ValBiom
valorisation de la biomasse asbl

LES BIOCARBURANTS NON CONVENTIONNELS EN BELGIQUE POUR ALLER AU-DELÀ DE 5,75% À L'HORIZON 2010 ?

Olivia Schoeling
Décembre 2007

UCL

1 INTRODUCTION 6

2 DÉFINITION 7

3 LA LIGNOCELLULOSE 9

3.1 SA COMPOSITION… 9
3.2 …ET CELLE DES CARBURANTS 10

4 PROCESSUS THERMOCHIMIQUES : PYROLYSE, LIQUEFACTION, GAZEIFICATION 11

4.1 LA PYROLYSE 11
4.2 LA LIQUÉFACTION DIRECTE 14
4.3 LA GAZÉIFICATION 14

5 PROCESSUS BIOCHIMIQUES DE TRANSFORMATION DE LA BIOMASSE 22

5.1 INTRODUCTION 22
5.2 ETHANOL LIGNOCELLULOSIQUE 22
5.3 BIOGAZ 25
5.4 BUTANOL 27

6 AUTRES PROCÉDÉS DE PRODUCTION DE BIOCARBURANTS 30

6.1 BTL DE MATIÈRES GRASSES 30
6.2 HYDROGÈNE 32
6.3 MICROALGUES 34

7 LES USINES PILOTES A TRAVERS LE MONDE 40

7.1 EUROPE 40
7.2 AILLEURS DANS LE MONDE 42

8 TABLEAU RECAPITULATIF 43

9 PERSPECTIVES DES BIOCARBURANTS NON CONVENTIONNELS EN BELGIQUE 44

10 CONCLUSION 44

11 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 45

Liste des tableaux

Tableau 1. Composition de végétaux lignocellulosiques (% matière sèche ; d'après Ballerini et Alazard-Toux, 2006) *10*
Tableau 2. Principaux produits de la pyrolyse de la biomasse obtenus à pression atmosphérique et selon les conditions de température et de vitesse de chauffe (Ballerini et Alazard-Toux, 2006) *11*
Tableau 3. Comparaison des propriétés des huiles pyroyitiques et du fuel lourd (Zhang et al., 2007) *12*
Tableau 4. Composition du syngas issu de la gazéification de la biomasse (Demirbas, 2007) *14*
Tableau 5. Caractéristiques physico-chimiques du méthanol, de l'éthanol et de leur dérivé (Ballerini et Alazard-Toux, 2006) *15*
Tableau 6. Principales caractéristiques du DME carburant (Ballerini et Alazard-Toux, 2006) *16*
Tableau 7. Caractéristiques des carburants testés dans le cadre du projet RENEW (Muth et Lenz, 2006) *19*
Tableau 8. Rendements actuel et futur de production de quelques biocarburants (d'après Hamelinck, Faaij, 2006) *20*
Tableau 9. Résultats de la simulation de gazéification combinée à une unité FT (Boissonnet et al., 2005) *21*
Tableau 10. Principaux procédés de prétraitement de la BLC (Ballerini et Alazard-Toux, 2006) *23*
Tableau 11. Composition moyenne du biogaz (Ballerini et Alazard-Toux, 2006) *25*
Tableau 12. Principaux paramètres du standard suédois du biogaz-carburant (Persson, Wellinger, 2006) *26*
Tableau 13. Comparaison de systèmes de production ABE récents utilisant du glucose comme substrat (Ezeji, Qureshi, Blaschnek, 2007) *28*
Tableau 14. Comparaison des caractéristiques du butanol-carburant, de l'essence et de l'éthanol-carburant (http://en.wikipedia.org) *29*
Tableau 15. Propriétés physico-chimiques du NExBTL comparées à celles du biodiesel et du diesel (EN590) *31*
Tableau 16. Comparaison de diverses ressources en huile (Chisti, 2007) *34*
Tableau 17. Contenu en huile de quelques espèces de microalgues (Chisti, 2007) *35*
Tableau 18. Comparaison des systèmes de production en bassin et en photobioréacteur (Chisti, 2007) *38*
Tableau 19. Liste non exhaustive des industries développant la production d'éthanol à partir de lignocellulose en Amérique du Nord en 2002 (Badger, 2002 ; Environment Canada, 1999) *42*

Liste des figures

Figure 1. Futur plan de route potentiel pour le développement des biocarburants de seconde génération 6
Figure 2. Principales filières de production des biocarburants de seconde génération 8
Figure 3. Structure de la cellulose 9
Figure 4. Structure des hémicelluloses (gauche) et de la lignine (droite) 9
Figure 5. Structure de la lignocellulose (http://lasen.epfl.ch) 10
Figure 6. Pyrolyse du bois (Ballerini et Alazard-Toux, 2006) 12
Figure 7. Procédé de production de méthanol, d'hydrogène, de BTL (FT Diesel) via un procédé de gazéification de la biomasse (Hamelinck et Faaij, 2006) 14
Figure 8. Structure du DME (http:// itl.chem.ufl.edu/2045_s00/lectures/9be_1.gif) 17
Figure 9. Comparaison de la consommation et des émissions engendrées par l'utilisation de DME ou de diesel lors de test sur route (Semelsberger et al., 2006) 17
Figure 10. Processus de gazéification de la biomasse solide suivi du procédé Fischer-Tropsch, différents hydrocarbures produits et rendements massiques de ceux-ci (Demirbas, 2007 ; Jansen, 2004 ; Boudet, 2005 ; O'Carroll et al., 2005) 18
Figure 11. Emissions d'un véhicule équipé d'un système d'injection Common Rail (Ballerini et Alazard-Toux, 2006) 19
Figure 12. Emissions d'un véhicule équipé d'injecteurs pompe (Ballerini et Alazard-Toux, 2006) 20
Figure 13. Schéma générique de production d'éthanol ex-biomasse lignocellulosique 22
Figure 14. Schémas de procédés de production d'éthanol ex-BLC (Ballerini et Alazard-Toux, 2006) 24
Figure 15. Méthanisation (http://fr.wikipedia.org) 25
Figure 16. Schéma simplifié du métabolisme de la biomasse par les clostridies solvantogènes (Ezeji, Qureshi, Blaschnek, 2007) 27
Figure 17. Rendements du procédé d'hydrotraitement des huiles végétales (d'après Ballerini et Alazard-Toux, 2006) 30
Figure 18. Quantité de matières premières nécessaires pour la production de 100 000 t d'équivalent gazole (d'après Ballerini et Alazard-Toux, 2006) 30
Figure 19. Diatomées vues au microscope (http://fr.wikipedia.org) 35
Figure 20. Vue schématique de diatomées (Daniélo, 2005) 35
Figure 21. Schéma d'un bassin aménagé en circuit (Chisti, 2007) 36
Figure 22. Schéma d'un photobioréacteur tubulaire disposé en rangées droites (à gauche) et photo d'un photobioréacteur hélocoïdal (à droite) (Chisti, 2007) 37

Lexique

Rendement énergétique : rapport du contenu énergétique des produits sur le contenu énergétique de la biomasse

Bioraffinage : processus de valorisation de la biomasse brute visant l'obtention de plusieurs produits finaux, à la plus haute valeur ajoutée possible.

BLC : biomasse lignocellulosique

BTL : biomass to liquid

C : carbone

CO : monoxyde de carbone

CO_2 : dioxyde de carbone

CTL : coal (charbon) to liquid

DME : DiMéthyl Ether

FT : Fischer-Tropsch

GNL : gaz naturel liquéfié

GTL : gas to liquid

H_2 : hydrogène

HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques

HC : hydrocarbone

LPG : liquified petroleum gas

MON : indice d'octane moteur

MS : matière sèche

MTBE : Méthyl Tertio Butyl Ether

nm^3 : mètre cube normal

NO_x : oxyde d'azote

O_2 : oxygène

PCI : pouvoir calorifique inférieur

PCS : pouvoir calorifique supérieur

Rdt : rendement

R&D : recherche et développement

RON : indice d'octane recherche

t : tonne

1 Introduction

Pour subvenir à nos besoins énergétiques nous disposons et disposerons à l'avenir, d'une part, des ressources fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) à des prix qui ne cesseront d'augmenter avec leur « raréfaction », et d'autre part, des ressources renouvelables à savoir le soleil, le vent, l'eau et la biomasse.

Nos besoins énergétiques sont électriques, calorifiques, moteurs. Les biocarburants sont principalement destinés à couvrir nos besoins énergétiques moteurs. Ils sont, à côté de la mobilité douce, des transports en commun et de l'Utilisation Rationnelle de l'Energie en général, une des solutions aux problèmes énergétiques et environnementaux induits par le transport.

Le challenge des biocarburants d'aujourd'hui et des années à venir porte sur la valorisation énergétique optimale des différents types de biomasse en biocarburant. Or, la production de biodiesel est limitée par le potentiel de production de colza et la durabilité des autres huiles végétales disponibles sur le marché (telles que l'huile de colza et l'huile de palme) ; la consommation belge d'éthanol est quant à elle limitée par le marché automobile, dédié à 70% au diesel.

Les carburants utilisés à l'heure actuelle sont très majoritairement liquides. Des biocarburants non conventionnels liquides seront donc préférés pour des raisons d'ordre pratique, technique et logistique.

C'est dans ce cadre que la Commission européenne va encourager les Etats-membres à soutenir les biocarburants de seconde génération *via* l'obligation d'incorporation de biocarburant dans les carburants fossiles (EC, 2006). Une étude réalisée par le Conseil de recherche sur les biocarburants (BIOFuels Research Advisory Council, BIOFRAC) pour la Commission européenne a permis d'établir un plan de route à court, moyen et long terme relatif au développement du marché des biocarburants en Europe.

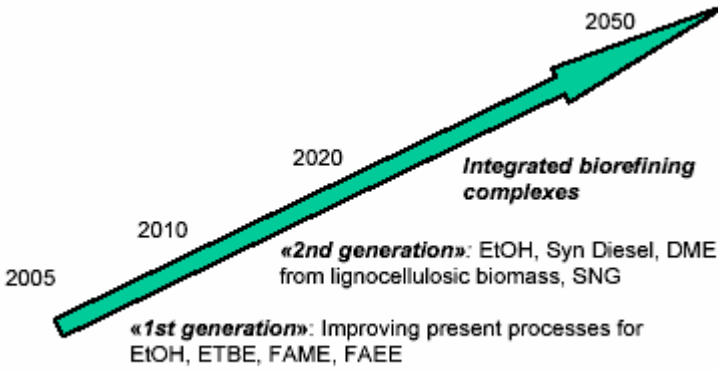

Figure 1. Futur plan de route potentiel pour le développement des biocarburants de seconde génération

Ce plan projette la mise en place et le déploiement des biocarburants en Europe en 3 phases (BIOFRAC, 2006) (Figure 1) :

- Une première phase à court terme (2010), durant laquelle les technologies existantes (biocarburants de première génération) sont améliorées, la R&D sur les biocarburants de seconde génération et la bioraffinerie approfondies et des usines de démonstration de biocarburants de seconde génération mises en œuvre ;
- Une seconde phase à moyen terme (2010-2020) qui verra le déploiement de la production des biocarburants de seconde génération, la poursuite de la R&D sur les biocarburants issus de la biomasse lignocellulosique (ex-BLC) et le concept de bioraffinerie, ainsi que le développement des cultures énergétiques et d'une agriculture durable ;
- Une troisième phase (au-delà de 2020) au cours de laquelle les biocarburants de seconde génération seront produits à grande échelle et les complexes intégrés de bioraffinage déployés.

Le rapport BIOFRAC (2006) soutient enfin l'objectif de 25% de biocarburant dans les carburants routiers en 2030. De plus, la Commission européenne a récemment proposé un objectif contraignant minimal de 10% de biocarburant dans les carburants routiers en 2020 (MEMO, 2007).

2 Définition

Ce dossier entend par «biocarburants non conventionnels » l'ensemble des biocarburants autres que le biodiesel et l'éthanol classiques, issus respectivement d'oléagineux et de plantes sucrières ou amylacées.
D'une manière générale, les biocarburants de première génération se différencient de ceux de seconde génération par la maîtrise tant technologique qu'économique (moyennant toutefois un léger soutien, soit fiscal, soit légal, via une obligation) de leur production à l'échelle industrielle. Les filières de production de biocarburant actuellement en place en Belgique sont les suivantes : huile végétale pure à partir d'oléagineux ; biodiesel à partir d'huiles végétales ou de graisses animales, usagées ou non ; éthanol à partir de plantes riches en sucre ou en amidon.

Les biocarburants de seconde génération sont issus de la valorisation de la biomasse solide lignocellulosique, à savoir le bois, la paille, les déchets, etc. Divers process de transformation sont étudiés et amènent à la production d'éthanol, d'huile pyrolytique, de BTL (Biomass to Liquid) et de méthanol pour les biocarburants liquides et de DME (DiMéthyl Ether) et d'hydrogène pour les biocarburants gazeux (Figure 2).

Ce document étudie l'ensemble des possibilités de production de biocarburants non conventionnels et leurs applications, en ce compris les nouveaux procédés de production de biocarburant type biodiesel et le biogaz-carburant.

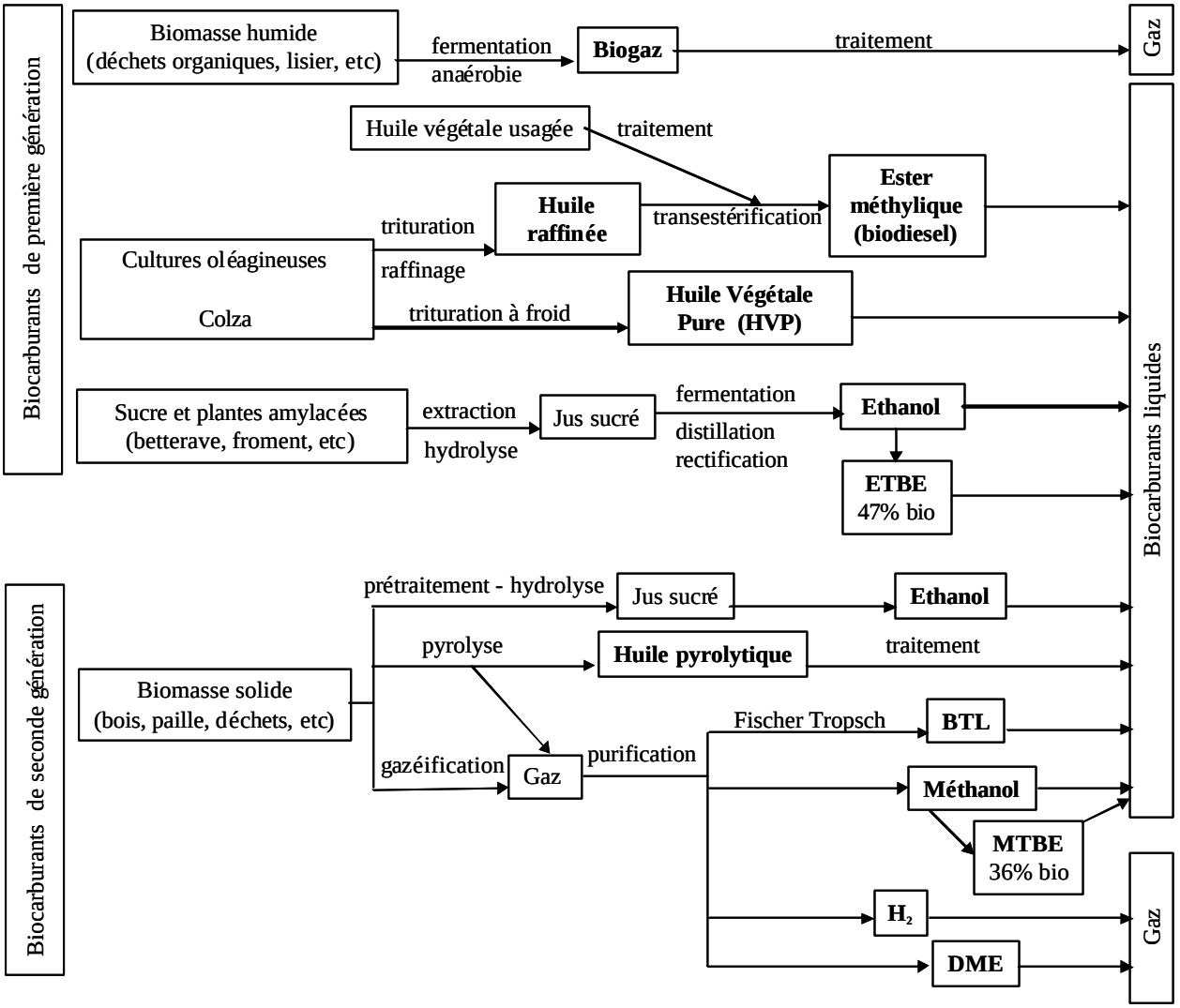

Figure 2. Principales filières de production des biocarburants de seconde génération

3 La lignocellulose

3.1 Sa composition…

Constituant principal de la paroi cellulaire des plantes, la biomasse cellulosique est composée de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**Figure 4) :

- La cellulose est une chaîne linéaire constituée de deux sucres à 6 atomes de carbone (C_6), le glucose et le pyranose. L'association des chaînes de cellulose constitue des microfibrilles rigides et insolubles.
- Les hémicelluloses sont constituées de différents types de sucres disposés en chaînes linéaires ou ramifiées. Ces sucres sont des pentoses (C_5, à savoir xylose et arabinose) et des hexoses (C_6, à savoir glucose, galactose et mannose).
- La lignine est issue de la condensation de l'alcool coumarylique, de l'alcool conifé rylique et de l'alcool sinapylique.

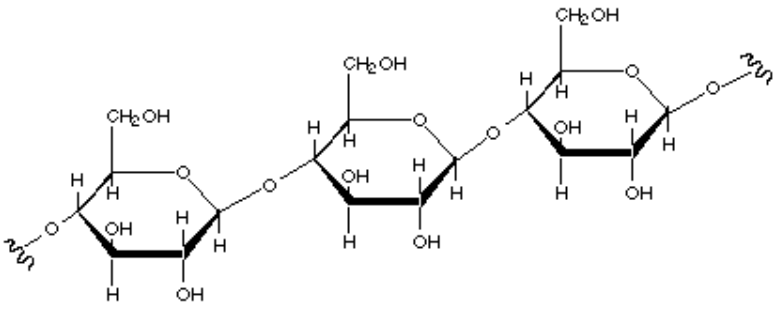

Figure 3. Structure de la cellulose

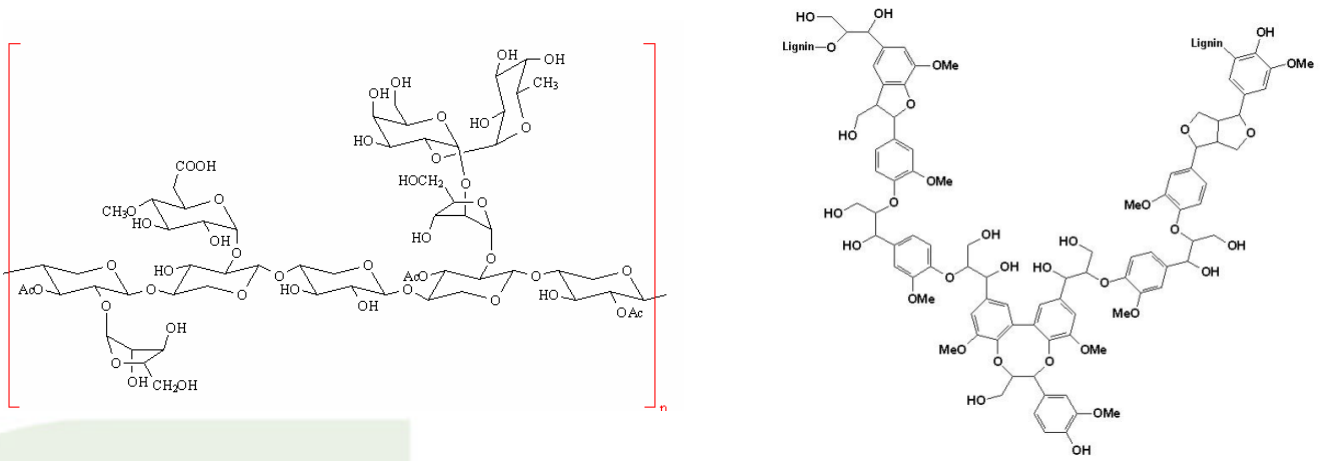

Figure 4. Structure des hémicelluloses (gauche) et de la lignine (droite)

Ces trois constituants interagissent pour former une matrice rigide dont la composition n'est pas uniforme (Figure 5). En effet, alors que la cellulose constitue 35 à 50% de la matière sèche lignocellulosique, la teneur et la composition en hémicelluloses sont très variables (Tableau 1).

Tableau 1. Composition de végétaux lignocellulosiques (% matière sèche ; d'après Ballerini et Alazard-Toux, 2006)

Matière première	Lignine	Cellulose	Hémicelluloses	Xylose	Arabinose	Mannose
Pin	27-29	38-42	20-24	4-7	0-1	7-12
Peuplier	20-24	40-49	16-27	13-18	0,5-2	2-8
Paille de blé	15-23	30-43	22-35	18-24	2-3	0-1
Rafle de maïs	12-17	35-41	20-27	15-22	0-3	0-1
Bagasse de canne à sucre	11-25	38-40	23-34	21-24	0-3	0-1

La composition de la matière lignocellulosique influence fortement le procédé de transformation biochimique : efficacité du prétraitement et de l'hydrolyse de la cellulose et des hémicelluloses, ou nature des sucres fermentescibles et des molécules inhibitrices de la fermentation.

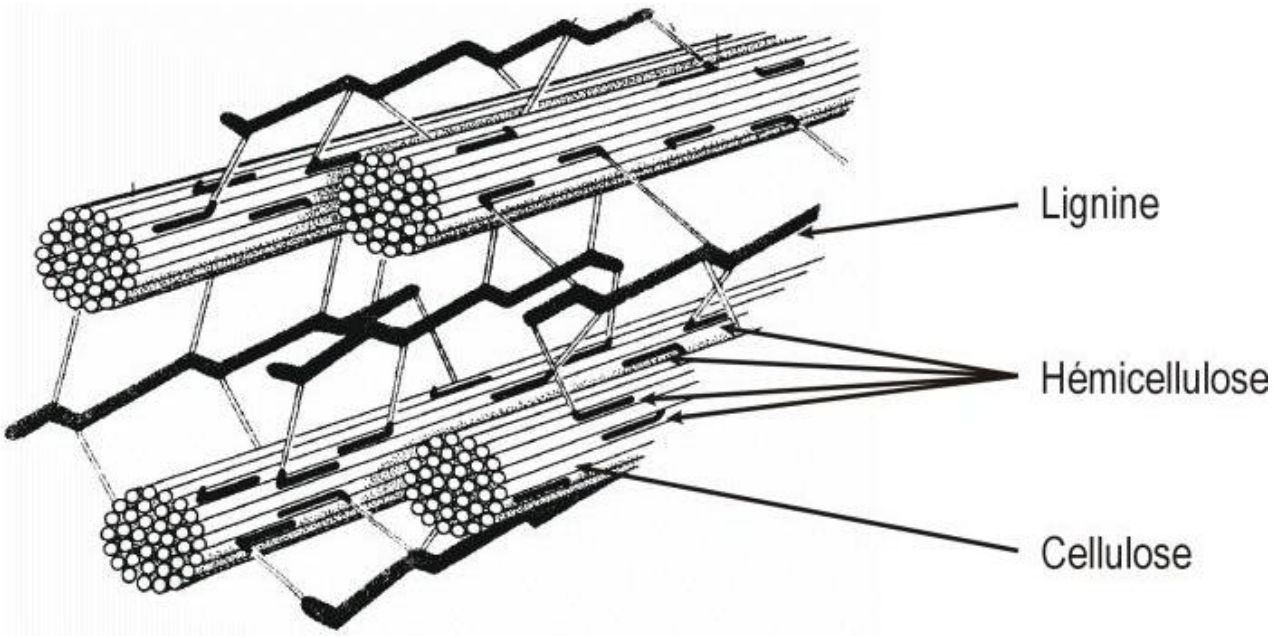

Figure 5. Structure de la lignocellulose (http://lasen.epfl.ch)

3.2 … et celle des carburants

Les carburants routiers sont des hydrocarbures issus du pétrole :

- Un hydrocarbure est un composé organique contenant exclusivement des atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H). Leur formule brute est donc de type C_nH_m, où n et m sont des entiers.
- La distillation et d'autres procédés typiques du raffinage du pétrole permettent l'obtention de carburants (essence et diesel).

La lignocellulose est constituée de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Sa décomposition produit des molécules qu'il est possible de remanier de manière à obtenir des mélanges de composés hydrocarbonés proches des carburants routiers fossiles.

4 Processus thermochimiques : pyrolyse, liquéfaction, gazéification[1]

4.1 La pyrolyse

4.1.1 Principe

La pyrolyse est un processus de destruction de la matière organique par la chaleur en l'absence d'oxygène.
Sous l'action de la chaleur, la biomasse peut être transformée en 3 états : charbon « végétal » -encore appelé charbon de bois- (solide), composés organiques condensables (huiles) et gaz permanents dont les principaux sont CO_2, CO, H_2 et CH_4. La production d'un de ces 3 produits peut être favorisée en adaptant les paramètres des réactions (Tableau 2). Les rendements massiques peuvent varier de 50 à 80% en fonction des produits obtenus. Les rendements énergétiques, quant à eux, peuvent varier de 60% pour le charbon végétal à 80% pour les huiles et les gaz de pyrolyse.

Tableau 2. Principaux produits de la pyrolyse de la biomasse obtenus à pression atmosphérique et selon les conditions de température et de vitesse de chauffe (Ballerini et Alazard-Toux, 2006).

Caractéristiques	Gaz	Huiles	Charbon végétal
Vitesse de chauffage	Elevée (>100°C/s)	Élevée (>100°C/s)	Faible (<50°C/s)
Température	Elevée (>800°C)	Faible (500°C)	Faible (500°C)
Type de réaction	Pyrogazéification	Pyrolyse rapide	Pyrolyse lente
Rendement massique	70 à 80%	50 à 80%	25 à 35%
Rendement énergétique	80%	75%	60%

Différents paramètres permettent d'orienter la pyrolyse essentiellement vers un des produits de la réaction. Ces paramètres sont : température de réaction, vitesse de chauffage, temps de séjour, pression et caractéristiques intrinsèques de la matière première (granulométrie et teneur en eau). La Figure 6 présente de manière globale les produits issus de la pyrolyse du bois en fonction des principaux paramètres de la réaction.

[1] Sauf indication contraire, les informations techniques regroupées dans ce chapitre proviennent de Ballerini et Alazard-Toux (2006).

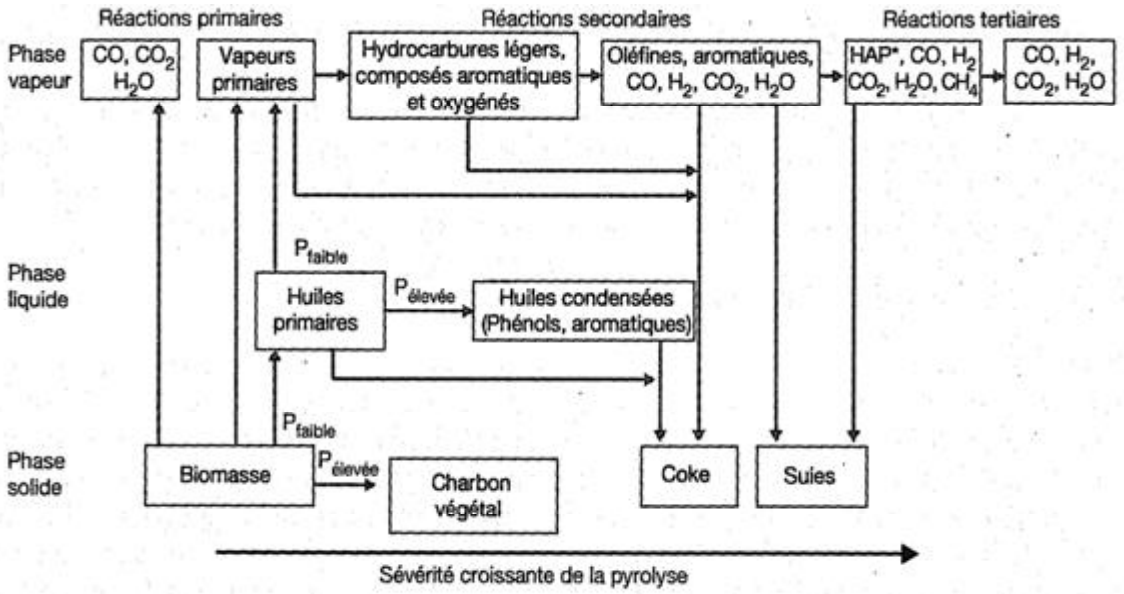

Figure 6. Pyrolyse du bois (Ballerini et Alazard-Toux, 2006)

L'augmentation de la température, la vitesse de chauffage et le temps de séjour des vapeurs primaires sont repris dans la notion « sévérité de la pyrolyse ». La Figure 6 montre que la pyrolyse de la biomasse engendre du charbon végétal et des vapeurs primaires qui se condensent en huiles. Ces mêmes vapeurs primaires peuvent générer, sous d'autres conditions, la production de coke et de suie, ainsi que d'autres huiles.

Un avantage considérable de la pyrolyse réside dans l'homogénéisation des matières premières lignocellulosiques. Ces dernières sont, à l'état « brut », hétérogènes et difficilement transportables ou utilisables. Par contre, le charbon de bois ou les huiles pyrolytiques sont des intermédiaires énergétiques homogènes et aisément transportables.

4.1.2 Utilisation des huiles de pyrolyse

Les huiles de pyrolyse peuvent être utilisées comme combustible dans les chaudières et les turbines à gaz, comme carburant dans les moteurs diesel, et comme intermédiaire de production de biocarburants. Le Tableau 3 présente les principales propriétés des huiles de pyrolyse.

Tableau 3. Comparaison des propriétés des huiles pyroyitiques et du fuel lourd (Zhang et al*., 2007)*

Propriété	Huiles pyrolytiques	Fuel lourd
Masse volumique (kg/m³)	1200	940
Teneur en eau (%)	15-30	0,1
Composition (%)		
C	54-58	85
H	5,5-7,0	11
O	35-40	1,0
N	0-0,2	0,1
S[1]	0	2,5
Cendres	0-0,2	0,1
PCS (MJ/kg)	16-19	40
Viscosité (cSt à 50°C)[2]	13	350
pH	2,5	-

[1] en % en masse (Ballerini et Alazard-Toux, 2006) ; [2] Ballerini et Alazard-Toux, 2006.

4.1.2.1 Moteur diesel

La qualité des combustibles utilisés pour la production d'électricité au moyen d'un moteur diesel est contraignante et les caractéristiques du combustible varient en fonction du moteur. Techniquement, les huiles pyrolytiques peuvent être utilisées mais il existe des problèmes liés à leur nature : corrosion de certaines pièces (pompes et injecteurs), cokéfaction dans les circuits d'alimentation, indice de cétane faible requérant l'ajout d'un additif, nécessité de préchauffer l'air pour améliorer l'auto-inflammation et enfin émission de polluants (particules, hydrocarbures totaux, CO et NO_x) supérieure aux résultats obtenus avec le diesel.

4.1.2.2 Filière biocarburants

Les huiles pyrolytiques constituent un combustible ou un intermédiaire aisément transportable et riche en énergie par rapport aux matières premières dont elles sont issues. Bon nombre de recherches ont été entreprises en vue d'optimiser le contrôle et la qualité des huiles de pyrolyse. Les progrès attendus n'ont toutefois pas été rencontrés. En effet, bien que plus homogènes que la matière première dont elles proviennent, ces huiles présentent une qualité variable, dépendante de la nature de la biomasse, problème qui n'a pas encore été résolu.

La production de biocarburants à partir des huiles de pyrolyse peut être réalisée de deux manières :

- Production d'un gaz de synthèse (composé majoritairement d'hydrogène et de CO), issu de la gazéification des huiles et/ou du charbon végétal, qui peut ensuite être transformé en méthanol ou en biocarburants semblables au diesel *via* une réaction de type Fischer-Tropsch (voir p17) ;
- Stabilisation des huiles par l'élimination complète ou partielle de l'oxygène qu'elles contiennent (hydrocraquage), permettant l'élaboration de carburants de qualité.

Ces huiles présentent toutefois certains désavantages : leur composition dépend des matières premières pyrolysées et peut de ce fait être très hétérogène ; elles présentent une acidité importante qui peut générer de la corrosion.

D'après Zhang *et al.* (2007), la pyrolyse rapide de la biomasse devrait être adaptée aux matières premières et à la finalité des huiles produites, de manière à compenser le caractère complexe et instable des huiles. Ces auteurs préconisent également l'adaptation du matériel utilisant les huiles de pyrolyse pour la production d'énergie, ainsi que des tests de stabilisation et d'addition de solvant.

La gazéification des huiles et/ou du charbon végétal semble être, selon Ballerini et Alazard-Toux (2006), l'option la plus intéressante à l'avenir pour cette filière de production de biocarburants. La gazéification requiert en effet de bons rendements de conversion et pas l'obtention d'huiles de qualité.

De nouveaux procédés de gazéification de la biomasse consistent donc en une pyrolyse à environ 550°C (entre 500 et 800°C) suivie de la gazéification des produits pyrolytiques (huiles, goudron et charbon végétal) (Müller et Bockhorn, 2007).

4.2 La liquéfaction directe

La liquéfaction directe est un processus de transformation de la biomasse dont le produit est un liquide organique à teneur en O_2 réduite et à ratio H/C proche de celui des hydrocarbures fossiles. La biomasse réduite en particules est mise en solution dans un solvant aqueux ou organique, dans des conditions variables de température, pression, etc.

Ce processus de transformation permettrait la production directe de carburants liquides à partir de biomasse. Diverses recherches ont été menées mais cette voie semble être à l'heure actuelle abandonnée.

4.3 La gazéification

La gazéification consiste en la transformation thermique et chimique d'un combustible solide en un mélange gazeux, appelé « syngas », en présence d'un gaz (O_2, vapeur d'eau, H_2, air, etc). La proportion des composants du syngas varie en fonction du procédé de conversion utilisé, ce dernier dépendant de la matière première à valoriser et du type d'utilisation du gaz de synthèse (syngas).

Tableau 4 présente la composition du syngas produit lors de la gazéification de la biomasse.

Tableau 4. Composition du syngas issu de la gazéification de la biomasse (Demirbas, 2007)

Gaz	Teneur ($\%_{vol}$)
CO	28-36
H_2	22-32
CO_2	21-30
CH_4	8-11
C_2H_4	2-4

Le syngas peut être utilisé pour produire :

- de l'énergie motrice ;
- de l'électricité et de la chaleur (cogénération) ;
- des biocarburants.

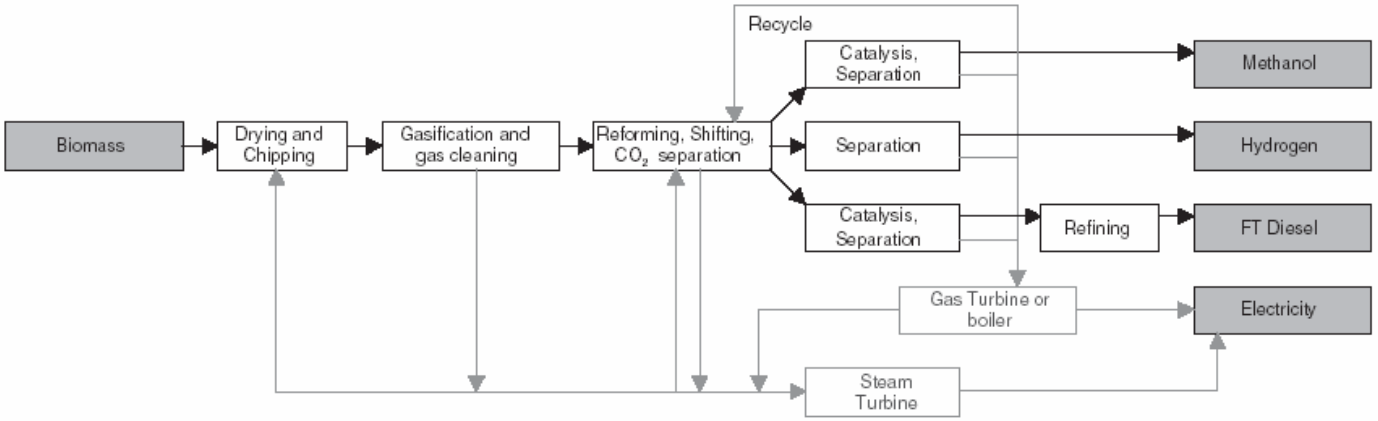

Figure 7. Procédé de production de méthanol, d'hydrogène, de BTL (FT Diesel) via un procédé de gazéification de la biomasse (Hamelinck et Faaij, 2006)

Les principaux obstacles techniques de la gazéification de la biomasse résident au niveau :

- de la matière première et l'alimentation en combustible. La matière première peut varier énormément, ce qui pose des problèmes d'alimentation et requiert divers prétraitements ;
- du réacteur de gazéification, qui doit de préférence pouvoir accepter différents combustibles et peut être agrandi aisément ;
- de la purification des gaz, étape critique et qui se doit d'être efficace (Knoef, 2005).

L'industrialisation des procédés de gazéification de la biomasse pour la production de carburants requiert encore beaucoup de R&D, au niveau de la recherche de base, de la technologie, de l'intégration du procédé et des évaluations technico-économiques et environnementales.

4.3.1 Carburants produits à partir du syngas

4.3.1.1 Méthanol

Utilisé comme carburant automobile depuis les années 1920, le méthanol a également servi l'aviation vers 1940. Il a été mélangé à l'essence, entre autres sous la forme de MTBE qui permet, tout comme l'ETBE, d'éviter certains inconvénients liés à l'usage de méthanol pur dans l'essence. Les mélanges à base de MTBE sont toutefois sérieusement remis en cause suite à de graves problèmes environnementaux (persistance de la pollution de nappes phréatiques due à une faible biodégradation, produit « probablement cancérigène »).

Le méthanol est produit exothermiquement à partir du syngas comme suit :

$$CO + H_2 \Leftrightarrow CH_3OH$$

La pureté du syngas est essentielle pour le bon fonctionnement des catalyseurs de la réaction.

Le

Tableau 5 présente les principales caractéristiques du méthanol et du MTBE en tant que carburant et permet de les comparer avec l'éthanol et l'ETBE. Ces propriétés étant relativement similaires, le potentiel de ces biocarburants peut être lu dans le rapport sur le Bioéthanol publié par ValBiom (Schoeling, 2006).

Tableau 5. Caractéristiques physico-chimiques du méthanol, de l'éthanol et de leur dérivé (Ballerini et Alazard-Toux, 2006)

Caractéristique	Méthanol	Ethanol	MTBE	ETBE
Masse volumique à 15,5°C (kg/m³)	796	794	746	750
Température d'ébullition (°C)	64,7	78,3	55,3	72,8
Chaleur de vaporisation (kJ/kg)	1 100	854	337	321
Rapport stoechiométrique	6,4	8,95	11,7	12,1
PCI massique (kJ/kg)	19 937	26 805	35 200	35 880
PCI volumique (kJ/l)	15 870	21 285	26 260	26 910
RON	126	120	118	117
MON	96	99	101	101

Selon Güllü et Demirbas (2001), le méthanol peut également être produit à partir de déchets pyrolysés. Les rendements peuvent atteindre 378 l de méthanol par tonne de matière première.

4.3.1.2 Diméthyl éther

Le diméthyl éther (DME) est actuellement utilisé comme solvant ou propulseur pour certains aérosols mais constitue également un carburant du type LPG pour les moteurs diesel. Le DME est en effet gazeux à température et pression ambiantes. Il n'est ni toxique, ni cancérigène.
Liquéfié à température ambiante sous une pression de 5 bar, le DME est transporté et stocké sous forme liquide. Il présente l'inconvénient de solubiliser des élastomères, entre autres ceux utilisés dans les circuits d'alimentation des moteurs diesel, mais son utilisation n'engendre pas de corrosion.
Le DME est classiquement produit en deux étapes comprenant la synthèse du méthanol (1) et sa déshydratation (2), une réaction de gaz à l'eau (*water gas shift*) ayant lieu en parallèle (3) :

$$CO + H_2 \Leftrightarrow CH_3OH \quad (1)$$
$$2CH_3OH \Leftrightarrow CH_3OCH_3 + H_2O \quad (2)$$
$$CO + H_2O \Leftrightarrow CO_2 + H_2 \quad (3)$$

La réaction globale peut donc se résumer (Semelsberger *et al.*) :

$$3H_2 + 3CO \Leftrightarrow CH_3OCH_3 + CO_2$$

Tableau 6. Principales caractéristiques du DME carburant (Ballerini et Alazard-Toux, 2006)

Propriétés	DME	Diesel	GNL
Formule	CH_3OCH_3		CH_4
T ébullition (°C)	-25	150-380	-162
Densité à 20°C (kg/m³)	660	800-840	420
PCI (MJ/kg)	28,4	42,5	49,4
Indice de cétane	55-60	40-55	
T autoinflammation (°C)[a]	350	206	738

[a] avec de l'air à 0,1 MPa

Le DME n'est constitué d'aucune liaison carbone-carbone, ce qui réduit les risques de formation de particules carbonées durant la combustion. Son utilisation dans les bombes aérosols a stimulé l'étude de l'impact environnemental et le risque de toxicité qu'il représente : il s'avère qu'ils sont très limités.

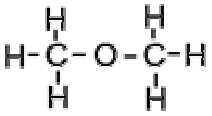

Figure 8. Structure du DME (http://itl.chem.ufl.edu/2045_s00/lectures/9be_1.gif)

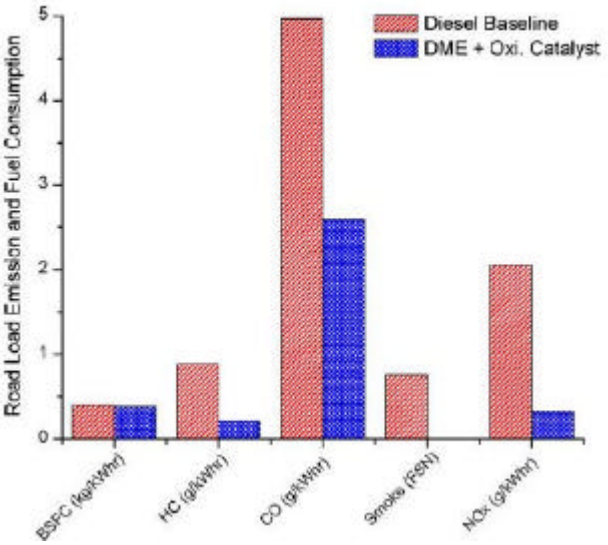

Figure 9. Comparaison de la consommation et des émissions engendrées par l'utilisation de DME ou de diesel lors de test sur route (Semelsberger *et al.*, 2006)

Le DME est considéré comme un substitut du diesel et présente divers avantages en termes de réduction d'émissions de polluants (NOx, hydrocarbures, CO) lors de sa combustion (Figure 9). Aucune poussière n'est par ailleurs produite et d'une manière générale, des tests menés sur des moteurs diesel à injection directe ont montré que l'utilisation de DME contribue à la propreté de l'air et à la réduction de bruit par rapport au diesel classique.
Vu les propriétés physico-chimiques du DME, son utilisation dans les moteurs diesel requiert l'adaptation du circuit carburant et du réservoir. De plus, des additifs de lubrification sont nécessaires pour améliorer la viscosité de ce carburant (Semelsberger *et al.*, 2006).
Le niveau de sécurité pour le transport, le stockage et la vente de DME est du même ordre que celui du diesel ou du LPG.

4.3.1.3 Biomass to Liquid

Synthèse de Fischer-Tropsch

Cette synthèse est applicable au gaz de synthèse issu du charbon, produisant du CTL (Coal to Liquid), du gaz, produisant du GTL (Gas to Liquid) ou encore de biomasse, produisant du BTL (Biomass to Liquid).

La synthèse de Fischer-Tropsch (FT) permet la production d'un carburant du type diesel ou kérosène constitué d'un mélange d'hydrocarbures de différentes longueurs de chaîne carbonée à partir de syngas.
Les réactions opérant dans l'unité Fischer-Tropsch entre l'H_2 et le CO du syngas sont les suivantes :

$$CO + H_2 \Leftrightarrow -CH_2- + H_2O \quad (1)$$

$$n(2H_2 + CO) \Leftrightarrow C_nH_{2n} + nH_2O \text{ (réaction catalysée par le fer)} \quad (2)$$

$$(2n + 1)H_2 + nCO \Leftrightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O \text{ (réaction catalysée par le cobalt)} \quad (2)$$

Les molécules de monoxyde de carbone réagissent exothermiquement avec l'hydrogène pour former des radicaux alkyles (-CH_2-) (1). La réaction exothermique de *water gas shift* est ensuite engendrée entre l'eau produite et d'autres molécules de CO et permet la conversion du CO en H_2 :

$$CO + H_2O \Leftrightarrow CO_2 + H_2$$

La réaction globale de la synthèse de Fischer-Tropsch et les hydrocarbures produits varient suivant le catalyseur utilisé (2).

La réaction peut être orientée pour favoriser la production de molécules allant de C5 à C20 (Figure 10. Processus de gazéification de la biomasse solide suivi du procédé Fischer-Tropsch, différents hydrocarbures produits et rendements massiques de ceux-ci (Demirbas, 2007 ; Jansen, 2004 ; Boudet, 2005 ; O'Carroll *et al.*, 2005). De plus, les molécules contenant plus de 20 atomes de C sont des cires, solides à température ambiante qu'il est possible de « craquer ». Une unité d'hydrocraquage ajoutée au système permet la production maximale de carburant de type diesel.

Le bon déroulement du process est très dépendant de la qualité du syngas. La purification du gaz est en effet une étape critique pour éviter l'empoisonnement des catalyseurs du procédé FT. Il est donc impératif d'enlever goudrons, sulfures, alcalins et autres cendres (Demirbas, 2007).

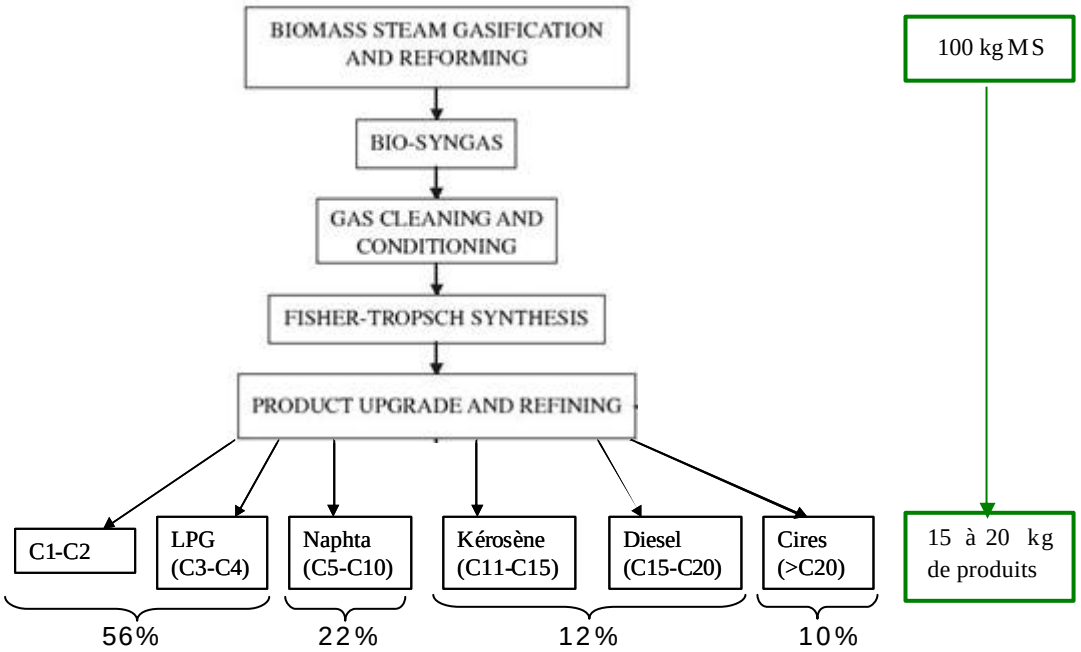

Figure 10. Processus de gazéification de la biomasse solide suivi du procédé Fischer-Tropsch, différents hydrocarbures produits[2] et rendements massiques de ceux-ci (Demirbas, 2007 ; Jansen, 2004 ; Boudet, 2005 ; O'Carroll *et al.*, 2005)

[2] Les noms des hydrocarbures repris dans ce schéma sont les termes usuels de l'industrie du pétrole. Le « Diesel (C_{15}-C_{20}) » issu de la biomasse est nommé « Biomass to Liquid » (BTL). D'une manière générale, les chaînes hydrocarbonées produites par l'unité FT sont du même type, qu'elles soient d'origine fossile ou renouvelable.

Caractéristiques du BTL

Les caractéristiques du BTL-diesel et du BTL-kérosène sont comparées aux caractéristiques du diesel et du GTL-diesel dans le

Tableau 7 : on peut y noter la faible teneur en soufre et HAP, ainsi que l'indice de cétane relativement élevé, notamment pour le BTL-diesel. Le projet RENEW teste ces carburants sur des moteurs actuels en vue de répondre à la norme EURO V.

Tableau 7. Caractéristiques des carburants testés dans le cadre du projet RENEW (Muth et Lenz, 2006)

Propriété	Diesel (EN 590)	BTL-kérosène	BTL-diesel	GTL-diesel
Densité à 15°C (g/ml)	0,82-0,85	0,76	0,77	0,783
PCI (MJ/l)	35-36	33	34	34
Indice de cétane	> 52	79	94	73
Viscosité à 40°C (cSt)	2-4,5	1,5	1,3	2,5
Pouvoir lubrifiant à 60°C (µm)	< 460	536	484	608
HAP (g/g, %)	< 11	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Soufre (mg/kg)	< 10	< 10	< 10	< 10
n-Paraffines (g/g, %)	-	89	94,5	50

Les résultats des essais menés chez Volkswagen montrent des réductions d'émission de particules et de NOx (Muth et Lenz, 2006). La moindre émission de particules est probablement liée à l'indice de cétane élevé de ces carburants qui génère une meilleure carburation. En effet, par rapport au diesel, le rejet de CO est réduit de plus de 50%, l'émission d'HC est diminuée de 50% et celle des particules est réduite de 20 à 50% (suivant la technologie du moteur, Figure 11 Figure 12). Quant aux oxydes d'azote, ils semblent être rejetés en même quantité, voire un peu plus.

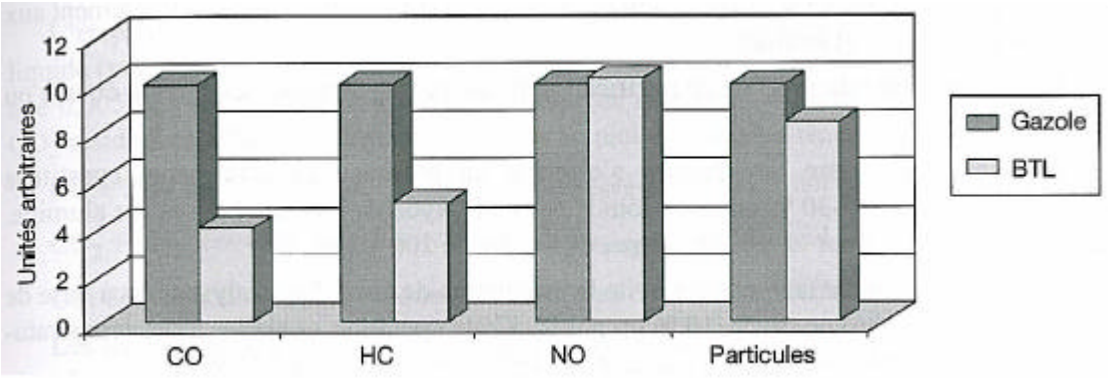

Figure 11. Emissions d'un véhicule équipé d'un système d'injection Common Rail (Ballerini et Alazard-Toux, 2006)

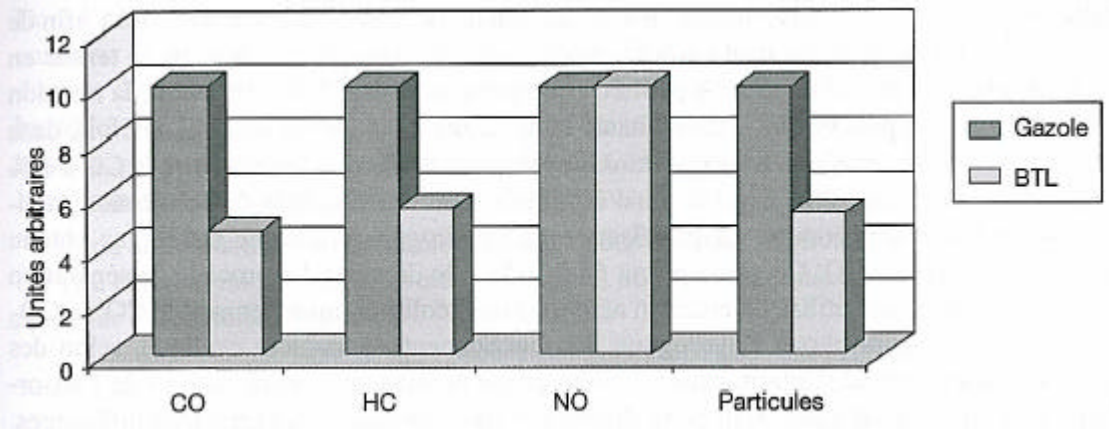

Figure 12. Emissions d'un véhicule équipé d'injecteurs pompe (Ballerini et Alazard-Toux, 2006)

4.3.1.4 Rendement de ces procédés

Il est peu évident de trouver une information rigoureuse et bien étayée scientifiquement sur les rendements des différents procédés de transformation thermochimique de la biomasse lignocellulosique.

Le Tableau 8 résume toutefois quelques données.

Tableau 8. Rendements actuel et futur de production de quelques biocarburants (d'après Hamelinck, Faaij, 2006)

Biocarburant		Rendement énergétique* (%)
Méthanol	Actuel	58,9
	Futur	57,0
Ethanol	Actuel	34,9
	Futur	47,3
Hydrogène	Actuel	34,8
	Futur	41,3
BTL	Actuel	42,1
	Futur	42,1
DME	Actuel	58

* η_{PCS} : rendement exprimé en fonction du pouvoir calorifique supérieur

Boissonnet *et al.* (2005) ont comparé l'efficacité énergétique de deux procédés de gazéification (lit fluidisé et flux entraîné), couplés à une unité FT pour la production de BTL-kérosène et de BTL-diesel.

Le process à lit fluidisé comprenait 4 variantes : sans passage à haute température (1300°C – A) ; avec passage à haute température pour convertir les hydrocarbures en CO et H_2, sans recyclage (B1), avec recyclage des gaz de tête (C_1-C_4) (B2), avec recyclage des gaz de tête et des naphtas (B3).

Le process à flux entraîné était d'une part autotherme, sans (C1) ou avec (C2) recyclage des gaz de tête et des naphtas, d'autre part allotherme, sans (D1) ou avec (D2) recyclage des gaz de tête et des naphtas (Tableau 9).

Tableau 9. Résultats de la simulation de gazéification combinée à une unité FT (Boissonnet et al.*, 2005)*

	Rendement massique C10+ (%)[1]	Rendement énergétique C10+ (%)[2]
A	7-11	20-26
B1	11-14	19-25
B2	15-19	20-26
B3	24-28	28-34
C1	11-13	28-34
C2	16-20	39-45
D1	16-20	16-22
D2	34-38	23-29

[1] le rendement massique est défini par les auteurs comme le débit des produits (kérosène et diesel) rapporté au débit de biomasse sèche ; [2] le rendement énergétique est quant à lui défini par les énergies produites (carburants et électricité) rapportées aux énergies extérieures consommées (biomasse, électricité et chaleur).

Cette étude montre l'intérêt du recyclage des gaz de tête et des naphtas (augmentation des rendements énergétique et massique). La nécessité du choix entre optimisation du rendement énergétique (C2) et optimisation du rendement massique (D2) est également soulignée.

5 Processus biochimiques de transformation de la biomasse[3]

5.1 Introduction

Le traitement biochimique de la biomasse ligno-cellulosique produisant de l'éthanol (fermentation éthanolique) est le processus le plus connu pour la production de biocarburant de seconde génération.
Deux autres procédés existent et sont bien avancés dans leur développement industriel : il s'agit des fermentations méthanique et acétonobutylique. La fermentation méthanique produit du biogaz qui, une fois purifié, est utilisé comme carburant dans des véhicules adaptés au gaz naturel, tel que pratiqué en Suède et aux Etats-Unis notamment. La fermentation acétonobutylique produit du butanol, qui pourrait être utilisé comme biocarburant, et de l'acétone.

5.2 Ethanol lignocellulosique

5.2.1 Le processus de transformation

La transformation de la lignocellulose en éthanol doit tenir compte des propriétés de la matière première :

- La fermentation de la lignine en éthanol est impossible ;
- Un prétraitement de la matrice lignocellulosique est indispensable pour rendre la cellulose et les hémicelluloses hydrolysables ;
- La cellulose et les hémicelluloses sont des sources potentielles de sucres fermentescibles.

D'une manière générale, tout processus de transformation de biomasse lignocellulosique comprend les étapes suivantes : prétraitement de la matière première, hydrolyse, fermentation éthanolique et séparation de l'éthanol du moût de fermentation (Figure 13).

Figure 13. Schéma générique de production d'éthanol ex-biomasse lignocellulosique

La fermentation des sucres en C_6 et la récupération de l'éthanol sont des étapes bien contrôlées industriellement car identiques à celles utilisées pour la production d'éthanol à partir de plantes sucrières et amylacées. Les étapes de prétraitement et d'hydrolyse font l'objet d'études de R&D approfondies, adaptées à la matière première à valoriser.

Le prétraitement a pour but de rendre la cellulose accessible à l'hydrolyse. Il peut être physique, physico-chimique ou chimique (Tableau 10). Eviter la perte ou la dégradation des sucres, et limiter la formation de produits inhibiteurs et les rejets sont les principales contraintes du prétraitement.

[3] Sauf indication contraire, les informations techniques regroupées dans ce chapitre proviennent de Ballerini et Alazard-Toux (2006).

Tableau 10. Principaux procédés de prétraitement de la BLC (Ballerini et Alazard-Toux, 2006)

Procédés physiques	Prétraitement mécanique Thermolyse
Procédés physico-chimiques	Thermohydrolyse Explosion à la vapeur Explosion à la vapeur en conditions acides AFEX[1] Explosion au CO_2
Procédés chimiques	Prétraitement à l'acide dilué Prétraitement alcalin Procédé Organosolv[2] Oxydation chimique Oxydation biologique

[1] *Ammonia Fiber EXplosion*, ou explosion en présence d'ammoniac
[2] Utilisation d'un solvant organique (éthanol ou méthanol)

L'hydrolyse, quant à elle, peut être chimique ou enzymatique (l'hydrolyse biochimique est aussi appelée saccharification) et a pour objectif la dégradation de la cellulose en sucres fermentescibles (glucose).

Le glucose issu de l'hydrolyse de la cellulose est fermenté de la même manière que le glucose issu de l'amidon. Cette fermentation est réalisée en routine par la levure *Saccharomyces cerevisiae* (levure de boulangerie).
Les pentoses, issus principalement des hémicelluloses et présents en quantité non négligeable, peuvent être fermentés en éthanol mais par d'autres microorganismes. Le challenge réside dans la mise au point de souches de microorganismes modifiées tolérantes à l'éthanol, aptes à fermenter des hexoses et des pentoses avec un bon rendement et résistantes à certaines molécules inhibitrices issues de l'hydrolyse.

Suivant l'association ou la distinction de certaines étapes, 3 types de procédé de transformation biochimique de la biomasse en éthanol peuvent être schématisés (

Figure 14) :

A. Hydrolyse et fermentation séparées ;
B. Hydrolyse et fermentation simultanées avec souches modifiées convertissant les pentoses en éthanol [4] ;
C. Fermentation séparée des pentoses et du glucose.

[4] Notez que la saccharification est un processus biochimique consistant à transformer l'amidon ou la cellulose en sucres plus simples, tels que le glucose et le fructose. Ce processus est réalisé par des levures ou des champignons microscopiques.

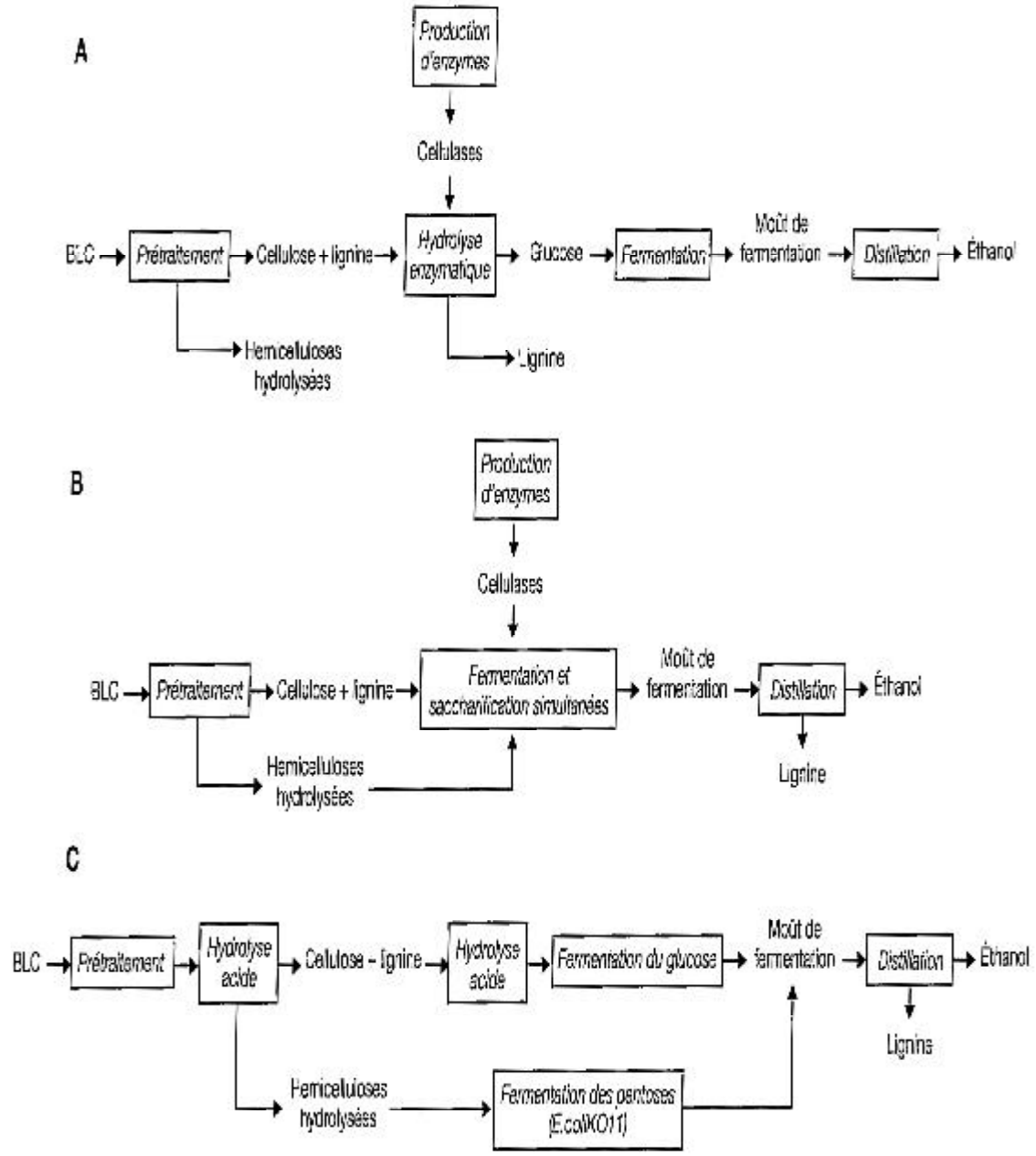

Figure 14. Schémas de procédés de production d'éthanol ex-BLC (Ballerini et Alazard-Toux, 2006)

5.3 Biogaz

5.3.1 Production

Le biogaz est le produit de la méthanisation de matières organiques animales ou végétales riches en sucres par des bactéries méthanogènes anaérobies (absence d'oxygène) (Figure 15). Les boues de station d'épuration, les effluents d'élevage et des industries agro-alimentaires, et les déchets ménagers constituent les principaux substrats.

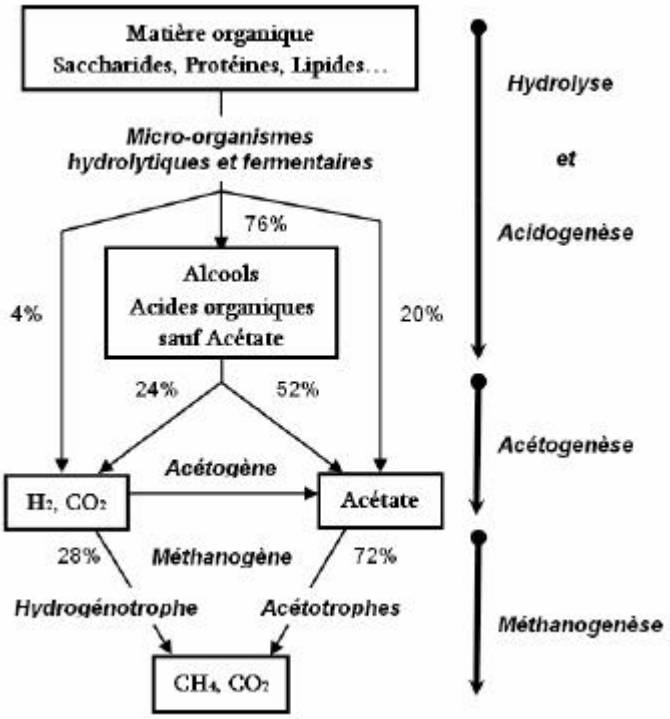

Figure 15. Méthanisation (http://fr.wikipedia.org)

Plusieurs cultures de bactéries entrent en action en vue de réaliser les diverses étapes de la fermentation méthanique. Celle-ci s'achève par la production de méthane (CH_4) par les bactéries méthanogènes suivant les réactions suivantes :

$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2$

$CO_2 + 4\ H_2 \longrightarrow CH_4 + 2\ H_2O$

Des gaz ainsi qu'un résidu solide non dégradé sont les principaux produits de la méthanisation. Le Tableau 11 présente la composition moyenne du biogaz produit.

Tableau 11. Composition moyenne du biogaz (Ballerini et Alazard-Toux, 2006)

Gaz	%volume
CH_4	55-75
CO_2	25-45
H_2S	0-1,5
NH_3	0,05

Un réacteur à forte capacité fonctionnant en continu accepte de 1,5 à 2 kg de matières premières (à 100% de MS) par m³ et par jour. Le volume de biogaz produit varie alors de 0,5 à 1 m³ par kg de matière sèche de déchets traités.

Le pouvoir calorifique du biogaz est fonction de sa teneur en méthane et varie de 20 à 30 MJ/nm³.

Pour être utilisé comme biocarburant ou injecté dans le réseau de gaz naturel, le méthane doit être purifié des contaminants (pour les gaz de décharge), poussières et autres particules doivent être éliminés, asséché, et concentré à plus de 95%.

Enfin, pour être utilisé comme carburant, le méthane doit être comprimé entre 200 et 250 bars.

5.3.2 Caractéristiques du biométhane-carburant

En 1999, la Suède a développé un standard national pour l'utilisation du biogaz comme carburant routier. Les principaux paramètres de ce standard sont repris dans le

Tableau 12.

Tableau 12. Principaux paramètres du standard suédois du biogaz -carburant (Persson, Wellinger, 2006)

Paramètre	Standard
Index Wobbes inférieur (MJ/nm³) [1]	43,9 - 47,3 [2]
MON	> 130 [3]
Point de rosée (°C) [4]	< t [5] – 5
$CO_2 + O_2 + N_2$ ($\%_{vol}$)	< 5
O_2 ($\%_{vol}$)	< 1
Soufre total (mg/nm³)	< 23
NH_3 (mg/nm³)	20

[1] L'index de Wobbes est défini comme le rapport entre le pouvoir calorifique et la densité relative (= densité gaz/densité air) ; [2] correspond à 95 – 99 % de méthane ; [3] suivant la norme ISO 15403 ; [4] le point de rosée d'un gaz est la température à laquelle ce gaz devient saturé en vapeur d'eau, à condition barométriques inchangées, ou la température à laquelle la pression de vapeur est égale à la pression de vapeur saturante ; [5] t = température ambiante

Tous types de véhicules, conçus pour rouler au gaz naturel ou adaptés pour rouler au gaz et à l'essence, peuvent utiliser du biométhane. Les véhicules lourds sont quant à eux généralement équipés du système d'injection diesel original, et d'un système d'ignition du gaz par injection d'une petite quantité de diesel.

Suivant le mode de production de l'électricité utilisée pour la purification et la compression du méthane, l'utilisation de ce gaz comme carburant routier peut réduire les émissions de CO_2 de 95 à 99% par rapport aux carburants fossiles. Les émissions de particules et suies, de NOx et d'hydrates de carbone autres que le méthane sont également fortement réduites (Persson, Wellinger, 2006).

5.4 Butanol

5.4.1 Production du biobutanol

Historiquement, le butanol est produit par la bactérie anaérobie stricte *Clostridium acetobutylicum*, suite à la fermentation acétonobutylique de sucres. Cette fermentation génère d'autres produits : acides acétique, lactique et propionique, acétone, isopropanol, éthanol, et du dihydrogène. Les principaux produits recherchés étant l'acétone, le butanol et l'éthanol, le processus de fermentation favorisant ceux-ci a été baptisé « ABE » (process Acétone Butanol Ethanol). Ce process a été découvert en 1916 et exploité jusqu'à l'essor de la pétrochimie, qui a ensuite pris le relais de la production à un moindre coût.

L'augmentation du coût du pétrole et des produits dérivés a relancé l'intérêt pour la production de biobutanol. Les bactéries solvantogènes du genre *Clostridium* sont capables de valoriser un grand nombre de sucres différents tels que le glucose, galactose, cellobiose (produit de la dégradation de la cellulose, composé de 2 unités glucose), mannose, xylose et arabinose). Les substrats alimentant les fermenteurs ne se limitent plus au glucose, à l'amidon pur, au maïs ou à la molasse : l'impact de leur coût sur le prix du butanol est en effet trop important.

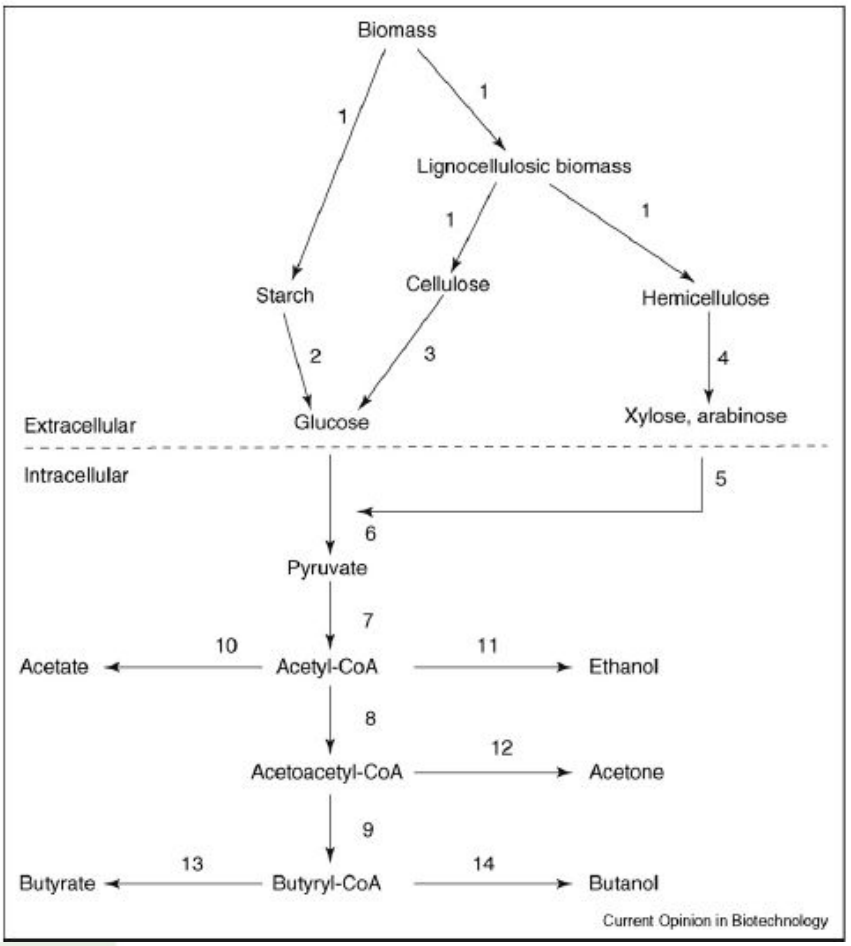

Figure 16. Schéma simplifié du métabolisme de la biomasse par les clostridies solvantogènes (Ezeji, Qureshi, Blaschnek, 2007)

Dès lors, des ressources plus fibreuses telles que la rafle et les fibres de maïs et les DDGS (distillers dried grains and solubles) fibreux servent pour la sélection et le développement de souches solventogènes. Les résidus agricoles fibreux nécessitent toutefois un prétraitement du type AFEX (voir Tableau 10) (Ezeji, Qureshi, Blaschnek, 2007).
La Figure 16 présente les différents substrats et produits issus de la fermentation acétonobutylique par *Clostridium*.

D'une manière plus générale, les réactions suivantes résument bien le processus de fermentation acétonobutylique :

$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow CH_3\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}CH_2OH + 2\ CO_2 + H_2O$
Glucose — *n*-Butanol

$C_6H_{12}O_6 + H_2O \longrightarrow CH_3\text{-}CO\text{-}CH_3 + 3\ CO_2 + 4\ H_2$
Acétone

$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2\ CH_3\text{-}CH_2OH + 2\ CO_2$
Ethanol

Toutefois, le butanol est toxique pour ces microorganismes, limitant la concentration en ce produit dans le moût de fermentation et conduisant à un rendement en butanol réduit. Diverses stratégies ont été développées pour aboutir à la mise au point de souches hautement productrices de butanol et à un système de fermentation ABE intégré permettant la production et le prélèvement simultané de butanol du moût de fermentation (Ezeji, Qureshi, Blaschnek, 2007).
La souche mutante *C. beijerinckii* BA101, très stable et dont les caractères fortement amylolytique et fortement butanologène, et la souche *C. acetobutylicum* 824 sont couramment étudiées.

Tableau 13. Comparaison de systèmes de production ABE récents utilisant du glucose comme substrat (Ezeji, Qureshi, Blaschnek, 2007)

Process de fermentation	Culture	Rendement	Productivité en ABE (g/(l.h)
Témoin	*C. beijerinckii* BA101	0,38 – 0,40	0,35
Récupération des produits par « gas stripping » [1]	*C. beijerinckii* BA101	0,40 – 0,47	0,61 – 1,16
Récupération des produits par pervaporation [2]	*C acetobutylicum* 824	0,31 – 0,35	0,13 – 0,26

[1] La technique « gas stripping » consiste en la récupération des produits par enlèvement de ceux-ci par des molécules gazeuses (dans ce cas-ci, le CO_2 et l'H_2) s'échappant du moût de fermentation et récupérées ensuite dans un condenseur.
[2] La pervaporation est une technique de récupération sélective de composés volatiles recourant à une membrane (placée en contact avec le moût de fermentation).

La production de molécules inhibitrices présentes dans l'hydrolysat lignocellulosique est un autre obstacle à la production de biobutanol à partir de résidus agricoles.
Le développement de stratégies visant à outrepasser les obstacles inhérents à la production de biobutanol devrait permettre l'installation d'une industrie du biobutanol compétitive par rapport à son homologue pétrochimique. Il serait par ailleurs intéressant de valoriser les gaz produits (CO_2 et H_2) pour d'autres applications bioénergétiques (Ezeji, Qureshi, Blaschnek, 2007).

5.4.2 Caractéristiques du butanol-carburant

Selon Ballerini et Alazard-Toux (2006), le mélange ABE présente un indice d'octane élevé, et une bonne stabilité en mélange à l'essence (pas de démixtion en présence de traces d'eau comme avec l'éthanol). Des tests doivent toutefois être menés sur les matériaux, la présence d'acétone pouvant générer des problèmes de tenue de ces derniers. Le pouvoir calorifique du mélange ABE est de 31,9 MJ/kg, légèrement supérieur à celui de l'éthanol (26,8 MJ/kg).

Le butanol en mélange à l'essence conserve également une bonne stabilité en présence d'eau. Le butanol serait également moins corrosif que l'éthanol.

Tableau 14. Comparaison des caractéristiques du butanol-carburant, de l'essence et de l'éthanol-carburant (http://en.wikipedia.org)

Carburant	Pouvoir calorifique (MJ/l)	Ratio Air/Carburant	Chaleur de vaporisation (MJ/kg)	RON[1]	MON[2]
Essence	32,0	14,6	0,36	91-99	81-89
Butanol	29,2	11,2	0,43	96	78
Ethanol	19,6	9,0	0,92	129	102

Le Tableau 14 présente les caractéristiques du butanol : son pouvoir calorifique est légèrement inférieur à celui de l'essence mais nettement plus intéressant que celui de l'éthanol. Par conséquent, la consommation en butanol augmentera légèrement par rapport à l'essence pour une même distance parcourue, alors que la consommation en éthanol sera beaucoup plus élevée. Précisons toutefois que des études ont montré que la consommation en alcool-carburant n'est pas directement proportionnelle à la variation du pouvoir calorifique.

L'indice d'octane du butanol est moins bon que celui de l'essence et de l'éthanol, ce qui engendrera une augmentation du cliquetis du moteur, ainsi qu'une moins bonne optimisation du moteur en termes de taux de compression, d'avance à l'allumage et d'amélioration du rendement du moteur.

Le ratio air/carburant caractérise le degré d'oxydation du carburant et donne une indication sur la « richesse » du mélange qui optimisera le fonctionnement du moteur. Le butanol présente un ratio air/carburant supérieur à l'éthanol, suggérant la possibilité de recourir à des mélanges butanol/essence supérieurs aux mélanges éthanol/essence.
La chaleur latente de vaporisation du butanol indique que de moindres adaptations sont nécessaires pour vaporiser le carburant par temps froid, contrairement à l'éthanol (http://en.wikipedia.org).

6 Autres procédés de production de biocarburants

6.1 BTL de matières grasses

La société Neste Oil a développé un biocarburant de type BTL à partir d'huiles végétales, de fritures et de graisses animales, le NExBTL (Next Generation Biomass to Liquid). Ce biocarburant est un mélange de n- et iso-paraffines, dont les propriétés sont comparables aux meilleurs carburants diesel (BTL et GTL, e.a.).

6.1.1 Production du NExBTL

Le procédé de production du NExBTL consiste en un hydrotraitement catalytique de matières grasses (huiles végétales et graisses animales). Ce processus de transformation a lieu au sein d'une raffinerie pétrolière qui fournit, entre autres, l'hydrogène nécessaire au process.
Les matières premières subissent un prétraitement (dégommage et purification) avant d'être chauffées et pompées dans les réacteurs d'hydrotraitement. Dans ces réacteurs, les matières grasses sont désoxygénées et la conversion en paraffines a lieu : un triglycéride est converti en trois molécules paraffiniques[5] ramifiées. De la bioessence et du gaz sont les coproduits issus de ce procédé. L'oxygène extrait des triglycérides est évacué sous forme d'eau et de CO_2 (Reinhardt *et al.*, 2006).

Les Figure 17 Figure 18 exposent les rendements tels que présentés par Ballerini et Alazard-Toux (2006).

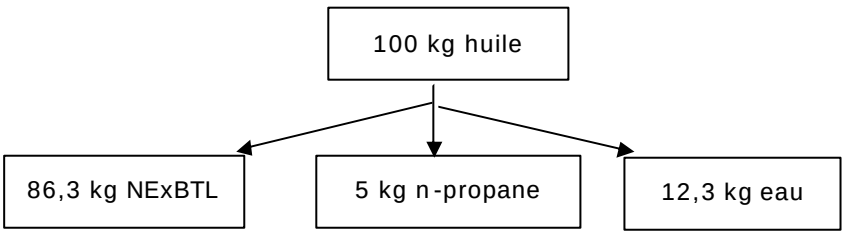

Figure 17. Rendements du procédé d'hydrotraitement des huiles végétales (d'après Ballerini et Alazard-Toux, 2006)

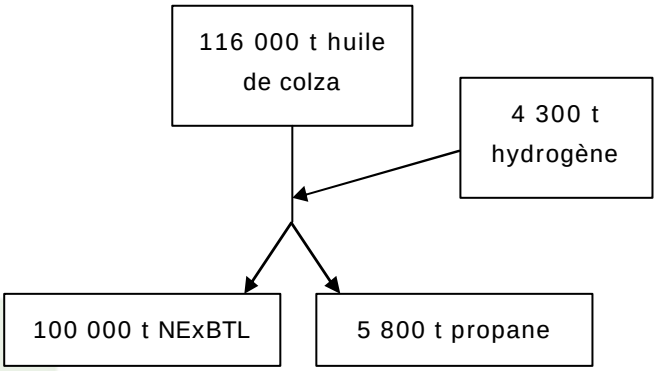

Figure 18. Quantité de matières premières nécessaires pour la production de 100 000 t d'équivalent gazole (d'après Ballerini et Alazard-Toux, 2006)

[5] Les paraffines sont des chaînes carbonées linéaires, parfois ramifiées, et contenant environ de 20 à 30 éléments Carbone.

6.1.2 Caractéristiques du NExBTL

Le NExBTL ne contient pas de soufre, d'oxygène, azote, ou de molécules aromatiques. Son indice de cétane est particulièrement élevé et ses propriétés par rapport au froid (point trouble) sont adaptables aux conditions climatiques. Le Tableau 15 présente une comparaison des propriétés physico-chimiques du NExBTL avec le biodiesel et le diesel.

Tableau 15. Propriétés physico-chimiques du NExBTL comparées à celles du biodiesel et du diesel (EN590)

	NExBTL	Biodiesel	EN590
Densité à 15°C (kg/m³)	775 - 785	~ 885	~ 835
Viscosité à 40°C (mm²/s)	2,9 – 3,5	4,5	~ 3,5
Indice de cétane	84 – 99	~ 51	~ 53
Point trouble (°C)	-5 - -30	~ -5	~ -5
PCI (MJ/kg)	~ 44	~ 38	~ 43
PCI (MJ/l)	~ 34	~ 34	~ 36
Polyaromatiques ($\%_{poids}$)	0	0	~ 4
Oxygène ($\%_{poids}$)	0	~ 11	0
Soufre (mg/kg)	~ 0	< 10	< 10

Le Centre de Recherche technique de Finlande (VTT) a mené une étude des émissions engendrées par la combustion de NExBTL dans trois véhicules à injection directe, dont deux équipés du système « common rail ». Le biocarburant testé a été mélangé à hauteur de 5%, 20% et 85% à du diesel. Cette étude a montré une réduction significative des émissions de formaldéhyde, acétaldéhyde, benzène, 1,3-butadiène, d'hydrocarbures polyaromatiques, et de l'activité mutagène (Rantanen *et al.*, 2005).
VTT, MAN et Scania ont également réalisé des tests d'émissions sur des poids lourds : ceux-ci montrent une réduction des émissions de NOx, CO, hydrocarbones et particules lors de l'utilisation de NExBTL (http://www.nesteoil.com/).

6.2 Hydrogène

L'hydrogène est à l'heure actuelle produit à partir d'hydrocarbures fossiles. Il est utilisé dans l'industrie chimique et le raffinage des produits pétroliers. L'hydrogène pourrait toutefois servir de vecteur énergétique dans le secteur résidentiel ou dans les transports, *via* sa transformation en électricité dans les piles à combustibles.
La production d'hydrogène à partir de ressources renouvelables est donc à l'étude : le bioéthanol, le syngas issu de la gazéification de la biomasse, ou encore des processus biochimiques de transformation de la biomasse pourraient être sources d'hydrogène (Ballerini et Alazard-Toux, 2006).

6.2.1 A partir de bioéthanol ou de syngas

Liquide, propre et non toxique, le bioéthanol est facilement transformé en hydrogène avec une bonne efficacité thermique (>80%).
Trois procédés de transformation de l'éthanol en H_2 existent.

- Le procédé industriel couramment utilisé est le vaporeformage. Il consiste en un traitement à la vapeur d'eau en présence d'un catalyseur ;
- Une autre méthode de production d'hydrogène, l'oxydation partielle, consiste à faire réagir un hydrocarbure (en l'occurrence, l'éthanol), de l'air et de la vapeur d'eau ;
- Enfin, le procédé autotherme, ou oxydation partielle catalytique, ou encore vaporeformage oxydant, semble mener à de meilleurs rendements en hydrogène.

Une purification de l'H_2 obtenu est généralement nécessaire.
Le choix du procédé de production d'H_2 à partir d'éthanol va principalement dépendre de l'application visée.

Le syngas, quant à lui, contient de l'H_2. Il peut être simplement purifié ou le CO peut être converti en H_2 suivant la réaction dite du gaz à l'eau ou *water gas shift* :
$CO + H_2O \Leftrightarrow CO_2 + H_2$
Cette réaction, exothermique, est favorisée par la présence de vapeur d'eau, et de basses températures (Ballerini et Alazard-Toux, 2006).

6.2.2 Via des procédés biochimiques

Différents process biochimiques permettent de produire de l'H_2 :

- La fermentation anaérobie de composés organiques par des microorganismes (production hétérotrophique d'H_2) ;
- La photolyse de l'eau en présence d'énergie lumineuse (procédé photoautotrophique) ;
- La transformation de la matière organique en présence d'énergie lumineuse (procédé photohétérotrophique) ;
- La combinaison de ces process (Ballerini et Alazard-Toux, 2006).

6.2.2.1 Production par fermentation

Différents types de microorganismes sont aptes à produire de l'H_2 par fermentation :

- Bactéries anaérobies strictes (*Clostridia*) ;
- Bactéries thermophiles ;
- Bactéries méthanogènes ;
- Bactéries anaérobies facultatives ;
- Cultures mixtes *Clostridium-Enterobacter*.

Des sucres simples purs (hexoses, pentoses) ou en mélange, ainsi que des oligomères constituent la majorité des substrats de fermentation renouvelables (Ballerini et Alazard-Toux, 2006).

6.2.2.2 Production photobiologique

Le procédé de photoautotrophisme consiste en la transformation de l'eau en hydrogène grâce à l'énergie lumineuse.

Le procédé de photohétérotrophisme consiste en la transformation de composés organiques (acides organiques ou alcools) en hydrogène grâce à l'énergie lumineuse.

Les microorganismes utilisant le premier procédé sont des microalgues, des bactéries « pourpres » et des cyanobactéries. Le second process est utilisé par les bactéries « pourpres » (Ballerini et Alazard-Toux, 2006).

6.2.2.3 Production combinée par fermentation et photobiologie

Le principe est de faire fermenter la matière organique (1) et d'appliquer un process photohétérotrophe sur le produit organique de la première réaction (2) :

$$C_6H_{12}O_6 + 2\,H_2O \longrightarrow 2\,CH_3COOH + 2\,CO_2 + 4\,H_2 \quad (1)$$

$$2\,CH_3COOH + 4H_2O \xrightarrow{\text{Lumière}} 4\,CO_2 + 8\,H_2 \quad (2)$$

$$C_6H_{12}O_6 + 6\,H_2O \longrightarrow 6\,CO_2 + 12\,H_2 \quad (1) + (2)$$

De nombreuses recherches sont menées en laboratoire pour améliorer ces process biologiques de production d'H_2. L'optimisation porte, entre autres, sur :

- L'amélioration de la productivité et la levée de l'inhibition par H_2 de processus métaboliques chez les microorganismes au cours de la fermentation ;
- La levée de l'inhibition d'enzymes et l'amélioration du transfert d'énergie lumineuse dans les réacteurs pour la voie photobiologique directe ;
- L'amélioration de la combinaison des mécanismes de fermentation et photobiologiques (Ballerini et Alazard-Toux, 2006).

6.3 Microalgues[6]

Alors qu'elles ont fait l'objet, de 1978 à 1996, d'études de large envergure aux Etats-Unis après le pic pétrolier de ce pays en 1971, les microalgues productrices d'huile destinée à la production de biodiesel sont à nouveau expérimentées suite à l'augmentation du prix du pétrole.
Sous ce terme générique utilisé dans le cadre de la production de biocarburant sont regroupées les microalgues eucaryotes[7] et les cyanobactéries, qui sont des microalgues procaryotes[2]. Au sens strict, les microalgues sont des microorganismes photosynthétiques uni- ou pluricellulaires indifférenciés vivant dans des milieux aqueux.

L'intérêt des microalgues productrices d'huile réside dans le rendement en huile par unité de surface requise pour leur production. Ainsi, le Tableau 16 présente les rendements en huile et les besoins en surface pour couvrir la moitié des besoins en carburant routier des Etats-Unis par du biodiesel pour différentes ressources. Ces données montrent bel et bien l'intérêt de la production de microalgues pour la production de biodiesel.

Tableau 16. Comparaison de diverses ressources en huile (Chisti, 2007)

Culture	Rendement en huile (l/ha)	Surface requise (Mha) [a]	% de la surface cultivée aux Etats-Unis [a]
Maïs	172	1540	846
Soja	446	594	326
Canola	1190	223	122
Jatropha	1892	140	77
Coco	2689	99	54
Palme	5950	45	24
Microalgues [b]	136 900	2	1,1
Microalgues [c]	58 700	4,5	2,5

[a] Afin de rencontrer la moitié des besoins en biodiesel pour le transport aux Etats-Unis (besoin annuel total de 0,53 Gm^3 de biodiesel pour remplacer complètement les carburants fossiles) ;[b] Basé sur $70\%_{poids}$ d'huile dans la biomasse ;[c] Basé sur $30\%_{poids}$ d'huile dans la biomasse.

Les diatomées (Figure 19 et Figure 20) font partie des microalgues. Ces organismes unicellulaires sont constitués d'un squelette siliceux et sont très répandus dans les eaux salées où ils constituent la grande part de biomasse du phytoplancton. Certaines espèces sont très riches en huile. D'autres classes, telles que les Chlorophycées, comprennent également des microalgues productrices d'huile.
Les rendements en huile varient suivant les espèces (Tableau 17).

[6] Sauf indication contraire, les informations données dans ce sous-chapitre proviennent de Chisti (2007)

[7] Les organismes procaryotes sont des organismes caractérisés par l'absence de noyau vrai et d'organites, contrairement aux organismes eucaryotes. Sont typiquement des procaryotes les archéobactéries et les eubactéries.
Les eucaryotes disposent d'un noyau vrai et sont des organismes uni- ou pluricellulaires plus évolués tels que les animaux, les végétaux, les champignons etc.

Tableau 17. Contenu en huile de quelques espèces de microalgues (Chisti, 2007)

Espèce	Contenu en huile (% poids sec)
Botryococcus braunii	25 – 75
Chlorella sp.	28 – 32
Crypthecodinium cohnii	20
Cylindrotheca sp.	16 – 37
Dunaliella primolecta	23
Isochrysis sp.	25 – 33
Monallanthus salina	> 20
Nannochloris sp.	20 – 35
Nannochloropsis sp.	31 – 68
Neochloris oleoabundans	35 – 54
Nitzchia sp.	45 – 47
Phaeodactylum tricornutum	20 – 30
Schizochytrium sp.	50 – 77
Tetraselmis sueica	15 - 23

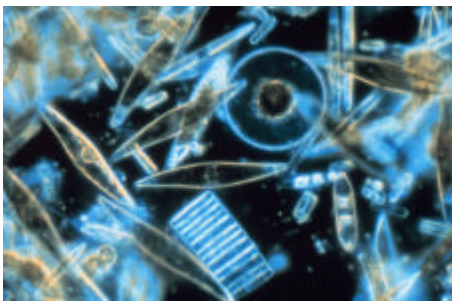

Figure 19. Diatomées vues au microscope (http://fr.wikipedia.org)

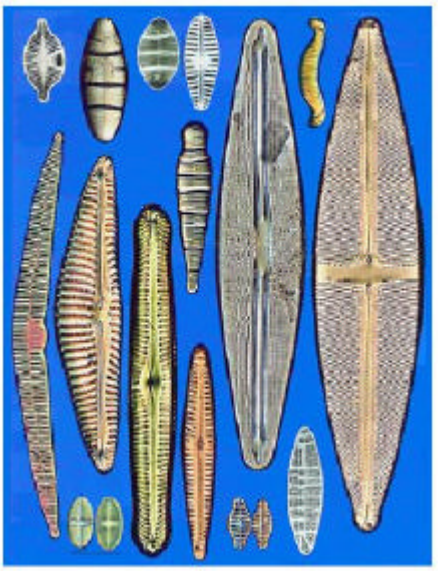

Figure 20. Vue schématique de diatomées (Daniélo, 2005)

6.3.1 Production de microalgues

La lumière, le CO_2, l'eau et les sels minéraux sont les éléments nécessaires à la croissance photosynthétique des microalgues. La température optimale se situe entre 20 et 30°C. Le CO_2 absorbé constitue environ 50% du poids sec de la biomasse microalgale. Ce CO_2 doit être apporté durant la période d'ensoleillement. Un intérêt majeur réside dans la valorisation de CO_2 émis par des centrales électriques, par exemple.

La production à grande échelle de microalgues requière une culture continue durant le jour. Le milieu de culture est renouvelé continuellement pendant la période d'ensoleillement et la quantité équivalente de biomasse microalgale est prélevée en continu également. Afin d'éviter la sédimentation des microalgues, le milieu de culture est mis en mouvement

continu. Deux méthodes de production de microalgues à grande échelle existent actuellement :

- les bassins aménagés en canaux, ou raceway ponds ;
- les photobioréacteurs tubulaires.

6.3.1.1 Les bassins aménagés en canaux

Comme illustré à la Figure 21, une boucle fermée, subdivisée en canaux de circulation constitue ce type de bassin. Sa profondeur est de 0,30 m. Le mélange du milieu de culture et la circulation des microalgues sont assurés par une roue à aubes en fonctionnement continu. Ce type de bassin est construit en béton ou en terre et peut être recouvert d'une bâche de plastique blanche.

L'apport de milieu de culture frais en journée est assuré en aval de la roue à aubes, tandis que la récolte continue des microalgues a lieu en amont de cette roue, en fin de circuit.
Ce mode de culture des microalgues date des années 1950. Le plus grand bassin existant mesure 440 000 m² et produit des cyanobactéries à des fins alimentaires.

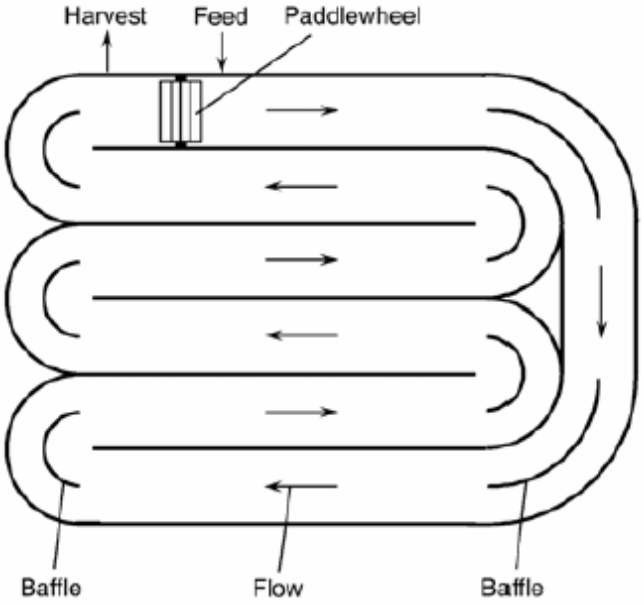

Figure 21. Schéma d'un bassin aménagé en circuit (Chisti, 2007)

L'interface air/eau de ce mode de production a toute son importance : des échanges de CO_2 ont lieu entre l'eau et l'atmosphère, générant une efficience d'utilisation du CO_2 réduite par rapport aux photobioréacteurs ; et la régulation de la température est réalisée via l'évaporation de l'eau. La température du milieu de culture varie donc suivant les cycles diurnes et saisonniers. De plus, des contaminations par d'autres espèces d'algues ou microorganismes peuvent survenir, affectant la productivité.

6.3.1.2 Les photobioréacteurs

Un photobioréacteur tubulaire consiste en une rangée de tubes droits et transparents en plastique ou en verre. Cette rangée de tubes de 0,10 m de diamètre joue le rôle de collecteur solaire. Ces photobioréacteurs peuvent également être aménagés en barrière, ou de manière hélicoïdale (Figure 22).

Ce système, fermé, ne présente pas de risque de contamination extérieure du milieu. La sédimentation des microalgues est empêchée par le maintien d'un flux produit par une pompe.

La photosynthèse génère de l'oxygène qui doit être évacué du milieu afin d'éviter des dommages photooxydatifs aux cellules en présence d'une irradiation solaire élevée. Ce traitement ne peut être réalisé que via une zone de dégazage. L'apport en CO_2 au milieu de culture a lieu dans cette zone de dégazage, et si nécessaire, à d'autres niveaux de la structure tubulaire afin d'éviter une limitation de la productivité suite à une limitation de l'apport en carbone.

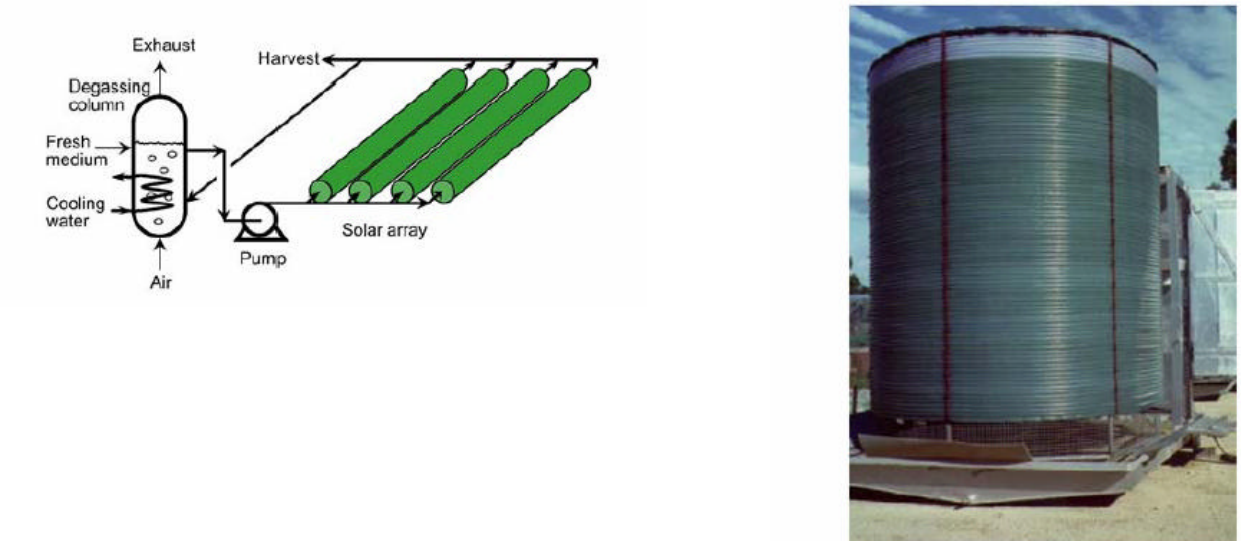

Figure 22. Schéma d'un photobioréacteur tubulaire disposé en rangées droites (à gauche) et photo d'un photobioréacteur hélocoïdal (à droite) (Chisti, 2007)

Ce système, plus contraignant à mettre en œuvre, présente un avantage en terme de productivité par rapport au système de production en bassin (Tableau 18).

6.3.1.3 Comparaison des deux systèmes de production

Le Tableau 18 montre que, pour un même niveau de production, le système photobioréacteur est plus productif en terme de rendement en huile par ha que le système en bassins. Les paramètres de concentration et productivité de la biomasse sont les paramètres optimisés obtenus en conditions réelles pour chacun des systèmes comparés. Par ailleurs, la quantité de CO2 consommé est équivalente en photobioréacteur et en bassin, en faisant abstraction des pertes dans l'atmosphère.

Tableau 18. Comparaison des systèmes de production en bassin et en photobioréacteur (Chisti, 2007)

	Photobioréacteur	Bassin en canaux
Production annuelle de biomasse (kg)	100 000	100 000
Productivité volumétrique (kg/(m³.j))	1,535	0,117
Productivité relative à la surface (kg/(m².j))	0,048 [a] 0,072 [c]	0,035 [b]
Concentration en biomasse dans le milieu de culture (kg/m³)	4,00	0,14
Surface requise (m²)	5681	7828
Rendement en huile (m³/ha)	136,9 [d] 58,7 [e]	99,4 [d] 42,6 [e]
Consommation annuelle en CO_2 (kg)	183,333	183,333
Description du système	132 tubes parallèles/unité Longueur tubes 80 m Diamètre tubes 0,06 m	978 m²/bassin l x L x P : 12 x 82 x 0,30 m
Nombre d'unités	6	8

[a] Basé sur la surface de l'installation de production ;[b] Basé sur la surface effective du bassin ;[c] Basé sur la surface projetée des tubes du photobioréacteur ;[d] Basé sur 70%$_{poids}$ d'huile dans la biomasse ;[e] Basé sur 30%$_{poids}$ d'huile dans la biomasse.

Enfin, un dernier paramètre important est la récolte de la biomasse. Celle-ci peut être effectuée par centrifugation, filtration, etc. La concentration en biomasse dans le milieu de culture est déterminante sur le coût de la récolte : le système en bassin présentant une concentration en biomasse presque 30 fois inférieure au système photobioréacteur, la récolte des microalgues hors du premier système est dès lors nettement plus coûteuse.

6.3.2 Production de biodiesel

Les acides gras extraits des microalgues peuvent être transformés en biodiesel suivant la réaction classique de transestérification.
Les microalgues présentent toutefois la particularité de produire des acides gras polyinsaturés en grande quantité. Le haut degré d'insaturation du biodiesel produit affecte l'indice d'iode, paramètre limitant de la norme EN 14214 déterminant la qualité du biodiesel utilisé en Europe. L'huile microalgale requiert dès lors une hydrogénation catalytique partielle afin de saturer ces acides gras et être ainsi conforme aux exigences du marché européen (Chisti, 2007).

6.3.3 Aspects économiques

Les coûts de production de la biomasse microalgale telle que présentée dans le Tableau 18 s'élèvent à $2,95/kg de biomasse en photobioréacteur et à $3,80/kg en bassin ($CO_2$ disponible gratuitement).
Des économies d'échelle sont engendrées en augmentant la capacité de production à 10 000 t/an : les coûts de production s'abaissent à environ $0,47/kg de biomasse et $0,60/kg, respectivement en photobioréacteur et en bassin. En considérant que cette biomasse microalgale contient 30% d'huile (en poids), un litre d'huile coûterait en production de biomasse environ $1,40 et $1,81 en photobioréacteur et en bassin, respectivement.
De plus, le coût d'un litre d'huile issue du process de production de biomasse le moins onéreux en photobioréacteur est évalué à $2,80. La phase de récupération de l'huile constitue donc la moitié du coût total de production d'huile d'origine microalgale.
Si la biomasse microalgale (produite en photobioréacteur) contient 70% d'huile en poids, le prix de l'huile descend à environ $0,72/l.

En guise de comparatif, l'huile de palme brute était vendue en 2006 à un prix moyen de $0,52/l.

Afin d'améliorer l'économie de cette production et d'atteindre la rentabilité économique par rapport au pétrole, diverses stratégies peuvent être mises en œuvre : amélioration des aptitudes de production des microalgues par génie génétique, amélioration des photobioréacteurs, et développement d'une stratégie de production basée sur le principe de bioraffinerie.

7 Les usines pilotes à travers le monde

Plusieurs sociétés à travers le monde mettent en œuvre la production de biocarburant de seconde génération à l'échelle de pilote ou de démonstration.

7.1 Europe

En **Allemagne**, la société Choren, en partenariat avec le pétrolier Shell, développe une usine pilote d'une capacité de 15 000 t de BTL par an. Selon Dieselnet (2005), cette usine sera la première au monde à produire du BTL commercialisé. Ainsi, le produit a déjà le soutien de deux constructeurs automobiles, vu les avantages du biocarburant en terme de compatibilité véhicule/carburant, de performances, et d'émission de polluants.
Ce partenariat est particulièrement opportun, Choren maîtrisant la gazéification de la biomasse, et Shell le procédé Fischer-Tropsch qui est déjà appliqué en Malaisie pour la production de GTL.
Si l'expérience de l'usine pilote de BTL est fructueuse, Choren et Shell envisageraient la construction d'une usine commerciale prototype d'une capacité de 200 000 t/an, qui pourrait être opérationnelle en 2009/2010 (Greencarcongress, 2005). Le coût de cette usine est estimé à 400 M€. La quantité de biomasse valorisée est évaluée à 1 Mt.

En **Finlande**, le centre de recherche technique VTT a lancé des tests de gazéification de tout type de biomasse pour la production de biocarburants de seconde génération. Les résultats issus de ces tests permettront le design d'une usine pilote de démonstration industrielle (Innovations-report, 2006). La commercialisation de la technologie de gazéification se déroulera en 3 phases. La première phase a été lancée récemment et porte sur une capacité de production de 500 kW. La seconde phase, prévue pour 2008-2009, aura une capacité de 50 MW. Elle impliquera la vérification du process en matière de risques. La troisième phase, envisagée à partir de 2010, comprend la construction d'une usine de démonstration qui devrait couvrir 3% des besoins en carburant routier de la Finlande.

Par ailleurs, toujours en Finlande, la Société Neste Oil agrandit une usine pour la conversion d'huile végétale et de graisses animales en NExBTL. Ce carburant est issu d'un processus d'hydrogénation conventionnel et présente les mêmes qualités que le BTL. L'usine a une capacité de 170 000 t par an (Eikeland, 2006).

En **Espagne**, Abengoa Bioenergia construit une usine destinée à produire de l'éthanol de seconde génération et du syngas. Les procédés biochimique et thermochimique de traitement de la lignocellulose sont donc d'application dans cette usine qui traitera 70 t de biomasse par jour (http://ethanolproducer.com/article.jsp?article_id=3025). L'investissement s'élève à 36 M€ et est réalisé dans le cadre du programme CENIT du gouvernement espagnol.

En **Suède**, SEKAB a ouvert en 2004 une usine pilote d'éthanol lignocellulosique. Diverses technologies sont vérifiées avant de passer au stade de production supérieur (http://www.sekab.com).

En parallèle à ces usines, le projet **CHRISGAS** (Clean Hydrogen-RIch Synthesis GAS) a pour but de démontrer la production d'un gaz de synthèse riche en hydrogène à partir de biomasse. Ce projet est financé par le 6ème Programme Cadre de la Commission européenne et l'Agence suédoise pour l'Energie de 2004 à 2009. 16 partenaires issus de la recherche et de l'industrie mènent des travaux dans le cadre de ce projet.
Le gaz de synthèse riche en hydrogène est une première étape en vue de la production d'hydrogène de qualité pour le transport routier. L'objectif de CHRISGAS est dès lors la production de ce gaz à une échelle de 18 MW_{th}. Une étude d'impact socio-économique sur l'implantation d'une usine commerciale de bio-hydrogène routier dans une ville, ainsi que sur les divers obstacles non-techniques du marché pour parvenir à l'exploitation de ce biocarburant est également prévue (http://www.chrisgas.com/).

Le projet **CROPGEN** (Renewable energy from crops and agrowastes) a pour but de produire une source de biocombustible durable intégrable à moyen terme à l'infrastructure énergétique existante. A plus long terme, les instigateurs du projet espèrent que cette source bioénergétique constituera à un moyen économique et sûr de couverture des besoins liés au développement d'une économie basée sur l'hydrogène combustible. La biométhanisation constitue le pivot de ce projet, qui a pour objectifs d'annuler des verrous technologiques limitant l'utilisation de cultures lignocellulosiques et d'améliorer les rendements de conversion en méthane (http://www.cropgen.soton.ac.uk/).

Le projet **CUTE** (Clean Urban Transport for Europe), financé par la CE, a pour but de mettre en place un système de transport propre (qui ne produit pas d'émissions) et peu bruyant, équipé de l'infrastructure requise pour les carburants alternatifs (EC, 2002). Mis en place dans 9 villes européennes (Amsterdam, Barcelone, Hambourg, Londres, Luxembourg, Madrid, Porto, Stockholm et Stuttgart), ce projet a soutenu l'achat de bus roulant à l'hydrogène, la mise en place des infrastructures, la formation des techniciens et l'entretien des véhicules.
Amsterdam, Barcelone, Hambourg et Stockholm ont opté pour l'exécution de l'électrolyse sur le site de distribution de l'H_2. Trois des 4 villes ont opté pour une source d'électricité verte, couvrant 56% de la production d'H_2 (EvoBus, 2006).

Le projet **NILE** (New Improvements for Lignocellulosic Ethanol) a pour but de proposer le meilleur procédé de production de bioéthanol à partir de BLC, à coût réduit et avec un faible impact environnemental. Le tout sera testé dans une usine pilote en vue d'obtenir les données requises avant la mise en œuvre d'une usine de démonstration (NILE, 2006). Ce projet a débuté en octobre 2005 et s'achèvera en septembre 2009.

Le projet **BIOGASMAX** a pour but de partager différentes expériences européennes liées au biométhane et de mettre en place des pratiques d'excellence pour la gestion des transports urbains. Le projet mène des activités de R&D dans les domaines de la production de gaz à partir de différents types de déchets, de la concentration du biogaz (en vue d'obtenir la qualité de carburant), de la distribution pour le transport et l'injection dans les réseaux de gaz naturel, de l'utilisation dans les véhicules (http://www.biogasmax.org/).

Le projet **SHAMASH** (Production de biocarburants lipidiques par des microalgues) est un projet de recherche sur la production de biodiesel à partir de microalgues qui a vu le jour en décembre 2006 pour une durée de 3 ans. Ce projet a pour objectifs de trouver la microalgue la plus productive en huile, maîtriser sa culture et son exploitation (Bertrand, 2007).

7.2 Ailleurs dans le monde

En Afrique du Sud, la Société Sasol produit industriellement des carburants (d'origine fossile) par gazéification du charbon. La technique utilisée est identique à celle appliquée à la biomasse.

Au Canada, Shell est partenaire de IOGEN dans l'usine pilote de production d'éthanol à partir de lignocellulose (paille) (Eikeland, 2006).

Aux Etats-Unis, la société Future Fuels Inc. a décidé fin 2005 d'investir dans la construction d'une usine de production d'éthanol à partir de déchets dont la capacité de production sera d'environ 200 millions de litres (Primezone, 2006).

Badger (2002) a établi une liste non exhaustive des industries développant la production d'éthanol à partir de lignocellulose en Amérique du Nord (Tableau 19).

Tableau 19. Liste non exhaustive des industries développant la production d'éthanol à partir de lignocellulose en Amérique du Nord en 2002 (Badger, 2002 ; Environment Canada, 1999)

Société et localisation	Technologie	Matière première	Capacité de production d'éthanol	Commentaire
Arkenol, Orange, CA, USA	Acide concentré			Usine pilote en fonction
BCI, Dedham, MA, USA	Acide dilué	Bagasse	7560 Ml/an	Inauguration de l'usine en 2002
Bioengineering Resources, Fayetteville, AR, USA	Gazéification thermochimique avec fermentation			Usine pilote en fonction(1)
Ethxx International, Aurora, ON, Canada	Gazéification thermochimique avec conversion catalytique	Bois		Usine pilote en fonction(1)
Fuel Cell Energy, Lakewood, CO	Gazéification thermochimique avec conversion catalytique	Bois		Usine pilote en fonction(1)
Iogen, Ottawa, ON, Canada	Enzymatique	Balles d'avoine, switchgrass, paille et rafle de maïs	378 Ml/an	Usine expérimentale en fonction(1)
Masada, Birmingham, AL	Acide concentré	Déchets solides municipaux	3780 Ml/an	Inauguration de l'usine en 2002
PAszner Technologies, Inc, Surrey, BC, Canada	Process à l'acétone en solution acidifiée	Bois		Usine commerciale en construction(1)
PureVision Technology, Ft. Lupton, CO	Enzymatique	Bois		Usine pilote en construction(1)

(1) Situation en 2002

8 Tableau récapitulatif

Biocarburant	Source	Procédé	Compatibilité
Huiles de pyrolyse	BLC	Thermochimique, pyrolyse	Moteurs diesel
Méthanol	BLC, huiles pyrolytiques	Thermochimique, gazéification	Moteurs essence
Diméthyl éther	BLC, huiles pyrolytiques	Thermochimique, gazéification	Moteurs diesel
Biomass to Liquid	BLC, huiles pyrolytiques	Thermochimique, gazéification	Moteurs diesel
Ethanol	BLC, cultures amylacées et sucrières	Biochimique, prétraitement, hydrolyse et fermentation	Suivant les applications, moteurs essence, et diesel
Biométhane	Biomasse humide	Biochimique, biométhanisation	Moteurs gaz naturel
Butanol	Matières sucrées et fibreuses	Biochimique, fermentation acétonobutylique	Moteurs essence
NExBTL	Matières grasses	Hydrotraitement catalytique	Moteurs diesel
Biodiesel	Microalgues productrices d'huile	Transestérification	Moteurs diesel
H_2	Bioéthanol	Vaporeformage, oxydation partielle, procédé autotherme	Moteurs dédiés
H_2	Syngas	Purification del'H_2 contenu, réaction de *water gas shift*	Moteurs dédiés
H_2	Composés organiques	Fermentation anaérobie (procédé hétérotrophique)	Moteurs dédiés
H_2	Eau, lumière	Procédé photoautotrophique	Moteurs dédiés
H_2	Composés organiques, lumière	Procédé photohétérotrophique	Moteurs dédiés

9 Perspectives des biocarburants non conventionnels en Belgique

Bon nombre des procédés abordés dans ce document requièrent encore des développements technologiques afin d'améliorer les rendements et d'optimiser la valorisation de la matière première.

La rentabilité des unités de production exige la mise en place d'unités de très grande capacité, engendrant des besoins en matières premières, notamment lignocellulosiques, très élevés.

L'implantation d'une unité de production de biocarburant issu de la BLC en Belgique nécessiterait l'importation de biomasse, notamment lignocellulosique. En effet, la production de pellets et autres plaquettes offre actuellement un débouché à nos cultures énergétiques lignocellulosiques.

Certains ports, tels qu'Anvers, où bon nombre de raffineries sont établies, pourraient toutefois accueillir par exemple des unités de production de NExBTL. Celles-ci peuvent s'intégrer à une raffinerie pétrolière pour la fourniture d'hydrogène, le stockage et le mélange du biocarburant, et exploiter les facilités de fourniture de matières premières du port. La production de NExBTL permettrait également de valoriser des déchets produits en grande quantité dans notre pays, comme les huiles de fritures et les graisses animales des abattoirs.

La Belgique dispose par ailleurs d'une côte qui pourrait être utilisée pour la production de microalgues. Des études doivent être menées afin de vérifier la faisabilité d'un tel projet.

La production de biogaz-carburant peut également être envisagée, vu la quantité de déchets ménagers générés en Belgique. Le développement d'une telle filière stimulerait peut-être également les gros producteurs de lisier à investir dans une unité de biométhanisation.

10 Conclusion

Certains biocarburants non conventionnels peuvent avoir un avenir en Belgique. La valorisation des déchets doit toutefois prévaloir sur la transformation de la biomasse lignocellulosique en biocarburants. Et des études doivent être menées quant au potentiel offert par notre production de matières premières.

11 Références bibliographiques

Badger P.C. (2002). Ethanol from cellulose: a general review. *In*: Janick J. and Whipkey A. Eds. Trends in new crops and new uses. p17-21.

Ballerini D., Alazard-Toux N. (2006). Les biocarburants – Etat des lieux, perspectives et enjeux du développement. Editions TECHNIP, Paris, France

Bertrand O.I. (2007). Un carburant à base d'algues… Et pourquoi pas ? Agra Valor, 147 : 24-26.

Boissonnet G., Boudet N., Seiler JM., Duplan JL. (2005). Process simulation and comparison of several biomass gasification routes for the production of Fischer-Tropsch liquids. 14th European Biomass Conference, 17-21/10/2005, Paris, France. p588-591.

Boudet N. (2005). Les filières de production de biocarburant. Forêt, Bois, Energie renouvelable, IFP, 18/10/2005.

Chisti Y. (2007). Biodiesel from microalgae. Biotechnology Advances, 25: 294-306.

Daniélo O. (2005). Un carburant à base d'huile d'algue. Biofutur, 255: 33-36.

Demirbas A. (2007). Progress and recent trends in biofuels. Progress in Energy and Combustion Science, 33: 1-18.

Dieselnet (2005). http://www.dieselnet.com/news/2005/08shell.php

EC (2002). Clean Urban Transport for Europe – A fuel cell bus project in 9 European cities. 28p.

EC (2006). An EU strategy for biofuels. COM (2006) 34 final. 28p.

Eikeland P.O. (2006). Biofuels – the new oil for the petroleum industry? Fridtjof Nansen Institute Report 15/2005. 39p.

Environment Canada (1999). Wood-Ethanol Report. 17p.

EvoBus (2006). CUTE – A Hydrogen fuel cell bus project in Europe 2001-2006. 105p.

Ezeji T.C., Qureshi N., Blaschnek H.P. (2007). Bioproduction of butanol from biomass: from genes to bioreactors. Current opinion in biotechnology, 18: 220-227.

Greencarcongress (2005).
http://www.greencarcongress.com/2005/12/secondgeneratio.html

Güllü D., Demirbas A. (2001). Biomass to methanol via pyrolysis process. Energy conversion and management, 42: 1349-1356.

Hamelinck C.N., Faaij A.P.C. (2006). Outlook for advanced biofuels. Energy Policy, 34: 3268-3283.

Innovations-report (2006). http://www.innovations-report.com/html/reports/energy_engineering/report-71908.html

Jansen P. (2004). Innovative biofuel production processes: Fischer-Tropsch synthesis and Hydro Thermal Upgrading. EU-China workshop on liquid biofuels, Beijing, 4-5/11/2004.

Knoef H.A.M. (2005). Handbook on biomass gasification. 14th European Biomass Conference, 17-21/10/2005, Paris, France. p776-779.

MEMO (2007). Promouvoir les biocarburants comme alternative credible au pétrole dans les transports. MEMO/07/5. 3p.

Müller M., Bockhorn H. (2007). Pyrolytic behaviour of different biomasses (angiosperms) (maize plants, straws, and wood) in low temperature pyrolysis. J.Anal. Appl. Pyrolysis 79: 136-146.

Muth J., Lenz K. (2006). Renewable Fuels for Advanced Powertrains – RENEW. ThermalNet, 3: 13-14.

NILE (2006). http://www.nile-bioethanol.org

O'Carroll AM., Fürnsinn S., Ripfel K., Rauch R., Ward S., Hofbauer H. (2005). Evaluation of the biomass based production of synthetic fuels via steam gasification and Fischer-Tropsch synthesis. 14th European Biomass Conference, 17-21/10/2005, Paris, France. p1671-1674.

Persson M., Wellinger A. (2006). Biogas upgrading and utilisation. IEA Bioenergy. 32p.

Primezone (2006). http://www.primezone.com/newsroom/news.html?d=94861

Rantanen L., Linnaila R., Aakko P., Harju T. (2005). NExBTL – Biodiesel fuel of the second generation. SAE International, 2005-01-3771, 17p.

Reinhardt G., Gärtner S.O., Helms H., Rettenmaier N. (2006). An assessment of energy and greenhouse gas of NExBTL. IFEU final report.

Schoeling O. (2006). Le Bioéthanol – Etudes technique et des possibilités de développement du marché en Belgique, ValBiom, 30p.

Semelsberger T.A., Borup R.L., Greene H.L. (2006). Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel. Journal of Power Sources, 156: 497-511.

Zhang Q., Chang J., Wang T., Xu Y. (2007). Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. Energy conversion and management, 48: 87-92.