation conduit à séparer l'éthanol du reste des constituants. La technologie appliquée comprend deux étapes : la distillation et la déshydratation.

La distillation usuelle permet d'obtenir une concentration en éthanol de 96 % en masse, voisine de l'azéotrope (97,1 %). Les variantes de combinaison avec la concentration des vinasses non recyclées, l'existence d'effets multiples et la distillation sous vide partiel permettent encore d'améliorer ces consommations énergétiques (voir tableau2). Un éthanol obtenu à ce niveau ne peut être utilisé en mélange avec l'essence ou pur dans les moteurs actuels ; seules les versions FFV tolèrent la présence d'eau.

Méthode	Distillation azéotrope	Tamis moléculaire	Pervaporation par membrane	Distillation dans colonne à double effet
Consommation d'énergie				
Vapeur (kg vapeur / hL alcool pur)	105	55 à 62	11	114
Electricité (kWh/ hL alcool pur)	0,4	0,41	2,9	2

Tableau 2 : Comparaison des performances énergétiques industrielles des trois procédés utilisés pour la déshydratation de l'alcool à 96% masse et de la distillation du vin obtenu après fermentation [9]

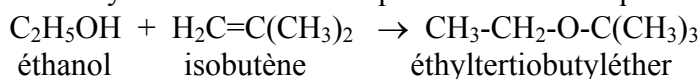
Une déshydratation plus poussée conduisant à l'éthanol anhydre (99,7 % min. en masse, spécification officielle et 99,9 % pour la synthèse de l'ETBE) est obtenue par deux techniques [10] :

- la distillation azéotrope à pression atmosphérique, en présence de cyclohexane (en général) comme solvant d'entraînement, accompagnée de recompression mécanique de vapeurs ; d'autres techniques sous vide partiel peuvent être appliquées mais sont à ce jour peu répandues dans les procédés industriels de traitement de l'éthanol ;
- l'utilisation de tamis moléculaires qui consiste à adsorber et désorber l'eau sur un support tel que des zéolites synthétiques, ou des silicoaluminates métalliques. Actuellement, presque toutes les unités industrielles en exploitation en France utilisent ce procédé pour traiter le bioéthanol.

Une troisième technique, la pervaporation par membrane, très performante au plan énergétique (voir Tableau 2), a été appliquée pendant quelques temps, mais n'a pas été suffisamment adaptée à l'alcool de betteraves.

3.1.2 Production d'ETBE

Le bioéthanol produit par ces filières peut être exploité pour produire l'éthyltertiobutyléther. Il est obtenu par réaction chimique avec l'isobutène :



La synthèse peut être réalisée par différents procédés dont le procédé IFP qui reprend des réacteurs à lits fixes ou à lits expansés, et une colonne à distillation réactive assurant la conversion quasi-totale de l'isobutène. Des procédés alternatifs de production d'ETBE existent au départ de butane.

Si on se réfère à la teneur en masse, l'ETBE contient environ 47% de bioéthanol anhydre. Il est exploité au même titre que le MTBE par les raffineurs, comme additif dans les carburants fossiles à hauteur de 10 à 15 %.

L'ETBE est actuellement la filière d'utilisation du bioéthanol la plus largement développée en Europe. Malheureusement, sa production nécessite des infrastructures et surtout une matière première (le naphtha) que seules les grandes raffineries pétrolières peuvent

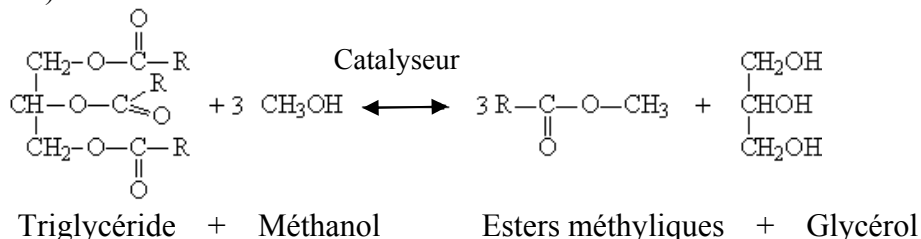
aujourd'hui s'offrir à un coût acceptable, et qui le font dépendre, pour moitié, de ressources non renouvelables.

3.2 Production des Esters méthyliques d'huile végétale

Les **huiles végétales** s'obtiennent classiquement par un traitement comportant :

- une simple trituration des graines oléagineuses (les graines de colza contiennent par ex. 42% d'huile) pour libérer l'huile (aplatissement + cuisson + pressage) ;
- suivi de l'extraction par solvants de l'huile résiduelle contenue dans les tourteaux, car le tourteau contient, en fin de trituration, encore 12 à 15% d'huile ;
- un filtrage et un dégomme des huiles pures, par retrait d'une grande partie des phospholipides.

Les acides gras des huiles végétales sont ensuite couramment estérifiés avec un alcool dont la formule est la plus simple : le méthanol CH₃OH. On obtient alors des esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV), mais aussi un co-produit, la *glycérine*, utilisée par l'industrie chimique. La réaction d'estérification (équilibrée et s'effectuant en présence d'un catalyseur) est la suivante :



Actuellement, la catalyse homogène (avec un catalyseur dissous dans le milieu réactionnel) est la technique la plus utilisée dans les procédés de production de biodiesel. La transestérification peut être réalisée par catalyse basique ou acide, les procédés fonctionnant en continu ou en batch, et à catalyseur perdu. Le process se complique par les étapes de purification des 2 produits (EMHV et glycérine). La catalyse hétérogène (le catalyseur étant totalement insoluble dans le milieu) conduit à une excellente pureté des produits obtenus, des rendements de synthèse élevés, et une disparition presque totale des rejets polluants. L'opération s'effectue grâce à des investissements moindres puisque moins d'équipements de downstream processing sont nécessaires [11]

L'appellation du biocarburant EMHV est variable : « biodiesel » en Europe et « diester », contraction de diesel et ester, en France ; un terme générique est utilisé pour l'aspect normatif : EMAG, signifiant esters méthyliques d'acides gras.

Pour la production d'huiles et de EMHV, les ressources (Tableau 3) sont toutes les plantes oléagineuses, le colza et le tournesol essentiellement, mais aussi le palme, le soja...

Toutes les étapes de production appliquées dans ces deux grandes filières de production (éthanol (+ETBE) et biodiesel) sont schématisées à la Figure 4.

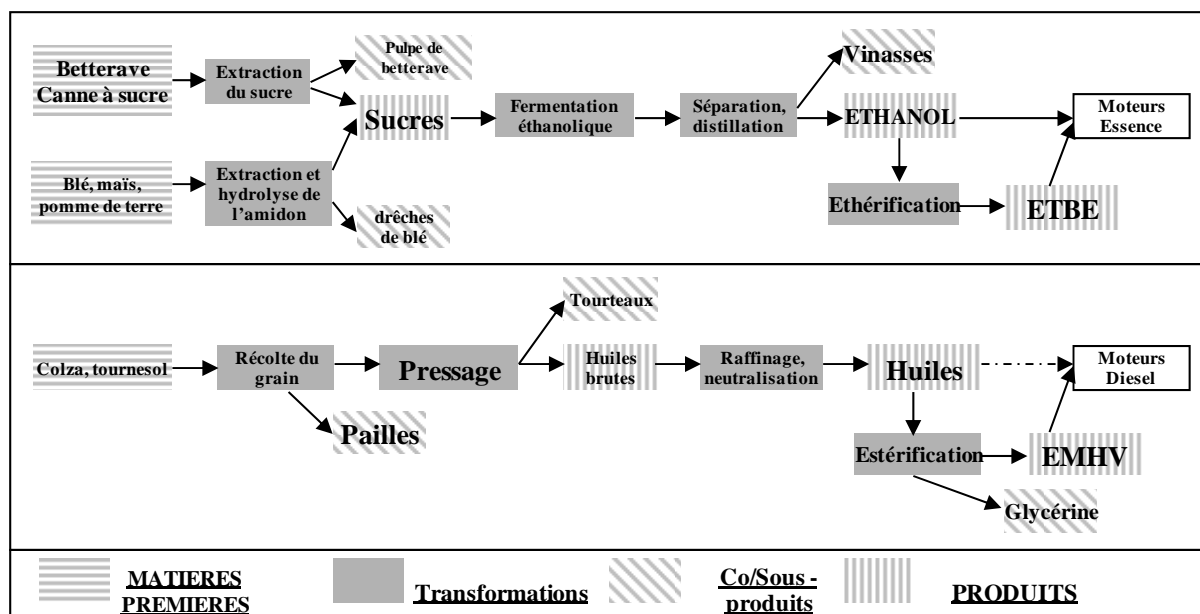


Figure 4: Schémas de procédés pour les deux grandes filières de production mettant en évidence matières premières, produits et co-produits.

L'opération de transestérification peut également utiliser de l'éthanol pour former des EEHV (esters éthyliques d'huiles végétales), mais cette filière est peu développée. Le problème majeur réside dans l'inadéquation des normes qui ne considèrent que les EMHV. Leur incorporation requiert des modifications de textes légaux. Des expériences sont faites dans divers pays afin de tester, pour la production de EMHV, l'utilisation des huiles de récupération, par exemple l'huile usagée de cuisine. Ces composés contiennent une assez grande quantité d'acides gras libres. Ces impuretés peuvent être transformées en ester, grâce à la catalyse hétérogène et moyennant des conditions opératoires adéquates [12]. Des exemples d'application sont à signaler en Autriche et en Espagne [13]

3.3 Bilan multi-aspects sur les biocarburants de première génération

3.3.1 Rendement d'utilisation des matières premières et co-produits

D'après la figure 4, nous voyons que les biocarburants ne sont jamais le seul produit de la culture qui a conduit à leur obtention : toutes les filières fournissent en même temps des « co-produits », c'est-à-dire des produits qui ne sont pas ceux recherchés mais qui ont une utilité.

De façon générale, la valorisation des co-produits est déterminante pour l'équilibre économique des filières.

La filière Bioéthanol/ETBE génère des coproduits valorisables tels :

- les vinasses, fraction liquide de la distillation (issues de la betterave, elles sont utilisées comme fertilisants de par leur richesse en matières minérales ; issues de céréales, elles sont recyclées dans le procédé ou utilisées en alimentation animale) ;
- les pulpes de betteraves bien valorisées par les ruminants ;
- les drèches de blé provenant de la filière en voie sèche riches en protéines et utilisées en alimentation animale.

Les vinasses peuvent être également méthanisées (voir point 6) et valorisées énergétiquement sous forme de biogaz ; une utilisation comme combustible, après leur concentration, est à l'étude et des essais effectués en mélange avec du fioul lourd en ont

démonstré la faisabilité industrielle. Les quantités produites sont importantes : pour les betteraves, les pulpes représentent environ la moitié de la matière sèche totale, et la vinasse quelques %.

La filière Biodiesel génère un coproduit valorisable tel que les tourteaux, utilisés en alimentation animale car représentant une source de protéines. Pour le colza, le tourteau représente une grosse moitié du poids de la graine.

Dans les filières classiques, seuls les sucres et huiles sont actuellement valorisés. Les enjeux de la recherche en matière de biocarburants consistent, d'une part, à l'amélioration du rendement de la conversion de la biomasse actuellement non utilisée, et d'autre part, à la gestion des coproduits issus des filières actuelles.

Rendement potentiel de bioéthanol (et ETBE)		Rendement potentiel des huiles végétales (et EMHV)	
Mat 1 ^{ère}	l/ha	Mat 1 ^{ère}	l/ha
Betteraves*	5060 ¹³	Maïs	172 ¹⁵
Cannes à sucre*	4550 ¹³	Colza [®]	1470 ¹
Sorgho sucrier*	494 ¹³	Tournesol [®]	825 ¹
Blé**	952 ¹³	Soja [®]	446 ¹⁵ / 550 ¹⁴
Maïs**	1960 ¹³	Palme [®]	4500 ¹⁴ / 5950 ¹⁵
Riz**	1806 ¹³	Huiles de friture	
Manioc**	2070 ¹³	Graisses animales	
* plantes saccharifères		® plantes oléagineuses	
** plantes amylacées			

Tableau 3 : Productivité en agrocarburants en fonction du type de matières premières des filières Essence et Diesel [1,14 15,16]

Selon la matière première utilisée, les surfaces agricoles nécessaires à la production d'une même quantité de biocarburant varient considérablement. Ainsi, les surfaces permettant d'obtenir un litre d'éthanol sont nettement moins importantes que celles à l'origine d'un litre de EMHV, comme en attestent les chiffres présentés dans le Tableau 3. Pour la production de bioéthanol, la betterave conduit à la meilleure productivité.

3.3.2 Impact des biocarburants conventionnels sur l'effet de serre

Vu d'une façon simpliste, on pourrait dire que le bilan « effet de serre » des biocarburants est nul étant donné que le dioxyde de carbone CO₂, produit de la combustion du carburant dans le moteur, est entièrement absorbé et recyclé par la photosynthèse lors de la croissance des végétaux utilisés pour leur production. Ceci n'est bien entendu pas juste puisque il faut également tenir compte des consommations intermédiaires d'énergie fossile pour la production de biocarburant (production agrochimique d'engrais et épandage sur les champs, carburant du tracteur, énergie pour distillation...), mais aussi des « gains » réalisés avec les coproduits. L'évaluation des émissions de gaz à effet de serre (CO₂, N₂O et CH₄) du puits à la roue (c'est-à-dire de la production de la matière première à la combustion des produits finaux) montre que l'utilisation des biocarburants permet une réduction nette des émissions par rapport aux carburants traditionnels, même si cette évaluation reste variable selon la méthode de calcul adoptée. Réaliser ce bilan global n'est donc pas chose aisée.

Observons à ce propos la variabilité du ratio [Energie restituée / Energie non renouvelable (fossile) mobilisée] selon diverses hypothèses de travail, ce qui peut faire facilement basculer une observation favorable vers une conclusion négative.

		Biocarburants			
Références		Huile	Biodiesel	Éthanol de betterave	Éthanol de froment
[8]	Global* Restreint** D'usage***	6,5 1,7 3,1	4,5 1,1 2,1	1,4 1,1 1,4	4,5 1,1 2,1
[17]		huile de palme ~9 huiles végétales usagées 5-6 soja ~3 colza (EU) ~2,5		canne à sucre ~8 maïs ~1,5 blé ~2 betteraves ~2	
		Diesel (pétrole) ~0,8-0,9		Essence (pétrole) ~0,8	
Carburants classiques					

Tableau 4: Ratios énergétiques (* : Tenant compte de la valorisation énergétique complète de tous les co-produits, ** : Quantité d'énergie du biocarburant, sans aucune valorisation des co-produits, *** : Ratio intégrant la valorisation réellement pratiquée des co-produits)

4. Biocarburants de deuxième génération

Dans les filières des carburants de synthèse [18], dits de seconde génération, toute la biomasse de la plante peut être valorisée, selon deux voies essentielles :

- la fermentation alcoolique de la totalité de la plante ;
- le développement technologique de la gazéification de la biomasse lignocellulosique.

Ces nouvelles techniques conduisent naturellement à des rendements de production beaucoup plus élevés que pour les carburants traditionnels, et dépendent de ressources beaucoup plus diversifiées. Dans ces nouvelles filières (figure 5), le mode d'exploitation de la terre est fort différent, opposant les cultures nobles sur des sols agricoles de grande qualité avec apports d'engrais, exploitées dans les filières « biocarburants conventionnels », aux terres plus pauvres exploitées dans la production de biocarburants de synthèse.

Ces nouveaux procédés [19] font l'objet de programmes de Recherche et Développement qui ont pour challenge de faire passer les productions de l'échelle laboratoire (ou pilote) à l'échelle industrielle, dans des délais assez courts pour faire face à la concurrence.

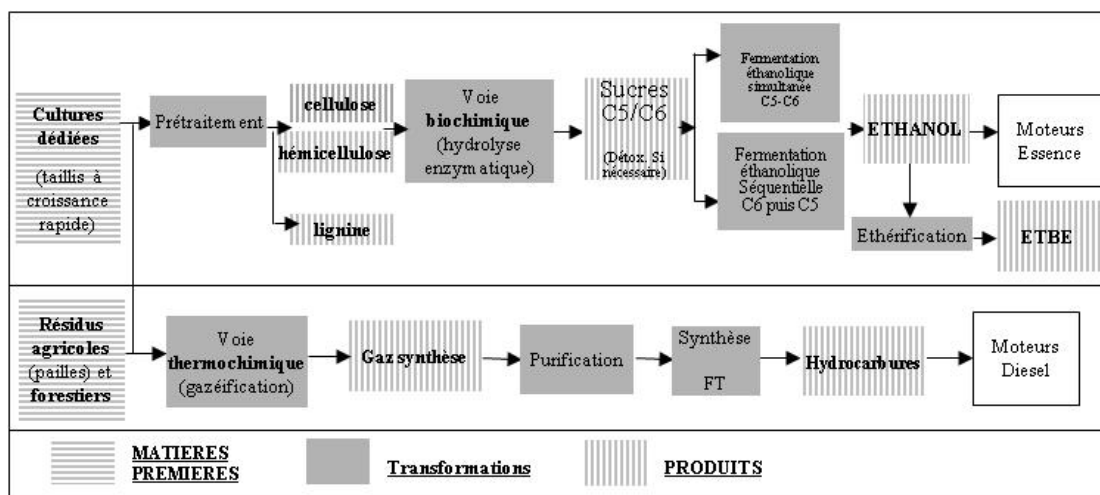


Figure 5 : Schémas de procédés pour les deux filières de production de biocarburants de seconde génération pour moteurs Essence et Diesel

4.1 Ethanol lignocellulosique

Le bioéthanol peut aussi être produit à partir de « biomasse lignocellulosique », par exemple le bois ou encore les herbacées. La matière lignocellulosique constitue une ressource abondante, bon marché qui n'entre pas en compétition avec les ressources alimentaires. Les procédés mis en œuvre exploitent la totalité de la plante avec comme challenge d'utiliser certaines parties difficilement transformables pour permettre de produire des extraits fermentescibles par voie traditionnelle (c'est-à-dire en utilisant *Saccharomyces Cerevisiae*) ou d'exploiter de nouvelles souches génétiquement modifiées capables d'exploiter l'ensemble de la biomasse prétraitée par voies physique, chimique et/ou enzymatique. Le tableau 5 montre le potentiel énergétique que représente cette ressource.

Ressources	Production France (Mt M.S..)	Production Monde (Mt M.S.)	Potentiel énergétique monde (Gtep)
Résidus agricoles	116	5700	1,8
dont paille	95	3000	0,9
Résidus forestiers	29	2700	1
Résidus bois (industrie)	18	916	0,3
Maximum récupérable supplémentaire		31	13,5

Tableau 5 : Production annuelle de biomasse lignocellulosique (tonnes matière sèche : t M.S..) et potentiel énergétique (tonnes équivalent pétrole) [1]

4.1.1 Matières premières

Pour la grande majorité des espèces végétales d'intérêt, la biomasse est composée essentiellement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Les proportions de chacun de ces constituants peuvent varier de manière considérable : entre 40 et 60% de cellulose, 20 à 40 % d'hémicellulose et 10 à 25 % de lignine. La molécule de cellulose, constituant majoritaire des parois cellulaires chez la plupart des plantes, se présente sous la forme de longues chaînes de molécules de glucose. Ces molécules de cellulose sont reliées entre elles grâce à l'hémicellulose, chaîne de sucres à 5 atomes de carbone (pentoses) dont principalement le xylose.

Grâce à une réaction d'hydrolyse, la cellulose et l'hémicellulose peuvent libérer les sucres simples (monosaccharides) qui sont ensuite convertis en éthanol par fermentation, comme dans le cas de la production des biocarburants de 1^{ière} génération. Malheureusement, la souche sauvage de la levure utilisée n'est pas capable d'assimiler et de fermenter les pentoses. La lignine, qui effectue la liaison entre les faisceaux de cellulose et confère à la plante sa structure, n'est pas convertie en éthanol lors des étapes précédentes.

4.1.2 Procédés de production

Le challenge principal de cette filière est de rendre accessible aux micro-organismes les sucres présents dans les structures polysaccharidiques complexes tout en limitant les effets néfastes sur des rendements de la fermentation. Globalement, la production d'éthanol-carburant à partir de biomasse lignocellulosique comprend cinq grandes étapes [10]: le prétraitement de la biomasse, l'hydrolyse de la cellulose et de l'hémicellulose, la fermentation des hexoses et des pentoses, la séparation et le traitement des effluents (voir Figure 5).

a. Prétraitements de la biomasse [20].

Les matériaux lignocellulosiques sont soumis à un prétraitement physique, chimique, ou enzymatique (par action d'une enzyme spécifique). Les prétraitements les plus prometteurs font l'objet de pilotes de démonstration, sans parvenir encore à une évolution véritable vers une taille industrielle importante. Ce sont :

- *l'hydrolyse à l'acide dilué* : chauffage en présence d'acide sulfurique dilué en proportion de 1 à 3% par rapport à la matière sèche lignocellulosique
- *la thermohydrolyse* : cuisson à l'eau sous forte pression (50 bar) en procédé continu ou discontinu pendant 15 à 60 minutes
- *l'explosion à la vapeur* : chauffage rapide (180-270°C) pendant quelques minutes par injection de vapeur saturée sous pression (10-50 bar).

La grande variété des méthodes de prétraitement de la biomasse a conduit à l'élaboration de nombreux schémas de traitement pour la production d'éthanol, pour lesquels il est difficile, a priori, de faire choix, uniquement, sur base de critères technico-économiques [21].

b. Hydrolyse et Fermentation (précédées ou non d'une détoxification et d'une fermentation séparée des pentoses)

En complément de la fermentation des hexoses, la détoxification et la fermentation des pentoses libérés lors du prétraitement peuvent être effectuées pour accroître le rendement en bioéthanol. La configuration séquentielle employée pour obtenir de l'éthanol cellulosique implique que la fraction solide de la matière prétraitée soit soumise à l'hydrolyse (saccharification), cette fraction contient la cellulose accessible par les acides ou les enzymes. Une fois l'hydrolyse achevée, l'hydrolysats résultant est fermenté et converti en éthanol. Le reste du procédé est analogue à celui de l'éthanol de 1^{ière} génération. Ce type de configuration a largement été testé. D'autres schémas sont à l'étude et incluent des saccharification/fermentation simultanées.

La fermentation des pentoses, quand elle est effectuée, est accomplie dans une unité indépendante. La nécessité de séparer les 2 types de fermentation est liée au fait que la fermentation des pentoses requiert la présence de microorganismes tolérant les pentoses et les hexoses et dont les cinétiques sont plus lentes que celles des microorganismes qui assimilent uniquement les hexoses. De plus, ces derniers sont plus sensibles aux inhibiteurs et à l'éthanol produit. Pour ces raisons, l'hydrolysats provenant de l'hémicellulose doit être détoxifié par des méthodes de type échange d'ions, entraînement à la vapeur ou rétro-évaporation. Si la

fermentation des hydrolysats de cellulose et de l'hémicellulose est effectuée de manière séparée, les volumes d'hydrolysats qui doivent être détoxifiés sont plus faibles.

Les développements les plus récents [20] en fermentation alcoolique des dérivés lignocellulosiques s'orientent vers l'utilisation de micro-organismes génétiquement modifiés, capables de fermenter les sucres en C5 et en C6 lors de la même étape, et présentant le moins de sensibilité possible aux toxiques produits lors des étapes de prétraitements. Cette technologie implique l'utilisation de souches mutantes bactériennes qui possèdent la capacité naturelle d'assimiler les pentoses et les hexoses présents (hémicellulose) et chez qui on introduit le gène principal codant pour la fermentation provenant d'une autre bactérie. Ceci permet de produire de l'éthanol par voie bactérienne en exploitant les deux types de monosaccharides. L'autre filière consiste en une saccharification et une fermentation simultanées par une autre souche recombinante ayant la capacité de dégrader et de fermenter la cellulose, éliminant le besoin d'introduire des enzymes dégradant cette dernière.

4.2 Biocarburant de seconde génération pour moteurs diesel – Filière « Biomass to liquid »

Parmi les processus thermo-chimiques de production permettant de transformer la biomasse, on peut distinguer :

- La *pyrolyse* : processus de transformation de la matière organique (biomasse) par la chaleur, en l'absence d'oxygène, conduisant, selon les paramètres opératoires (température de réaction, vitesse de chauffage, temps de séjour, ...), à trois états différents : charbon de bois, huile de pyrolyse (carburant de moteur diesel, voire intermédiaire de production de biocarburants) et gaz permanents ;
- La *liquéfaction directe* : processus de transformation de la biomasse conduisant à la production directe de carburants liquides, par mise en solution (aqueuse ou organiques) de la matière organique réduite en particules; cette voie semble actuellement être abandonnée ;
- La *gazéification de la biomasse*.

Nous insistons sur le développement technologique de la gazéification de la biomasse lignocellulosique (paille, bois, plantes entières...), notamment pour la production de gaz de synthèse qui, transformés par le procédé Fischer-Tropsch, conduisent à des biocarburants liquides de bonne qualité (sans soufre ni aromatique), proches du gazole, donc parfaitement adaptés aux moteurs diesel. On y utilise donc le carbone contenu dans la plante et de l'eau pour produire des hydrocarbures. Ce procédé, mis au point par les Allemands pendant la deuxième guerre mondiale pour produire du gazole à partir de charbon, est toujours utilisé en Afrique du Sud pour fabriquer du kérosène.

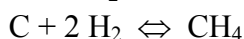
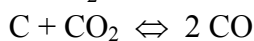
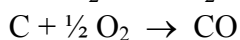
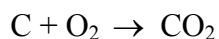
4.2.1 Procédé de gazéification

La gazéification est la transformation thermique et chimique d'un combustible solide (charbon, biomasse...) en présence d'un réactif gazeux (oxygène, vapeur d'eau, hydrogène...). Cette transformation a pour but la conversion du solide en un mélange gazeux appelé « gaz de synthèse » ou « syngas » contenant principalement les espèces H₂, CH₄, CO, CO₂, H₂O dans des proportions dépendant du procédé, de la matière première et du type d'utilisation.

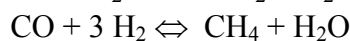
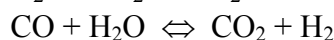
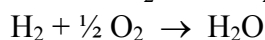
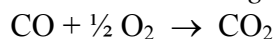
Diverses applications du mélange gazeux sont à signaler mais, pour la production de biocarburants, un taux de conversion maximum est recherché, en CO et H₂ (avec un ratio H₂/CO proche de 2).

Le mécanisme réactionnel pour la production du gaz de synthèse se compose d'une série :

- *de réactions hétérogènes:*



- *de réactions homogènes:*



La composition du syngas issu de la gazéification de la biomasse [22] est (% vol.) :
CO : 28-36 - H₂ : 22-32 - CO₂ : 21-30 - CH₄ : 8-11.

Le processus est fortement exothermique, nécessitant un apport important d'énergie, le plus souvent réalisé par la combustion partielle de masse carbonée avec oxygène ou air, et engendrant de la sorte une baisse du rendement d'utilisation de la biomasse.

Quelques obstacles à la gazéification de la biomasse doivent être mentionnés, notamment une matière première variable, entraînant des problèmes d'alimentation et nécessitant un prétraitement; les réacteurs de gazéification doivent aussi être souples vis-à-vis des alimentations diverses.

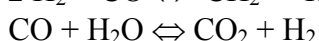
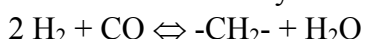
Beaucoup de recherches sont encore nécessaires pour passer à l'industrialisation du procédé de gazéification de la biomasse.

4.2.2 Synthèse de Fischer-Tropsch

Le gaz de synthèse constitue la matière première pour l'élaboration de carburants liquides tels que le méthanol (mélangé à l'essence, ou sous forme de MTBE), le diméthyléther (carburant type LPG pour moteur diesel), le BTL et l'hydrogène.

La synthèse Fischer-Tropsch est un processus de fabrication, à partir de gaz de synthèse, d'un carburant de type gazole ou kérosène constitué d'un mélange d'hydrocarbures de différentes longueurs de chaîne carbonée (figure 6). Le procédé BTL (pour « Biomass to liquid ») convertit la biomasse in fine en liquide hydrocarbures.

Une réaction exothermique a lieu entre hydrogène et monoxyde de carbone, conduisant à la formation de radicaux alkyles et d'eau selon:



Des réactions entre radicaux alkyles (en présence de catalyseur à base de Fe ou de Co), de type « polymérisation », entraînent l'apparition de chaînes carbonées de types oléfinique et paraffinique:



On recherche des produits comprenant 10 à 20 atomes de carbone, avec une fourchette de températures d'ébullition semblable à celle d'un gazole. Une opération d'hydrocraquage catalytique permet en outre de convertir un maximum de cires (>C₂₀) en carburant diesel.

Signalons l'importance de l'étape de purification après l'étape de gazéification visant à éliminer les goudrons, sulfures, alcalins, cendres qui risqueraient d'altérer le catalyseur.

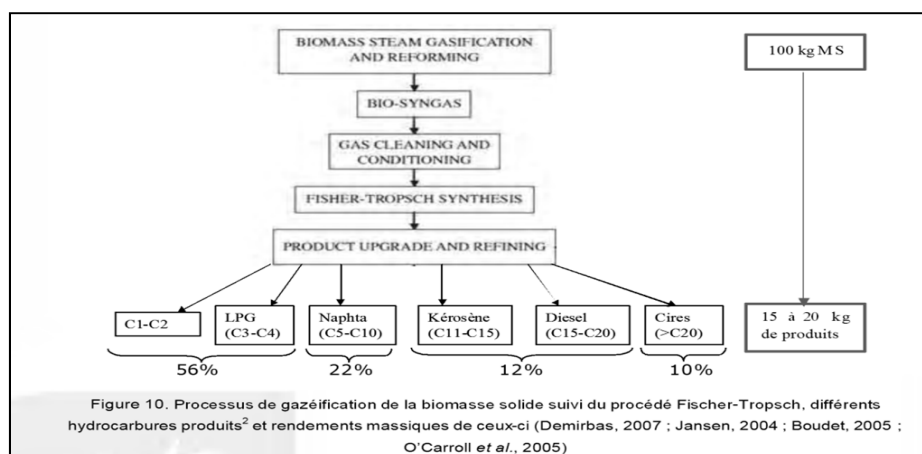


Figure 6 : Schéma-bloc de gazéification et rendement [23]

4.3 Bilan sur les biocarburants de la seconde génération

4.3.1 Sous-produits et valorisation pour l'éthanol lignocellulosique

Les nouvelles tendances en génie des procédés du bioéthanol visent à produire des co-produits autres que des combustibles, qui contribuent à équilibrer l'économie de la production mondiale d'éthanol. De cette façon, de nombreux matériaux générés pendant le processus et considérés comme des déchets pourraient devenir utiles et commercialisables en tant que co-produits. Si on reprend l'exemple de la bagasse issue de la production de l'éthanol et utilisable dans l'alimentation animale, elle peut aussi servir de matière première pour la production d'enzymes, d'acides aminés, d'acides organiques, de produits pharmaceutiques, ... voire pour la production de charbon actif avec des capacités d'adsorption exceptionnellement élevées. Cette reprise implique l'utilisation de nouveaux équipements qui rendent nécessaire l'exécution d'études de faisabilité, afin d'évaluer les conséquences économiques et la viabilité de ces lignes de production supplémentaires [24].

4.3.2 Point de vue économique pour l'éthanol lignocellulosique

Les travaux pour obtenir l'éthanol à partir de diverses matières lignocellulosiques se poursuivent activement dans de nombreux pays depuis plusieurs décennies et les pronostics sont plus que prometteurs. Selon Didden *et al.* [20], l'évolution du prix de revient au litre en fonction des diverses matières premières serait de 0,20 € (au départ de déchets urbains) - 0,25 € (bois et co-produits forestiers) - 0,27 € (co-produits agricoles) en 2007 à respectivement 0,17-0,22-0,21 € en 2010. Certains auteurs annoncent un coût de 0,15 €/l d'ici 2020.

Une seule unité industrielle d'éthanol lignocellulosique est en activité depuis 2004 au Canada (Iogen, 4 millions litres/an à terme) réalisant l'hydrolyse enzymatique et la fermentation simultanée des sucres en C5 et C6. Un premier démonstrateur consacré aux BTL devrait voir le jour en France.

4.3.3 Bilan de gaz à effet de serre

Le bilan sur la production des gaz à effet de serre est positif sur la filière complète de production et de l'utilisation du biocarburant, encore plus pour la deuxième que pour la première génération. Selon l'étude du puits à la roue menée par JRC/Eucar/Concawe (2007) [25], les émissions des gaz à effet de serre (tout en tenant compte du N₂O et du méthane) pourraient être réduites de 30 à plus de 90% selon les filières et les ressources considérées, par rapport à l'essence et au diesel dans le domaine du transport routier (voir figure 7).

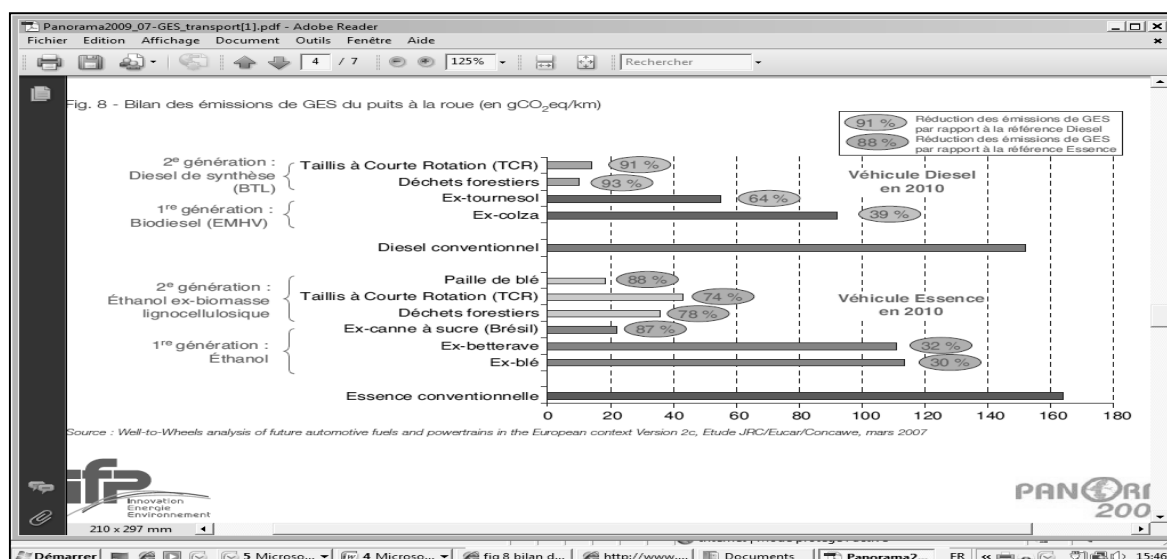


Figure 7 : Bilan des émissions de GES du puits à la roue (en gCO₂/km) [26]

5. Une troisième génération de biodiesel : au départ de micro-algues

5.1 Matières premières

Les biocarburants de troisième génération sont principalement produits par des micro-algues. Il existe entre 200 000 et plusieurs millions d'espèces, ce qui constitue un réel potentiel pour la recherche et pour l'industrie. Elles vivent tant en milieu salin qu'en eau douce, et peuvent, le cas échéant, croître dans des eaux résiduaires. Avec leur contenu lipidique (triglycérides et acides gras libres) pouvant atteindre plus de 75% du poids de leur biomasse sèche [16], les micro-algues constituent une alternative particulièrement attractive aux biocarburants actuels. Grâce à une cinétique de croissance beaucoup plus élevée (temps de dédoublement compris entre quelques heures et quelques jours) que les espèces oléagineuses terrestres, la culture des microalgues permet d'augmenter le rendement de production d'huile par unité de surface d'un facteur 30, à taux d'illumination constant. De plus, lors de leur croissance, les algues fixent en moyenne 1,7 kg de CO₂ par kilogramme de biomasse.

5.2 Procédés de production

La production d'algocarburants est réalisée en étapes successives comme le montre la figure 8.a : culture de micro-algues, récolte et concentration de la biomasse, séchage (le cas échéant), extraction des lipides et estérification – transestérification des huiles.

On distingue deux façons de cultiver ces micro-organismes : d'une part, avec des procédés dit «intensifs» où les microalgues croissent dans des photobioréacteurs (PBR) [27] « fermés » où les paramètres physico-chimiques sont contrôlés et d'autre part, avec des procédés dit «extensifs» dans des bassins extérieurs de type lagunage. Le milieu de culture y circule grâce à des roues à aubes. Les éléments nutritifs sont apportés de manière à garantir, dans les conditions standards, une croissance optimale des algues. Un bullage assure l'apport en CO₂ nécessaire à leur croissance. Ces systèmes, de par leur caractère ouvert, sont très sensibles à la contamination.

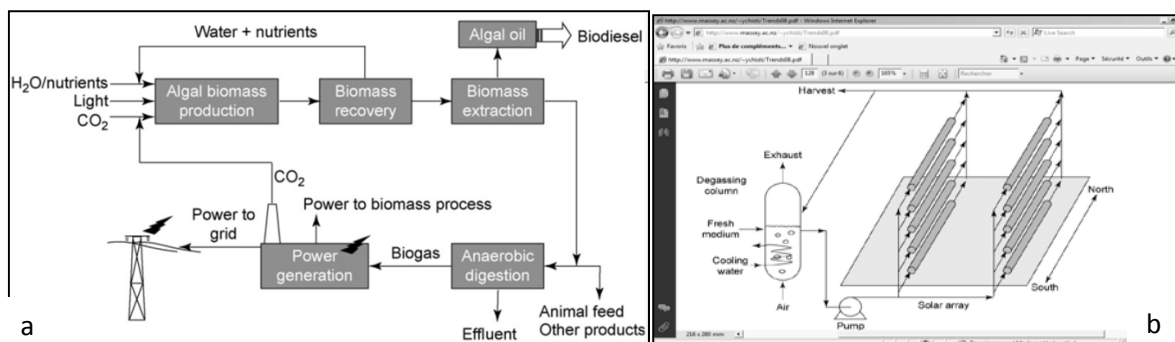


Figure 8.a : Procédé global d'utilisation des microalgues à des fins de productions énergétiques (biodiesel et biogaz) et Figure 8.b : Exemple de design de photobioréacteur tubulaire (extrait de [28])

De façon simpliste et restrictive, les PBR ont longtemps été dédiés à la production de produits à hautes valeurs ajoutées. Leur utilisation dans le cadre de la production de biocarburants requiert une optimisation de la consommation énergétique de l'ensemble du procédé, spécialement dans les étapes de transfert de masse et de circulation des fluides. Deux types de design sont développés : les PBR tubulaires, qui consistent en un arrangement de tubes de verre ou de plastique transparent [29] et les PBR plats verticaux ou inclinés. Dans le premier cas, une disposition parallèle des tubes (figure 8.b) sous forme de palissade permet de maximiser, pour un volume de culture donné, la surface du système exposée à la lumière. Une solution alternative est d'utiliser des réacteurs à plateaux dont la circulation est intégralement assurée par l'injection de bulles.

Une production durable de biodiesel algal nécessite d'obtenir de grandes quantités de biomasse en utilisant un maximum de ressources librement disponibles comme la lumière du soleil ou certains nutriments présents dans des eaux naturelles ou résiduaires.

La récolte des micro-algues représente entre 20 et 30% du coût de production des algocarburants. Ce problème est lié, notamment, à la faible densité de biomasse obtenue lors de leur culture. Celle-ci varie typiquement de 0,5 g à 1 g de biomasse sèche par litre en bassin ouvert (de type lagune), et peut s'élever jusqu'à 5 g par litre (voire 20 g par litre, dans des cas exceptionnels) en photo-bioréacteur fermé [29,30]. Les tentatives d'augmentation des concentrations en biomasse n'en sont toutefois pas à leur fin. D'autre part, la conversion industrielle de cette biomasse en algocarburant requiert l'obtention d'une boue cellulaire contenant au moins 300 à 400 g de biomasse sèche par litre. Ceci implique de concentrer entre 100 et 1000 fois la suspension algale sortant du système, étape nécessitant un grand apport d'énergie.

Si certaines espèces peuvent se récolter simplement par filtration sur des soies, après décantation ou par filtration membranaire voire séparation ultrasonique, d'autres doivent subir une étape de préconcentration, avant d'être centrifugées pour réduire son taux d'humidité. Des méthodes de floculation/décantation peuvent également être envisagées. Suivant les sous-produits à récupérer, un séchage sera envisagé. Les étapes associées à la récolte et au séchage peuvent être fortement consommatrices d'énergie. La sélection d'une technologie adéquate ne peut donc se faire qu'au cas par cas, et son optimisation est une condition essentielle dans l'élaboration d'une production économiquement viable. Les techniques classiques pour extraire les lipides des microalgues consistent à utiliser un solvant organique (type hexane). Des méthodes alternatives, entre autres le CO₂ supercritique, qui offrent des bilans globaux intéressants, sont à l'étude.

La conversion de la biomasse algale en biofuel [31] peut être opérée par les techniques suivantes :

- la transestérification (développée pour les plantes oléagineuses terrestres) appliquée sur les lipides algaux après extraction ;
- les conversions biochimiques, qui incluent la digestion anaérobie (biométhanisation), pour la production de biogaz, et qui peuvent s'appliquer sur l'ensemble de la biomasse ou plus spécifiquement sur le résidu après extraction des lipides,
- la combustion directe ou la co-combustion, et
- la conversion thermochimique (gazéification – voir paragraphe 4.2.1).

5.3 Co-produits et valorisation

Le résidu de biomasse pourrait servir aux animaux comme aliment riche en protéines, ou éventuellement matière première [32] pour la production de petites quantités d'autres produits algaux à haute valeur ajoutée. Dans les deux cas, les revenus issus de la vente de ces résidus pourraient compenser les coûts liés à la production de ce type de biodiesel. La voie alternative de valorisation des résidus de l'extraction d'huile par digestion anaérobie, évoquée ci-dessous, constituera la source principale d'énergie pour la majeure partie de la production et de la transformation de la biomasse algale.

5.4 Productivité potentielle des microalgues

Les cultures actuelles de soja et de palmiers à huile ont une fraction lipidique inférieure à 5% et ne peuvent donc fournir que de faibles quantités de biodiesel. En fait, même si le contenu lipidique des algues ne s'élevait qu'à 15% de leur biomasse sèche, leur culture pour la production de biodiesel serait encore acceptable et nécessiterait des surfaces nettement plus faibles que celles nécessaires pour les végétaux supérieurs.

Matières premières (cultures)	Rendement d'huile (l/ha)	Superficie nécessaire ^c (M ha)	Pourcentage de la surface cultivable aux USA
Soja	446	594	326
Palmier à huile	5950	45	24
Microalgues ^a	136 900	2	1,1
Microalgues ^b	58 700	4,5	2,5

Tableau 6: Comparaison des différentes sources de biodiesel [16]
 (^a 70% d'huile (en poids) dans la biomasse – ^b 30 % d'huile (en poids) dans la biomasse
^c pour couvrir 50% des besoins en carburants pour le transport au USA)

Ainsi, selon Chisti ([16] – tableau 6), 5% de la surface cultivée aux États-Unis seraient suffisants pour produire annuellement les 0,53 milliards de m³ nécessaires aux transports du pays. Ce chiffre est à comparer aux 48 % de la surface qui seraient nécessaires pour réaliser le même objectif en cultivant des palmiers à huile.

5.5 Impacts environnementaux

L'utilisation de micro-algues peut aussi être regardée comme une voie de capture du CO₂, ce qui, à ce titre, offre de nombreux avantages. En autres, elles peuvent capturer le CO₂ de différentes sources, dont celui des gaz industriels (ces gaz sont responsables de plus de 7% des émissions totales de CO₂ et contiennent jusqu'à 15% de CO₂ disponible à moindre frais), et le CO₂ renfermé par les carbonates solubles (NaHCO₃, Na₂CO₃). Ces derniers peuvent être

obtenus par absorption physique ou chimique, puis utilisés comme nutriments pour la culture algale. Le rendement de production peut atteindre 20 à 40 TEP/ha/an.

6. Production de biogaz

Même si la fermentation méthanique est utilisée pour la production de biogaz (biocarburant gazeux), c'est cependant avant tout une filière de valorisation énergétique de la biomasse et des déchets (production par cogénération d'électricité et de chaleur).

Le biogaz est le produit de la décomposition microbologique de matières organiques animales ou végétales – les boues de station d'épuration, les effluents d'élevage et des industries agro-alimentaires, et les déchets ménagers constituent les principaux substrats- par des bactéries méthanogènes anaérobies, c'est-à-dire en l'absence d'oxygène. Plusieurs consortiums de bactéries entrent en action en vue de réaliser les diverses étapes de la fermentation méthanique. La méthanisation passe successivement par l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et enfin la méthanogénèse (voir figure 9). Lors de sa dernière étape, le processus aboutit en la production de méthane suivant les réactions :

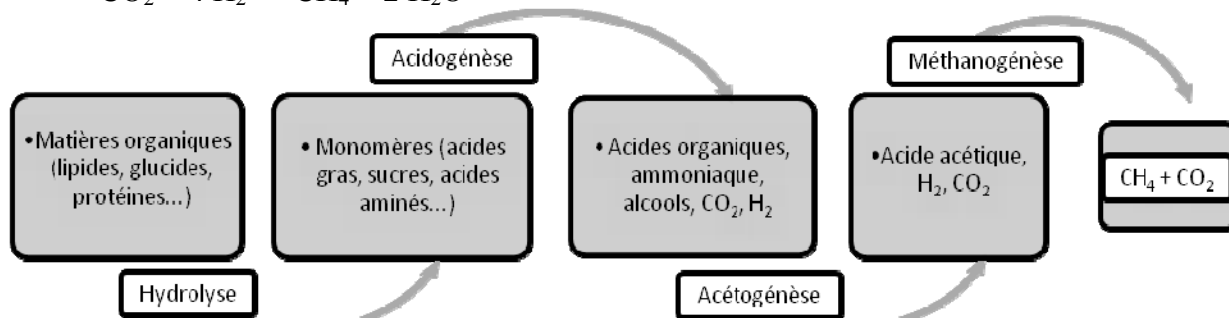
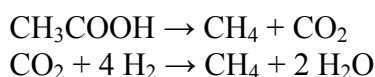


Figure 9 : Schéma simplifié des étapes de méthanisation de matières organiques [1]

Un gaz (biogaz essentiellement constitué de méthane et de dioxyde de carbone) ainsi qu'un résidu solide non biodégradable (valorisable en agriculture comme amendement de sols) sont les principaux produits de la biométhanisation.

Les installations utilisent la technologie de la fermentation en continu. Les réacteurs sont :

- agités par agitation mécanique, recyclage d'une partie du biogaz produit : le but est de favoriser le contact entre le substrat et les micro-organismes, d'empêcher la stratification, et d'augmenter ainsi les cinétiques des phénomènes (hydrolyse et digestion anaérobie) pour diminuer le temps de séjour et le volume réactionnel ;
- et contrôlés en température : une température de 50-55°C (bactéries thermophiles) évite les contaminations et constitue une condition favorable à l'activité méthanogénique.

Les temps de séjour dans le digesteur varient entre 10 et 25 jours, en fonction de la charge en matières organiques des déchets alimentés et des conditions opératoires choisies.

Les systèmes peuvent ne comporter qu'un seul fermenteur (biométhaniseur) ; mais pour des raisons de pH optimaux différents entre acidogénèse et méthanogénèse, le fermenteur peut être subdivisé en deux parties, pour un meilleur fonctionnement du process. Une composition moyenne de biogaz issus de telles unités de biométhanisation est donnée au tableau 7.

Pour les usages carburant, le biogaz doit répondre aux spécifications reprises au tableau 7. Pour ce faire diverses technologies d'épuration doivent être mises en œuvre (déshydratation,

dépoussiérage, élimination de l'H₂S par adsorption sur charbon actif ou « éponges ferrugineuses »...). Le biogaz est ensuite comprimé aux alentours de 250 bar.

Le projet BIOGASMAX [33] a pour objectif principal de démontrer que les villes peuvent produire du carburant de haute qualité viable et rentable techniquement au départ de déchets organiques. Les villes y participant actuellement sont Lille, Goteborg, Stockholm, Haarlem...

Composés du biogaz	Comp. moyenne (% vol)	Biogaz 1	Biogaz 2	Biogaz 3	Spécification carburant
CH ₄	55-75	45 %	60 %	68 %	>96-97 % vol
CO ₂	25-45	32 %	33 %	26 %	< 3 % vol
H ₂ S	0-1,5	5-20 mg/m ³	100-900 mg/m ³	400 mg/m ³	<23 mg/Nm ³
NH ₃	0,05				<32 mg/Nm ³
H ₂ O		4%	6%	5%	
PCI (kWh/Nm ³)		4,5	6,0	6,8	

Tableau 7: compositions moyennes du biogaz et spécifiques de 3 biogaz comparées aux spécifications du biogaz carburant (Biogaz 1 : fermentation spontanée au sein d'une décharge équipée d'une aspiration du biogaz ; Biogaz 2 : installation de méthanisation d'ordures ménagères brutes, type Valorga, Biogaz 3 : installation de méthanisation d'effluents industriels, ici ceux d'une distillerie)

Conclusion

Parmi les solutions étudiées dans le secteur des transports visant à atteindre le double objectif de combiner diminution de la dépendance au pétrole et réduction des impacts sur l'environnement, notamment en termes de rejets de GES, les biocarburants offrent de réelles perspectives et représentent effectivement un domaine d'actualité. Ces biofuels présentent en outre de très bonnes caractéristiques physico-chimiques en mélange avec les carburants d'origine fossile.

Sans toutefois représenter la seule solution aux problèmes des émissions de GES dans le secteur des transports et de réduction des besoins en pétrole, les biocarburants constituent l'option présentant, à moyen terme, l'un des meilleurs ratios Coût/efficacité.

Des avancées technologiques sont attendues, essentiellement au niveau des biocarburants de deuxième et troisième générations, pour en faire des substituts « transitoires » des carburants classiques pour le plus grand profit de l'environnement et la politique énergétique, c'est-à-dire aux caractéristiques durables.

Références bibliographiques

- [1] D. Ballerini et N. Alazard-Toux, Les biocarburants : Etat des lieux, perspectives et enjeux du développement, IFP Publications, Editions Technip, Paris, 341 pages (2006).
- [2] D. Thomas, Pourquoi et comment les biocarburants ?, *Biologie et Géologie*, n°2 (2007), 335-350.
- [3] Site d'accès au droit européen : <http://eur-lex.europa.eu/fr/index.htm>.
- [4] Site du Moniteur Belge : <http://www.staatsbladclip.be/moniteur/lois/2009/08/03/loi-2009011330.html>.
- [5] Site du sénat français : <http://www.senat.fr/rap/l06-078-21-1/l06-078-21-117.html>.
- [6] Plateforme biocarburants : <http://www.plateforme-biocarburants.ch/en/infos/eu-bioethanol.php>.
- [7] Statistiques disponibles sur le site de l'OCDE : <http://www.oecd.org/>.

- [8] Information disponible sur le site : <http://www.ifp.fr/actualites/dossiers/les-biocarburants>.
- [9] E. Poitrat, Biocarburants, *Techniques de l'Ingénieur*, BE 8550 (2009).
- [10] H-J. Huang, S. Ramaswamy, U.W. Tschirner, B.V. Ramarao, A review of separation technologies in current and future biorefineries, *Separation and Purification Technology*, 62 (2008), 1-21.
- [11] J.M. Marchetti, V.U. Miguel, A.F. Errazu, Techno-economic study of different alternatives for biodiesel production. *Fuel Process. Technol.*, 89: 8 (2008), 740-748.
- [12] J.M. Marchetti, V.U. Miguel, A.F. Errazu, Heterogeneous esterification of oil with amount of free fatty acids. *Fuel*, 86 (2007), 906-910.
- [13] O. Schoeling, E. Lievens, J.M. Jossart, Document FARR Wal, (2008), 15 pages.
- [14] D. Rajagopal and D. Zilberman. Review of Environmental, Economic and Policy Aspects of Biofuels World Bank Policy Research Working Paper No. 4341. (September 1, 2007).
- [15] R. Naylor et al., "The Ripple Effect: Biofuels, Food Security and The Environment." *Environment*, 47:9 (2007), 30-43.
- [16] Y. Chisti. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25 (2007), 294-306.
- [17] Worldwatch Institute. Biofuels for transportation: global potential and implications for sustainable agriculture and energy in the 21st century. Washington. (2006).
- [18] F. Broust, Ph. Girard, L. Van de Steene, Biocarburants de seconde génération, *Techniques de l'Ingénieur*, RE 110 (2008).
- [19] R. Sims, W. Mabee, J.N. Saddler, M. Taylor. An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource Technol.*, 101 (2010), 1570-1580.
- [20] I. Didderen, J. Destain, P. Thonart, Le bioéthanol de seconde génération. La production d'éthanol à partir de biomasse cellulosique. Les presses agronomiques de Gembloux, 128 p. (2008).
- [21] M. Von Sivers, G. Zacchi, A techno-economical comparison of three processes for the production of ethanol from pine. *Bioresource Technology*, 51 (1995) 43-52.
- [22] A. Demirbas, Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuels projections, *Energy Conversion and Management*, 49 (2008), 2106-2116.
- [23] O. Schoeling, Les biocarburants non conventionnels en Belgique pour aller au-delà de 5,75% à l'horizon 2010 (2007).
- [24] H. Ohara, Biorefinery, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 62 (2003), 474-477.
- [25] JRC/Eucar/Concawe : Weel to wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, Version 2c, 88p. (March 2007).
- [26] S. Vinot and P. Coussy, Panorama 2009. Les émissions de gaz à effet de serre des transports. 7p. (Novembre 2008).
- [27] C. Posten, Design principles of photobioreactors for cultivation of microalgae, *Eng. Life Sci.*, 9 :3, (2009), 165-177.
- [28] Y. Chisti. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotech.*, 26 (2008), 126-131.
- [29] O. Pulz, Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 57 (2001), 287-293 - O. Pulz. Gross W Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 65 (2004), 635-648.
- [30] P. Spalore, C. Joannis-Cassan, E. Duran, A. Isambert, Commercial application of microalgae. *J. Biosci. Bioeng*, 101 (2006), 87-96.
- [31] C. Posten, G. Schaub, Microalgae and terrestrial biomass as source for fuels - A process view, *J. Biotechnology*, 142:1 (2009), 64-69.
- [32] G.E. Molina, E.H. Belarbi, F.F.G Acien, M.A. Robles, Y. Chisti, Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotech. Advances*, 20 (2003), 491-515.
- [33] O. Schoeling, E. Lievens, J.M. Jossart. Document FARR Wal (2008) 15 pages.