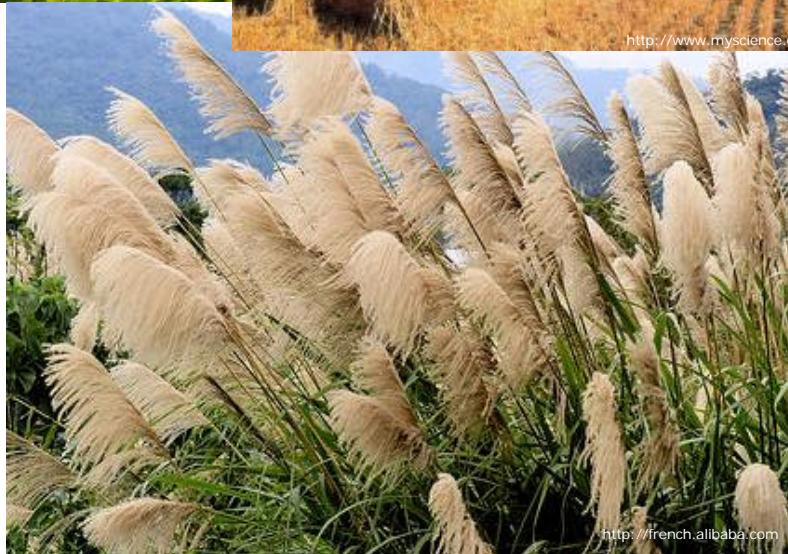


LES BIOCARBURANTS NON CONVENTIONNELS : QUELLES OPPORTUNITES POUR LA BELGIQUE EN 2020?



Lara Mertens (UCL)

Julie Roiz (GxABT)

Juillet 2010

TABLE DES MATIÈRES

I.	INTRODUCTION.....	1
1.1.	Contexte politique et énergétique	1
1.2.	Définitions	2
1.2.1.	Les biocarburants non conventionnels.....	2
1.2.2.	La biomasse lignocellulosique	2
II.	PRÉSENTATION ET DESCRIPTION DES FILIÈRES	2
2.1.	La voie thermochimique	2
2.1.1.	Le bio-méthanol.....	4
2.1.2.	Le bio-Diméthylether – bio-DME.....	5
2.1.3.	Le diesel Fischer-Tropsch (Biomass-to-Liquid – BTL)	5
2.1.4.	Le gaz naturel synthétique (Bio-SNG)	6
2.1.5.	Le Biohydrogène.....	7
2.2.	La voie biochimique	7
2.2.1.	Ethanol cellulosique	8
2.2.2.	Le biogaz.....	9
2.2.3.	Le bio-butanol	10
2.3.	Autres procédés de production de biocarburants.....	12
2.3.1.	Le jatropha.....	12
2.3.2.	Les algues	13
2.4.	Tableau synthétique	19
III.	ETAT D'AVANCEMENT DES FILIERES ET PERSPECTIVES EN BELGIOUE	21
3.1.	Le Diesel Fischer-tropsch.....	21
3.2.	Le biométhanol.....	23
3.3.	Le Bio-DME.....	24
3.4.	Le Biogaz.....	25
3.5.	Le Gaz Naturel Synthétique – Bio-SNG.....	26
3.6.	Le biohydrogène	28
3.7.	L'éthanol cellulosique	29
3.8.	Le bio-butanol.....	32
3.9.	Le Jatropha.....	32
3.10.	Les algues	33
IV.	CONCLUSION	36

LISTE DES ACRONYMES

ABE :	Acétone Butanol Ethanol
BtL :	Biomass to Liquid
CNG :	Compressed Natural Gas – Gaz naturel compressé
CO ₂ :	Dioxyde de carbone
Diesel FT:	Diesel de type Fischer-Tropsch
DME:	Dimethyl Ether
FT :	Fischer-Tropsch
GES:	Gaz à Effet de Serre
H ₂ :	hydrogène
IEA :	International Energy Agency
JCL :	Jatropha Curcas L.
LPG :	Liquified Petroleum Gas – Gaz de pétrole liquifié
Nm ³ :	Mètre cube normal
NO _x :	Oxyde d'azote
O ₂ :	Oxygène
PAC:	Piles a Combustibles
PBR:	Photobioréacteur
PCI :	Pouvoir calorifique inférieur
PCS :	Pouvoir calorifique supérieur
SNG :	Synthetic Natural Gas
t :	Tonne
TCR :	Taillis à Courte Rotation
Tep:	Tonnes Equivalent Pétrole
TtCR:	Taillis à très Courte Rotation

I. INTRODUCTION

1.1. Contexte politique et énergétique

Le réchauffement climatique, l'instabilité des prix du pétrole et l'incertitude de la sécurité d'approvisionnement sont enjeux actuels majeurs qui poussent vers une diversification des sources énergétiques et vers le développement et la promotion des énergies renouvelables. Dans le secteur du transport, responsable d'environ un quart des émissions attribuables à l'énergie¹, les biocarburants sont actuellement au cœur de l'attention. Les biocarburants constituent aujourd'hui l'alternative renouvelable principale capable de diminuer significativement la consommation de carburants fossiles dans le transport.

Le parlement européen a donné son feu vert au paquet Energie – Climat qui vise à s'assurer que l'Union Européenne réalisera ses objectifs climatiques d'ici 2020 : une réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre (GES), une réduction de la consommation d'énergie primaire de 20% par rapport aux projections d'ici 2020 et une part de 20% d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale. La Belgique s'est vue attribuée un objectif de 13% d'énergie renouvelable dans la consommation finale brute d'énergie en 2020 avec un sous-objectif de 10% dans le secteur des transports. En vue de promouvoir le développement des biocarburants non conventionnels, la directive européenne relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables² (RED) stipule : « La contribution apportée par les biocarburants produits à partir de déchets, de résidus, de matières cellululosiques d'origine non alimentaire et de matières lignocellulosiques est considérée comme équivalent à deux fois celle des autres biocarburants ». La directive RES a mis en place des critères de durabilité pour biocarburants et bioliquides. De plus, la Directive européenne relative à la qualité des carburants (2009/30/CE) exige que les fournisseurs de réduire, aussi progressivement que possible, les émissions de gaz à effet de serre, produites sur l'ensemble du cycle de vie du carburant ou de l'énergie fournis, par unité d'énergie, à hauteur de 6 %, le 31 décembre 2020 au plus tard.

Dans le contexte politique et énergétique actuel, l'Europe se trouve contrainte à mettre en place des solutions efficaces, durables et compétitives en vue de diversifier les sources d'approvisionnements énergétiques. Face aux objectifs européens ambitieux pour 2020, le marché des biocarburants connaîtra dans les années à venir une croissance sans précédent. Les biocarburants actuellement sur le marché (dits « biocarburants conventionnels ») présentent des limites en termes de disponibilité de biomasse agricole et la diversification des matières premières utilisées pour la production de biocarburants est essentielle à long terme. Les biocarburants « non conventionnels », provenant d'autres types de biomasse (lignocellulose, déchets, algues...) suscitent dès lors un intérêt important et viendront compléter le marché existant. Cette étude a pour objectif d'analyser les différentes filières de biocarburants non conventionnels et d'évaluer leur contribution potentielle à l'objectif 10% en 2020.

1 FEBIAC

2 DIRECTIVE 2009/28/CE du parlement européen et du conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables. Par soucis de faciliter d'écriture, celle-ci sera dès lors citée sous le nom de « Directive RES »

1.2. Définitions

1.2.1. Les biocarburants non conventionnels

Les biocarburants conventionnels, actuellement disponibles sur le marché, sont principalement produits par fermentation des sucres contenu dans la biomasse (betterave, canne à sucre, blé, maïs, sorgho...) et par transestérification d'huiles végétales telles que l'huile de palme, de colza ou de soja. Les biocarburants non conventionnels sont produits à partir d'un éventail plus large de matière première, à savoir des matières lignocellulosiques, déchets fermentescibles, ou encore microalgues ou huile de jatropha.

1.2.2. La biomasse lignocellulosique

Constituant principal de la paroi cellulaire des plantes, la ligno-cellulose est composée de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. La cellulose est une chaîne linéaire constituée de deux sucres à 6 atomes de carbone (C6), 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 (C5, à savoir xylose et arabinose) et des hexoses (C6, à savoir glucose, galactose et mannose). La lignine est issue de la condensation de l'alcool coumarylique, de l'alcool coniférylique et de l'alcool sinapylique. Ces trois constituants interagissent pour former une matrice rigide dont la composition n'est pas uniforme. Alors que la cellulose constitue 35 à 50% de la matière sèche lignocellulosique, la teneur et la composition en hémicelluloses est très variable. La biomasse lignocellulosique comprend le bois, la paille, le miscanthus... et peut être issu de l'industrie forestière, du secteur agricole (cultures dédiées ou résidus) ou de déchets ménagers et agro-industriels.

II. PRÉSENTATION ET DESCRIPTION DES FILIÈRES

Il existe deux voies principales permettant la transformation de la biomasse lignocellulosique en biocarburant : la voie thermochimique et la voie biochimique. D'autres procédés de production existent également, par exemple pour production de biocarburants à partir d'huile de jatropha et de microalgues.

2.1. La voie thermochimique

La voie thermochimique fait appel à la **gazéification** de la biomasse. La biomasse est premièrement prétraitée grâce à des techniques de pyrolyse ou de torréfaction pour donner une matière homogène. La pyrolyse est un processus de destruction de la matière organique par la chaleur en 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 CO₂, CO, H₂ et CH₄... Différents paramètres permettent d'orienter la pyrolyse essentiellement vers un des produits de la réaction. 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. Le Tableau 1 présente les principales propriétés des huiles de pyrolyse.

Tableau 1 : Comparaison des propriétés des huiles pyrolytiques et du fuel lourd (Zhang et al, 2007)

Propriété	Huile pyrolytique	Fuel lourd
Masse volumique (kg/m ³)	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	0	2.5
Cendres	0 - 0.2	0.1
PCQ (MJ/kg)	16 - 19	40
Viscosité (cSt à 50°C)	13	350
pH	2.5	-

La gazéification s'opère ensuite à très haute température en présence de vapeur d'eau ou d'oxygène. La gazéification consiste en la transformation thermique et chimique d'un combustible solide en un mélange gazeux, appelé « syngas », en présence d'un gaz (O₂, vapeur d'eau, H₂, 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. Le Tableau 2 présente la composition moyenne du syngas produit lors de la gazéification de la biomasse.

Tableau 2 : 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 ₂ H ₄	2-4

Le gaz de synthèse obtenu doit ensuite être purifié afin d'éliminer les composés comme le soufre, les métaux, le dioxyde de carbone ou encore le goudron pouvant nuire au catalyseur. La voie thermo-chimique permet d'obtenir des carburants liquides comme le diesel Fischer-Tropsch, le biométhanol ou des carburants gazeux en conditions standards comme le bio-DME, le bio-SNG, le biohydrogène (Figure 1).

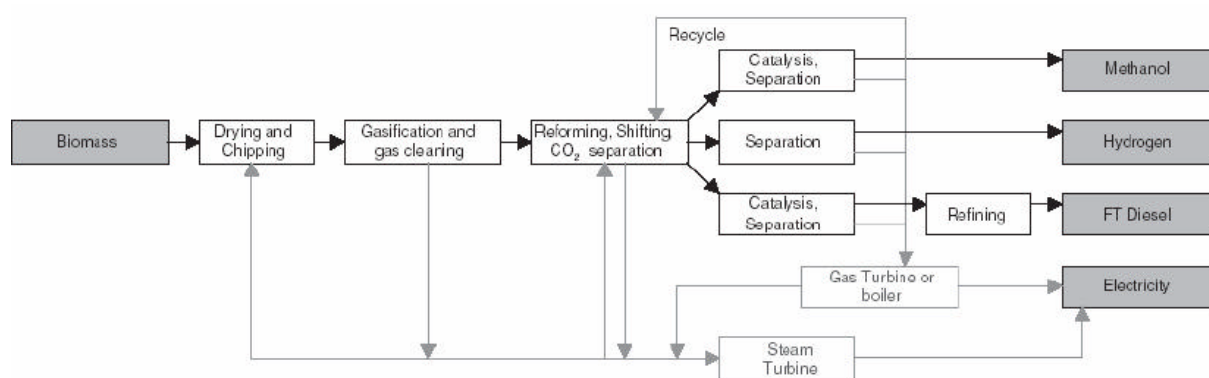
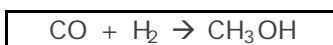


Figure 1 : Procédé de production de méthanol, d'hydrogène, de BTL (FT Diesel) via un procédé de gazéification de la biomasse (Hamelinck et Faaij, 2006)

2.1.1. Le bio-méthanol

La synthèse du biométhanol à partir du syngas est une combinaison de la réaction du gaz à l'eau (« *Water-gas-shift* ») et de l'hydrogénation du CO₂ par un catalyseur (catalyseur Cu/Zn/Al) (IEA, 2008). Ces deux réactions de synthèse sont fortement exothermiques. L'équation de la réaction est la suivante:



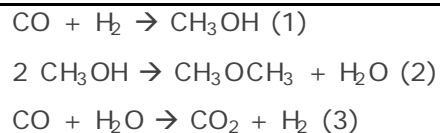
Durant la production du biométhanol, la chaleur qui est dégagée, doit être retirée afin de maintenir une vitesse de réaction optimale (Hamelinck, 2004). Une étape de distillation est également nécessaire pour séparer le méthanol de l'eau, coproduit de la synthèse. La pureté du syngas est essentielle pour le bon fonctionnement des catalyseurs de la réaction. Actuellement, le méthanol est dans la plupart des cas produit à partir de gaz naturel et est utilisé comme matière première pour la synthèse d'autres produits chimiques comme par exemple le formaldéhyde ou l'acide acétique qui sont à la base des matières plastiques. Il peut également permettre la synthèse du DME par déshydratation. Le méthanol peut toutefois être utilisé comme combustible dans des moteurs à combustion interne (moteur essence) ou avec une plus grande efficacité dans des véhicules PAC.

Tableau 3 : Caractéristiques physico-chimique du biométhanol. (Source: Hamelinck 2004, IEA 2008)

Formule chimique	CH ₃ OH
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/L)	15,4-15,6
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/Kg)	19,7
Densité (kg/L)	0,79
Productivité (L _{carb} /kg MS)	0,58
Nombre Cétane	3
Nombre octane	>110
Type de moteur	Moteur essence, Piles à combustibles

2.1.2. Le bio-Diméthylether – bio-DME

Le diméthylether 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):



La réaction globale peut donc se résumer comme suit (Semelsberger et al, 2006) :



Tableau 4 : Caractéristiques physico-chimique du bio-DME. (Source : IEA, OECD 2008)

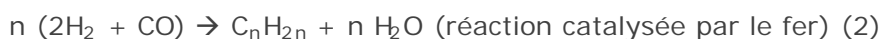
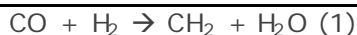
Formule chimique	CH ₃ OCH ₃
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/L)	18,2-19,3
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/Kg)	28,4
Densité (kg/L)	0,67 ³
Productivité (L _{carb} /kg MS)	0,47
Nombre Cétane	60
Nombre octane	/
Type de moteur	Moteur diesel adapté, mélange avec LPG

Le DME est gazeux à température et pression ambiante. Pour faciliter le stockage et le transport, le DME peut être liquéfié à température ambiante sous une pression de 5 bars. 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. Il peut être également mélangé à du LPG dans des moteurs essences avec des teneurs allant jusqu'à 30% (Semelsberger et al, 2006).

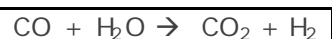
2.1.3. Le diesel Fischer-Tropsch (Biomass-to-Liquid – BTL)

La synthèse de Fischer-Tropsch (FT) permet la production, à partir de syngas, d'un carburant du type diesel ou kérosène constitué d'un mélange d'hydrocarbures de différentes longueurs de chaîne carbonée. Les réactions opérant dans l'unité Fischer-Tropsch entre l'H₂ et le CO du syngas sont représentées ci-dessous.

³ Densité du bio-DME à 20°C



Les molécules de monoxyde de carbone réagissent exothermiquement avec l'hydrogène pour former des radicaux alkyles (-CH₂-) (1). La réaction de la synthèse de Fischer-Tropsch et les hydrocarbures produits varient suivant le catalyseur utilisé (2). 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 H₂ :



Le bon déroulement du processus est très dépendant de la qualité du syngas. La purification du gaz est dès lors une étape critique pour éviter l'empoisonnement des catalyseurs du procédé FT et il est donc impératif d'enlever goudrons, sulfures, alcalins et autres cendres (Demirbas, 2007). Le FT-diesel peut être utilisé en mélange illimité avec le diesel d'origine fossile dans des moteurs traditionnels.

Tableau 5 : Caractéristiques physico-chimique du biodiesel FT. Source : IEA/OECD 2008

Formule chimique	C _x H _y
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/L)	33,1 - 34,3
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/Kg)	43,9
Densité (kg/L)	0,77 - 0,78
Nombre cétane	>70
Nombre octane	/
Type de moteur	Diesel
Productivité (L _{carb} /kg MS)	270

2.1.4. Le gaz naturel synthétique (Bio-SNG)

Le Bio-SNG est un gaz contenant principalement du méthane ainsi que de petites quantités d'hydrogène, de dioxyde de carbone et d'azote. Pour obtenir du bio-SNG, le gaz de synthèse doit subir la méthanation, procédé industriel permettant la conversion catalytique de l'hydrogène et du monoxyde de carbone en méthane. Le produit obtenu est ensuite purifié pour donner du bio-SNG. La méthanation étant un procédé très exothermique, la chaleur doit être enlevée du réacteur et le méthane doit être refroidi avant le stockage (Ahman, 2010). La chaleur extraite pourrait être utilisée pour produire de l'électricité, ce qui permettrait à la filière d'être plus rentable. De composition identique au gaz naturel, le bio-SNG pourrait être transporté à travers le réseau de gaz naturel existant et utilisé au sein des véhicules CNG (*Compressed Natural Gas*) (ECN, 2010).

Tableau 6 : Caractéristiques physico-chimiques du bio-SNG. (Source: ECN 2006)

Formule chimique	CH ₄
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/L)	6,5
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/Kg)	48,5
Densité (kg/L)	0,135 ⁴
Nombre Cétane	/
Nombre octane	130
Type de moteur	Moteur à combustion interne adapté, véhicule gaz naturel

2.1.5. Le Biohydrogène

Le biohydrogène est constitué d'hydrogène obtenu à partir de biomasse. C'est une source d'énergie présentant un contenu énergétique élevé par unité de masse. Bien que le biohydrogène puisse être produit selon de nombreuses méthodes, la voie thermochimique par gazéification de la biomasse sera uniquement considérée dans cette étude car il constitue actuellement le procédé le mieux développé et le plus économique pour la production d'hydrogène à partir de sources renouvelables. Le gaz de synthèse subit la réaction du gaz à l'eau (« *Water Gas shift* »). Cette réaction chimique permet de convertir un mélange de monoxyde de carbone et de vapeur d'eau en un mélange de dioxyde de carbone et d'hydrogène. Le dioxyde de carbone est ensuite enlevé pour ne laisser que du biohydrogène (Hamelinck, 2004).

Tableau 7 : Caractéristiques physico-chimiques du biohydrogène. (Source: IEA/OECD 2008, JEC 2007)

Formule chimique	H ₂
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/L)	1,92
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/Kg)	120
Densité (kg/L)	0,016 ⁵
Productivité (L _{carb} /kg MS)	6,19
Nombre Cétane	/
Nombre octane	<88
Type de moteur	Moteur à combustion interne et piles à combustibles

2.2. La voie biochimique

La voie biochimique se base sur la fermentation de la biomasse. Trois types de fermentations existent : la fermentation éthanolique (produisant de l'éthanol), la fermentation méthanique (produisant du biogaz) et la fermentation acétonobutylique (produisant du butanol). Le procédé biochimique comporte trois grandes étapes : le prétraitement, l'hydrolyse enzymatique et la fermentation (IEA, 2008).

4 Densité du biométhane à 20°C

5 Densité de l'hydrogène à 20°C

2.2.1. Ethanol cellulosique

L'éthanol cellulosique est chimiquement identique à la première génération de bioéthanol. Il est cependant produit à partir de matières premières lignocellulosiques via un processus un peu plus complexe : l'hydrolyse cellulosique (EBTP, 2009). La lignocellulose composée d'hémicellulose, de cellulose et de lignine, forme un réseau très complexe et difficile à détruire. Un prétraitement est requis pour rompre les liens solides au sein de la lignocellulose et rendre la cellulose et les hémicelluloses, sources potentielles de sucres fermentescibles, hydrolysables. Le prétraitement peut être physique, physico-chimique ou chimique (Tableau 8). Une fois la cellulose et l'hémicellulose de la biomasse lignocellulosique extraite, ces composés sont ensuite transformés en sucres par hydrolyse enzymatique. La cellulose ne peut pas être hydrolysée par des enzymes conventionnelles et implique l'utilisation d'enzymes de type *cellulase* spécifiques produites à partir de microorganismes.

Tableau 8 : 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 ⁶
	Explosion au CO ₂
Procédés chimiques	Prétraitement à l'acide dilué
	Prétraitement alcalin
	Procédé Organosolv ⁷
	Oxydation chimique
	Oxydation biologique

Le glucose issu de l'hydrolyse de la cellulose est fermenté de la même manière que le glucose issu de l'amidon, sous l'action de levures ou de bactéries (IEA/OECD, 2008). 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. Finalement, l'éthanol est purifié par distillation et déshydratation.

⁶ Ammonia Fiber EXplosion, ou explosion en présence d'ammoniac

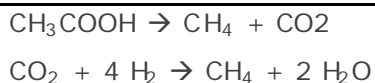
⁷ Utilisation d'un solvant organique (éthanol ou méthanol)

Tableau 9 : Caractéristiques physico-chimiques de l'éthanol cellulosique (Source: IEA/OECD 2008, JEC 2007)

Formule chimique	CH ₃ CH ₂ OH
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/L)	21,06
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/Kg)	26,7
Densité (kg/L)	0,794
Productivité (L _{carb} /kg MS)	8
Nombre Cétane	>100
Nombre octane	0,40-0,45
Type de moteur	Essence

2.2.2. Le biogaz

Le biogaz est le produit de la fermentation de matières organiques animales ou végétales riches en sucres par des bactéries méthanogènes anaérobies (absence d'oxygène). Les boues de station d'épuration, les effluents d'élevage et des industries agroalimentaires ainsi que les déchets ménagers constituent les principaux substrats. La production de biométhane se fait par la digestion anaérobie ou méthanisation. C'est un processus au cours duquel la matière organique est dégradée par des microorganismes et convertie en méthane et en dioxyde de carbone. (Biogasmax, 2010). La biomasse subit premièrement un prétraitement afin d'améliorer sa biodégradabilité. 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 (CH₄) par les bactéries méthanogènes suivant les réactions suivantes :



Le Tableau 10 présente la composition moyenne du biogaz produit. Pour être utilisé comme biocarburant ou injecté dans le réseau de gaz naturel, le biogaz obtenu doit être purifié pour enlever les polluants tels que H₂S et le CO₂, les poussières et autres particules. On obtient alors du biométhane, gaz dont la concentration en méthane est fortement augmentée (~98%) (Biogasmax, 2010).

Tableau 10 : Composition moyenne du biogaz (AEBIOM 2009)

Gaz	% Volume
CH ₄	55 - 75
CO ₂	25 - 45
H ₂ S	0 - 1.5
NH ₃	0.05

Tableau 11 : Caractéristiques physico-chimiques du biométhane

Formule chimique	CH ₄ ⁸
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/L)	6,5
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/Kg)	48,5
Densité (kg/L)	0,135 ⁹
Productivité (L _{carb} /kg MS)	/
Nombre Cétane	130
Type de moteur	Moteur CNG

Enfin, pour être utilisé comme carburant, le biométhane doit être comprimé entre 200 et 250 bars. Certains pays européens ont développés des standards nationaux spécifiant la qualité requise du biométhane pour son utilisation comme carburant routier. Les principaux paramètres de ces standards sont repris dans le Tableau 12¹⁰. 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 (Persson, Wellinger, 2006).

Tableau 12 : Réglementations nationales pour le biométhane (Bruijstens et al, 2008)

Pays	Suisse	Allemagne	Suède	France
Norme/réglementation		G262	SS 15 54 38	2004
CH ₄ [%]	>96		>97	
CO ₂ [%]	<6	<6	<3	<2
H ₂ [%]	<5		<0.5	
O ₂ [%]	<0.5	<3	<1	
H ₂ S [mg/Nm ³]	<5		<23	
HHV [MJ/Nm ³]				H: 38.5 -46.1 L: 34.2 – 37.8
Wobbe (supérieur) [MJ/Nm ³]		H: 46.1 – 56.5 L: 37.8 -46.8		H: 48.8 – 56.5 L: 42.5 – 46.8
Wobbe (inférieur) [MJ/Nm ³]			43.9 – 47.3	

2.2.3. Le bio-butanol

Le bio-butanol est un alcool produit par fermentation acétonobutylique des sucres provenant de la biomasse. Cette fermentation, connue sous le nom de « ABE » (acétone, butanol, éthanol), utilise la bactérie « *Clostridium acetobutylicum* ». Suite à la conversion

8Le biogaz en tant que carburant contient principalement du méthane. Les caractéristiques du biogaz sont donc considérées comme identiques à celles du biométhane

9 Densité du biométhane à 20°C

10 L'index de Wobbes est défini comme le rapport entre le pouvoir calorifique et la densité relative (= densité gaz/densité air) 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

anaérobie des hydrates de carbone de la biomasse, trois sous-produits sont obtenus: l'acétone, le butanol et l'éthanol (Butamax, 2010). La fermentation « ABE » génère aussi d'autres produits : acides acétique, lactique et propionique, acétone, isopropanol, éthanol, et du dihydrogène. 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. Après l'étape de fermentation, le produit obtenu est purifié pour donner du bio-butanol. Les réactions représentées ci-dessous illustrent le processus de fermentation acétonobutylique. Le bio-butanol possède des propriétés physiques avantageuses par rapport à l'éthanol telles qu'un pouvoir calorifique supérieur, une bonne stabilité en mélange à l'essence ou une pression de vapeur plus faible.

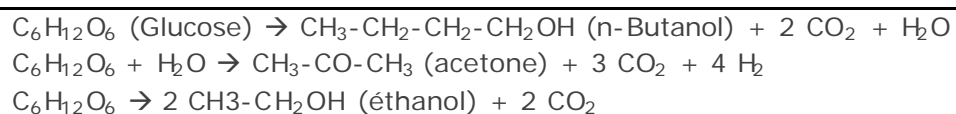


Tableau 13: Caractéristiques physico-chimiques du biobutanol. (Source: Butamax 2010)

Formule chimique	C_3H_7OH
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/L)	29,2
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/Kg)	33,4
Densité (kg/L)	0,81
Nombre Cétane	/
Nombre octane	/
Type de moteur	Essence

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. Dès lors, des ressources plus fibreuses telles que la rafle et les fibres de maïs et les DDGS (distillers dried grains and solubles) fibreux sont testées pour la production du bio-butanol. Les résidus agricoles fibreux nécessitent toutefois un prétraitement et une hydrolyse pour obtenir des sucres simples (Ezeji, Qureshi, Blaschnek, 2007). La Figure 16 présente les différents substrats et produits issus de la fermentation acétonobutylique par *Clostridium*. Le butanol peut être utilisé comme carburant en mélange avec l'essence jusqu'à 15% en volume sans adaptation du moteur. Il peut également être utilisé en mélange avec l'éthanol et l'essence voire même le diesel (Butalco, 2010).

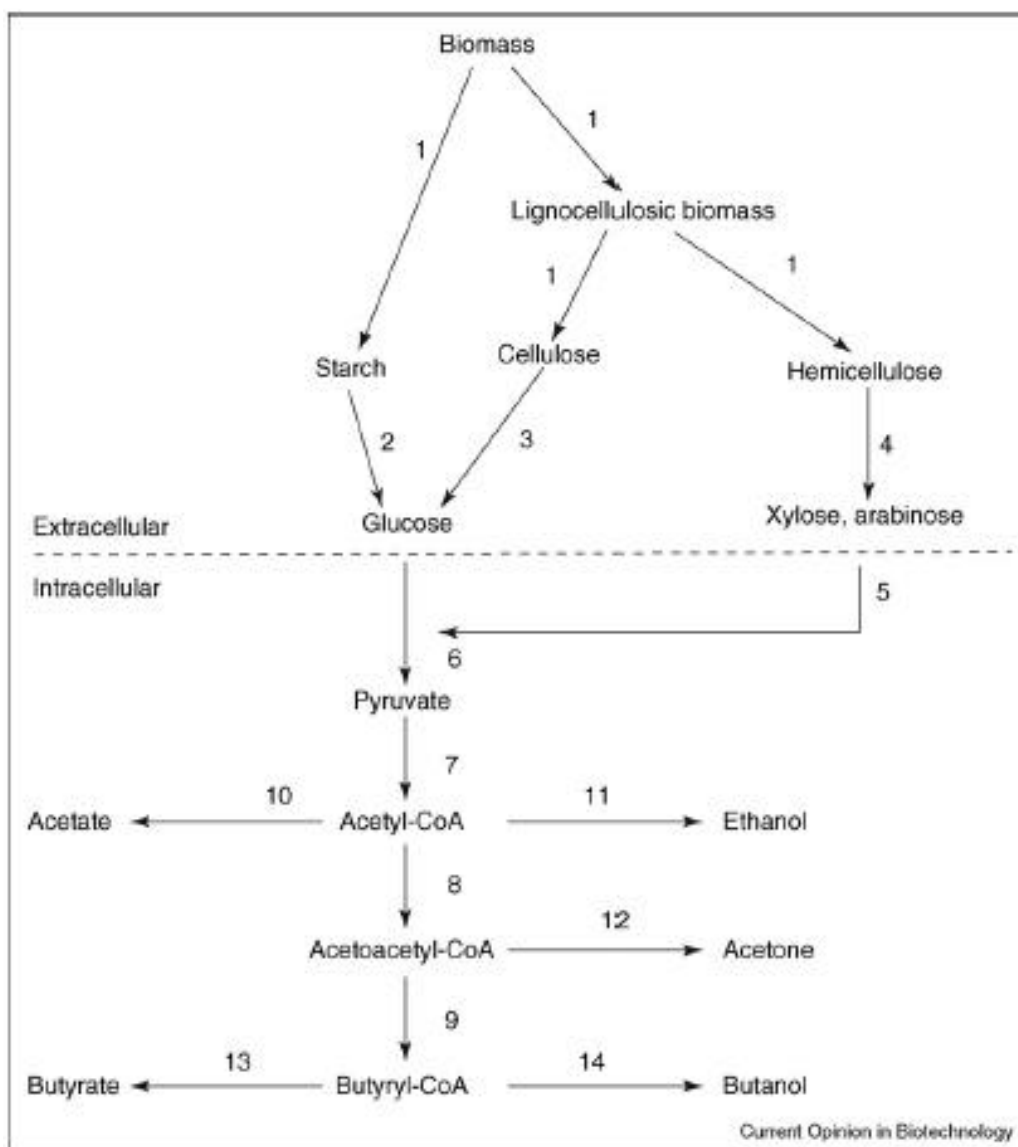


Figure 2 : Schéma simplifié du métabolisme de la biomasse par les clostridies solvantogènes (Ezeji, Qureshi, Blaschnek, 2007)

2.3. Autres procédés de production de biocarburants

2.3.1. Le jatropha

Les procédés de production de biodiesel à partir de jatropha se basent généralement sur la transestérification de l'huile végétale provenant de ces cultures. Cette étape consiste à mettre en présence de l'huile végétale et un alcool (méthanol ou de l'éthanol par exemple) pour obtenir des esters d'huile végétale. Les graines du jatropha, riches en huile (30% en poids), donnent un produit de très haute qualité que l'on peut utiliser comme carburant dans des moteurs diesels (Achten W.M.J, 2008). Les graines de jatropha doivent être séchées. Ensuite l'huile contenue dans ces graines est extraite, soit mécaniquement, soit chimiquement. Après cette étape d'extraction, l'huile peut être utilisée directement dans des moteurs adaptés, ou être transformé en biodiesel, par

étape de transestérification au méthanol ou à l'éthanol, utilisable par des moteurs diesels à haute performance. Lorsque l'huile est directement utilisée, elle possède une viscosité plus élevée que le diesel ce qui peut poser certains problèmes au niveau du moteur. Il est donc préférable que l'huile subisse une transestérification pour avoir des propriétés similaires au diesel, et être, de cette manière utilisable dans des moteurs standards (IEA/OECD 2008). Sans traitement, le tourteau qui reste après l'extraction de l'huile est trop toxique pour avoir des débouchés dans l'alimentation animale mais il constitue un engrais organique riche en azote (GEXSI-, 2008).

Tableau 14: Caractéristiques physico-chimiques de l'huile de jatropha. (Source: FNR 2010)

Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/kg)	36,8
Viscosité	34
Densité (Kg/dm ³)	0,92
Nombre Cétane	46
Nombre octane	/
Type de moteur	Diesel
Productivité (L de biocarburant/ kg de MS)	0,24

2.3.2. Les algues

Ressource en biomasse importante, les algues pourraient permettre la production de biocarburants de plusieurs manières :

- Par la production d'huile via des microalgues
- Par gazéification
- Par pyrolyse
- Par fermentation alcoolique
- Par méthanisation, procédé plus particulièrement adapté aux macroalgues

Les algues sont des organismes autotrophes photosynthétiques dont le cycle de vie se déroule dans le milieu aquatique. On les retrouve dans des écosystèmes d'eau douce, saumâtre et marine. Certaines espèces peuvent aussi être hétérotrophes. Ainsi, au besoin, elles sont capables de puiser de l'énergie et des nutriments directement des matières organiques présentes dans le milieu aquatique. L'appellation « algues » regroupe des organismes d'origine évolutive très différentes. On distingue classiquement :

- Les *macroalgues* qui sont multicellulaires qui regroupent les espèces appartenant aux classes :
 - Chlorophyceae (algues vertes)
 - Rhodophyceae (algues rouges)
 - Phaeophyceae (algues brunes).
- Les *microalgues* qui sont unicellulaires. Les 4 classes de microalgues les plus importantes en fonction de leur abondance sont :

- Bacillariophyceae (Diatomées)
- Chlorophyceae (algues vertes)
- Chrysophyceae (algues dorées)
- Cyanophyceae (algues bleues) (vérifier)

Aujourd'hui la **culture de macroalgues** en pleine mer en condition offshore et en grande quantité n'est pas maîtrisée. Cette culture présente des problèmes scientifiques et technologiques qui nécessitent de la recherche et du développement afin qu'elle soit économiquement viable et durable. Il s'agit notamment de développer les connaissances sur la physiologie des macroalgues (croissance, reproduction...) et le développement des technologies de culture et de récolte offshores. La faisabilité technico-économique de ce mode de culture doit également être étudiée.

Il existe trois **modes de culture pour les microalgues** :

➤ Bassins ouverts

Le système de production le plus ancien est celui de bassins à ciel ouvert dit en «bassin ouvert», inspiré des conditions naturelles de développement des microalgues. Ce sont des bassins de plusieurs milliers de m³. La plus grande productivité est obtenue avec des bassins de type «raceway» (ou «champ de course») qui se présentent comme des bassins peu profonds (quelques dizaines de cm), formant des boucles étroitement imbriquées les unes contre les autres et ayant globalement une forme très allongée (Figure 3). Le milieu de culture est brassé mécaniquement grâce à des roues à aubes. Les bassins sont toujours munis d'une chicane médiane. Deux branchements au bassin assurent l'arrivée du milieu de culture frais et le prélèvement de la récolte. 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, mais le transfert du CO₂ dans la phase liquide est souvent médiocre compte tenu de la faible profondeur des bassins. Si ces bassins ont un coût de construction faible et sont simples d'un point de vue technologique, ils présentent toutefois certains inconvénients. Les densités cellulaires obtenues restent faibles et les coûts de récolte de la biomasse diluée se révèlent importants. D'autre part, les cultures en système ouvert sont sujettes à des contaminations par d'autres algues ou par des bactéries marines souvent indésirables.



Figure 3 : Bassins ouverts de type raceway de la société SAPHIRE Energy, Las Cruces, Nouveau Mexique, Etats-Unis.

➤ *Photobioréacteurs*

Un photobioréacteur (PBR) peut être défini comme un système clos à l'intérieur duquel se déroulent, en présence d'énergie lumineuse, des interactions biologiques que l'on cherche à contrôler en maîtrisant les conditions de culture. En son sein, une réaction biochimique de photosynthèse a lieu dans le but de produire de la biomasse végétale à partir de microalgues, de CO₂ et de lumière. La notion de photobioréacteur date déjà de quelques décennies. Les premiers systèmes clos sont apparus à la fin des années 40, mais faute de moyens techniques leur développement a été interrompu et les cultures ont continué à être réalisées en bassins rudimentaires. Dans les années 80, les recherches ont repris activement et de nombreux photobioréacteurs ont été réalisés et expérimentés avec des formes géométriques diverses.



Figure 4 - Photobioréacteurs tubulaires

Le principe du fonctionnement des photobioréacteurs est le suivant : au sein d'une enceinte confinée transparente, le bioréacteur, des microorganismes photosynthétiques sont cultivés, dans des conditions contrôlées, à l'aide des substrats nécessaires à leur croissance et d'un apport d'énergie lumineuse. Les interactions biologiques ayant lieu en milieu fermé, il est indispensable de maîtriser les conditions de culture appliquées dans le photobioréacteur. Il faut en particulier gérer l'accès aux nutriments et le processus d'homogénéisation du milieu, et effectuer un suivi de la température et du pH.

Le développement de photobioréacteurs fait encore l'objet de nombreux programmes de recherche et constitue encore aujourd'hui un défi technologique. L'une des principales difficultés rencontrées pour les photobioréacteurs de grandes dimensions est l'apport suffisant de lumière au niveau de chaque cellule microalgale au sein de la culture. En effet, l'intensité de la lumière pénétrant dans une culture cellulaire décroît rapidement dès lors que l'on s'éloigne de la périphérie du réacteur. Ce phénomène est d'autant plus marqué que la densité cellulaire est forte. Ainsi, les cellules situées au centre du réacteur ne reçoivent plus suffisamment de lumière pour leur croissance. Pour résoudre ce problème, le bioréacteur doit présenter une grande surface spécifique de transfert de l'énergie lumineuse, c'est-à-dire un rapport surface/volume important. Cela a été obtenu en concevant des photobioréacteurs tubulaires ou plans, constitués, respectivement, de longs tubes ou de parallélépipèdes rectangles de faible épaisseur, dans lesquels circule la culture de microalgues. Les photobioréacteurs peuvent être solaires ou artificiels. Différents matériaux ont également été testés. Si la lumière solaire est moins coûteuse que la lumière artificielle, elle possède l'inconvénient d'être soumise à une forte variabilité d'intensité en fonction des heures de la journée et des saisons.

Remarque : le système mixte

Une combinaison des 2 systèmes précédents peut être utilisée. La production des microalgues est d'abord réalisée en photobioréacteur puis le milieu est déversé dans un bassin où la culture est réalisée (Huntley et al. 2006). L'hybridation de ces 2 techniques complémentaires peut permettre de maximiser les points forts de leurs éléments constitutifs tout en leur permettant de palier mutuellement à leurs faiblesses

➤ *Culture hétérotrophe*

Ici l'énergie n'est plus fournie par la lumière mais par un substrat carboné, de type sucre (ex: recyclage de déchets et sous-produits de sucreries). Ce type de culture se rapproche de la fermentation (la culture se réalise en mode fermé dans des bioréacteurs semblables à des fermenteurs), et ne nécessite pas d'utiliser des espèces de microalgues particulières. Les niveaux élevés de productivité enregistrés sont prometteurs pour la production de biocarburants (Xu and al, 2006). En Europe, seule la société française Fermentalg, semble maîtriser cette approche des microalgues. Aux Etats-Unis, plusieurs sociétés sont actives dans ce créneau. L'exemple le plus symbolique semble être celui de Solazyme : elle dispose de près de 76 millions de dollars de financement, est épaulé par le pétrolier Chevron et travaille pour l'US Navy. Martek Biosciences, alliée au groupe pétrolier BP, est une autre société active dans la fermentation.

Une comparaison technico-économique des différents systèmes de cultures est réalisée dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Comparaison des caractéristiques des principaux systèmes utilisés pour la culture des microalgues (d'après *Algae for Biofuel Production: Process Description, Life Cycle Assessment and Costs* – Pierpaolo Cazzola, IEA Secretariat, Paris, IEA Bioenergy Ex)

Bassins ouverts	Photobioréacteurs
Démonstré à grande échelle, mais pas réellement à l'échelle commerciale	Développé à l'échelle laboratoire/pilote, mais pas encore de changement d'échelle
Coût plus faible (entre 120 000 et 350 000\$/ha)*	Coût plus élevé (de 200 000 à plus de 1 million \$/ha)*
Sujet à contamination par des souches prédatrices	Permet la culture d'espèces uniques
Sujet à la perte d'eau par évaporation	La perte d'eau est contrôlée
La température est difficilement contrôlable avec les alternances jour/nuit et les variations saisonnières	Peut être mieux contrôlé mais cela nécessite de plus grandes quantités d'énergie pour mélanger et maintenir la température
Les solutions obtenues sont faiblement concentrées en biomasse(en moyenne <1g/l)*	Peut générer des solutions en biomasse algale plus concentrées (entre 1.5 et 5g/l)*
Productivité annuelle moyenne : 10 à 20 g/m ² /jour*	Productivité annuelle moyenne : 15 à 40 g/m ² /jour (mais rarement au-delà de 20 g/m ² /jour actuellement)*
Nécessite de grandes quantités de nutriments	La distribution des nutriments est plus facile et plus efficace

* Production de biocarburants à partir de microalgues, Whitwham M., Présentation du 22 décembre 2010.

La littérature accessible ne semble pas montrer que les rendements en biomasse algale soient meilleurs avec les photobioréacteurs qu'avec les bassins ouverts. La productivité en biomasse algale semble se situer autour de 20g/m²/jour pour des périodes de production qui s'inscrivent sur de longues périodes.

La culture en bassins ouverts est la technique la plus ancienne, la plus simple et la moins dispendieuse. Elle dépend de l'énergie solaire et elle permet, en théorie du moins, d'atteindre plus facilement la rentabilité. Les problèmes possibles à prévoir sont les variations de température et d'ensoleillement, la contamination des cultures par d'autres espèces, l'évaporation rapide de l'eau des bassins et le contrôle des paramètres physicochimiques. Il faut optimiser l'ensoleillement en dosant la circulation et la profondeur des bassins afin d'exposer les microalgues de manière à diminuer leur photoinhibition et la photosaturation. Idéalement, on recherche de grandes étendues de territoires plats, en zones relativement chaudes et peu dispendieuses situées près de grandes agglomérations comportant idéalement des sources de CO₂ voisines. Le défi de trouver de vastes territoires propices et abordables situés à proximité de grands centres peut représenter un obstacle majeur. Pour les cultures autotrophes appliquées en bassins ouverts le plus grand problème est l'envahissement des bassins par des espèces peu productives en lipides. Les souches de microalgues à faible taux lipidiques sont problématiques. Elles croissent plus rapidement que les autres par le fait que la production de lipides demande plus d'énergie. Cette demande d'énergie ralentit d'autant la croissance des souches favorisées pour leurs hauts taux lipidiques. Ce fait explique le développement d'approches mixtes (bassins et PBR) où l'essentiel de la croissance et de l'alimentation s'effectue dans la zone protégée du PBR.

Les photobioréacteurs permettent d'optimiser la productivité de biomasse algale. Cette approche vise particulièrement à favoriser l'exposition optimale des microalgues à la lumière solaire et à minimiser les pertes causées par les phénomènes de photoinhibition et de photosaturation tout en maximisant l'assimilation du CO₂ et d'autres nutriments. Cette approche offre la possibilité de mieux contrôler tous les paramètres du milieu de culture avec une meilleure protection contre les mauvaises conditions climatiques et les sources de contamination. Toutefois, ces technologies sont sujettes aux problèmes

engendrés par les coûts élevés de construction, le réchauffement de l'eau et le besoin de contrôler de nombreux paramètres comme le pH et l'augmentation rapide du taux d'oxygène. De plus, l'entretien des installations est un facteur majeur pour les coûts de revient, car les effets de la dégradation et de l'altération des surfaces transparentes sont mal connus. Les phénomènes de salissage, d'abrasion et d'oxydation sont dispendieux à contrôler et ils affectent directement la productivité des projets.

Les procédés de **conversion** généralement considérés pour les **macroalgues** sont la *méthanisation* et la *fermentation alcoolique*. La méthanisation de macroalgues a déjà été démontrée comme techniquement viable. Des recherches restent encore à être menées notamment avec des enjeux de recherche forts sur le prétraitement, la levée des inhibitions, l'optimisation des rendements et la co-digestion avec d'autres substrats. La fermentation alcoolique apparaît à l'heure actuelle comme plus difficile en raison de la composition en sucres fermentescibles des macroalgues qui en moyenne n'est que de 26%. Cette composition varie bien sûr selon l'espèce, la saison et d'autres facteurs.

La **transformation des microalgues** se fait par pyrolyse, gazéification ou par extraction d'huile. Le rendement moyen en huile utilisable pour réaliser la production de biodiesel se situe entre 20 et 50% du poids sec des algues. Des rendements en huile de 90% peuvent être atteints pour certaines espèces algues et dans des conditions de culture particulières, mais les hauts rendements en lipides sont généralement associés à de faibles taux de croissance algale: l'élément important est donc la productivité globale en huile. En prenant comme hypothèse une productivité moyenne d'algues de 20g/m²/jour à 20% d'huile (poids sec), on obtient une productivité en huile de 20000 l d'huile/ha/an ce qui représente environ 4 fois les meilleurs rendements des cultures de première génération utilisées pour la production de biocarburant (ex l'huile de palme du Sud Est de l'Asie) (voir Tableau 16). Les microalgues ont une productivité surfacique en biomasse et huile largement supérieure à celle des plantes cultivées.

Tableau 16 : Comparaison de la productivité en huile des microalgues et de différentes espèces végétales.

Espèces	Productivité en huile (l/ha/an)
Algues	15000-20000
Palme	5950
Noix de coco	2689
Jatropha	1892
Colza	1400
Tournesol	952
Soja	446
Maïs	172

2.4. Tableau synthétique



Afin d'avoir une vue synthétique des biocarburants non conventionnels et de leur caractéristique, un tableau récapitulatif a été réalisé. Celui-ci met en avant les avantages et points faibles de chaque filière. Pour faciliter la compréhension et la visualisation des données, une échelle de graduation a été appliquée : plus il y a de signes positifs '+', plus la caractéristique considérée est avantageuse dans le cas de la filière correspondante et inversement pour les signes -. Lorsque cette graduation n'était pas possible, l'explication est indiquée par écrit. Une case est verte signifie que le point considéré représente un réel avantage pour la filière et le cas inverse pour les cases rouges.

Tableau 17: Tableau synthétique des caractéristiques des biocarburants non conventionnels

	FT diesel	Biométhanol	Bio-DME	BioSNG	Biogaz	Ethanol cellulosique	Biobutanol	Biohydrogène	Jatropha	Algues
Propriétés physiques										
PCI (MJ/L)	+++	--	-	--	--	+	+++	--	+++	+++
Densité	+	+	+	--	--	+	+	--	++	-
Etat physique	Liquide	Liquide	Gazeux	Gazeux	Gazeux	Liquide	Liquide	Gazeux	Liquide	Liquide
Potentiel de réduction des émissions GES										
Bilan CO ₂ éq	+++	+++	+++	++	+++	++	+	+++	+	+
Efficacité énergétique										
Balance NRJ	++	+++	+++	+++	+++	+	+	+++	+	++
Infrastructures										
Mélange avec Carb. Conv.	+++	++	-	--	--	++	++	--	Oui	+++
Infrastructures additionnelles	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non
Véhicule adapté nécessaire	Non	Possible	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non
Compatibilité avec le matériel										
Corrosion	+	-	-	+	+	-	+	+	+	+
Lubrilité	+		-	+	+	+				
Economie										
Coûts de production	-	+	+	-	-	-	-	+	-	--

+++ = Fortement avantageux
 ++ = avantageux
 + := avantage limité

--- = Fortement désavantageux
 -- = désavantageux
 - = désavantage limité

 : Principale opportunité
 : Principale menace

III. ETAT D'AVANCEMENT DES FILIERES ET PERSPECTIVES EN BELGIQUE

3.1. Le Diesel Fischer-tropsch

L'industrie Choren, opérationnelle depuis l'été 2010, est la première usine de production de FT-Diesel (également appelé BtL) dans le monde. Choren est une usine de gazéification allemande, fondée en 1990. L'industrie Choren bénéficie de la coopération de grandes sociétés comme DaimlerChrysler A.G, Shell et Volkswagen A.G et d'un soutien politique allemand grâce à l'exemption de taxe. Son usine Beta (Figure 5), située à Freiberg, est actuellement à l'état semi-industriel, produisant 45 MWh thermique et 18 million de litres de fuel par an à partir de cultures TCR et de résidus ligneux, soit environ 29,2 ktep. Cette usine est actuellement en phase de test, testant des matières premières différentes. Les coûts d'investissement de cette usine se situent généralement entre 100 et 150 millions d'euros.



Figure 5 : Usine BtL Choren en Allemagne (Vogels, 2010)

Choren vise à augmenter progressivement la capacité de production de l'usine ("upscaling"). Un projet est en préparation pour construire une usine commerciale d'une capacité annuelle de 200 000 tonnes de BtL (260 millions de litres) et dont les coûts sont estimés à environ 1 milliard d'euros. La capacité de gazéification s'élèvera à 640 MWth. La demande en biomasse est estimée à 1 million de tonnes sèches par an. La construction de cette usine génèrera jusqu'à 800 emplois dans un premier temps. L'opérationnalité de cette usine commerciale est prévue pour 2015.

Un autre projet - BioTFuel – est porté par un consortium réunissant SOFIPROTEOL, le CEA, l'IFP, Axens, Total et un partenaire gazéifieur. Le projet ambitionne de mettre au point une licence de procédés pour une valorisation par voie thermo-chimique de biomasse d'origine lignocellulosique et de charges fossiles pour l'obtention de biocarburant de type biogazole et biokérozène. Le procédé prendra en compte l'ensemble

de la chaîne de gazéification de la biomasse: préparation et trituration de la biomasse, torréfaction, gazéification, train d'épuration des gaz, synthèse Fisher Tropsch (FT).

Si des usines de production de BTL venaient à voir le jour d'ici 2020 en Belgique, elles seraient probablement de taille moyenne, c'est-à-dire 45-50 MWth. Généralement, ce type d'usine permet une implémentation plus aisée suite à une logistique simplifiée et à une meilleure efficacité énergétique totale car elles peuvent s'intégrer au sein d'autres usines comme des raffineries ou des usines à papier. Cependant, elles doivent faire face à des problèmes techniques plus importants, des coûts spécifiques plus élevés et à un rendement en biocarburants plus faible (RENEW, 2008). Une usine de 45 MWth, du même type que l'usine pilote « beta » de Choren pourrait produire environ 15 000 tonnes (soit 15,714 ktep) de biodiesel, ce qui représenterait 0,2% de la consommation finale belge en diesel en 2007¹¹. Les usines doivent être construites dans des régions où le potentiel en biomasse est élevé pour diminuer les distances et les coûts de transport et ainsi limiter l'impact environnemental. En émettant l'hypothèse que toutes les ressources en biomasse potentiellement disponibles en Belgique soient rassemblées, celles-ci permettraient de couvrir les besoins d'une usine de 45MWth, puisque elles peuvent atteindre environ 360 ktep¹². Cependant, celles-ci étant utilisées le plus souvent pour la production de chaleur et d'électricité, des apports extérieurs de biomasse seraient donc certainement demandés. Ces importations nécessiteront donc la mise en place d'une logistique importante et adaptée et engendrera des coûts supplémentaires à la production de biocarburants. De plus, pour des raisons technico-économiques, il est peut-être plus avantageux, dans le cas de la Belgique, de vendre directement le produit FT brut, sans traitement, à des raffineries qui pourront ensuite le transformer en biocarburant. En effet, l'intégration avec une raffinerie existante pourrait permettre de diminuer les dépenses et de bénéficier de synergies entre les deux usines d'un point de vue opérationnel et organisationnel (RENEW, 2008)

A l'heure actuelle, le coût de production de BTL est encore bien plus onéreux que celui des carburants fossiles. Le projet RENEW estime les coûts de production de BTL pour trois scénarios : un scénario de référence SP1 (2000-2004), un scénario maximisant la production de bioarburants en 2020 S1 et un scénario supposant une production de biocarburant autosuffisante en 2020 (S2). L'étude prend en compte différents concepts de production, différentes matières premières et différentes régions européennes. Dans le Tableau 18, les coûts de biomasse et de production sont estimés par le projet RENEW pour différents concepts de production :

- cEF-D : *Central Entrained Flow* - Produit final = FT –diesel
- dEF-D : *Decentral Entrained Flow* - Produit final = FT –diesel
- CFB-D : *Circulating Fluidized Bed* - Produit final = produit FT brut
- ICFB-D : *Internally Circulating Fluidized Bed* - Produit final = produit FT brut

11 Comme indiqué plus haut, la consommation finale en diesel en 2007 représentait 6792 ktonnes. Le biodiesel produit représenterait donc : $(15/6792)*100=0.2\%$.

12 Ce chiffre a été obtenu en faisant la somme des disponibilités potentielles des résidus forestiers et des cultures énergétiques à des fins énergétiques, présentées précédemment : $(210+137+12,6)=359,6$ ktep

Tableau 18 - Cout de production de BTL pour différents concepts de production (technologie SP, SP et S1 cout de biomasse)

	cEF-D	dEF-D	CFB-D	ICFB-D
SCENARIO SP				
Cout de la biomasse - alternative la plus favorable pour une région Européenne donnée [EUR/GJ]				
<i>Saule</i>	7.8 (SUD)	-	7.8 (SUD)	7.0 (OUEST)
<i>Paille</i>	4.5 (OUEST)	4.4 (OUEST)	4.5 (OUEST)	-
<i>Miscanthus</i>	-	-	-	7.0 (OUEST)
Cout de production total [EUR/GJ]				
<i>Saule</i>	34.0	-	52.4	62.5
<i>Paille</i>	24.6	39.8	39.3	-
<i>Miscanthus</i>	-	-	-	63.2
SCENARIO S1				
Cout de la biomasse - alternative la plus favorable pour une région Européenne donnée [EUR/GJ]				
<i>Saule</i>	5.1 (OUEST)	-	5.1 (OUEST)	4.5 (OUEST)
<i>Paille</i>	5.0 (OUEST)	5.1 (OUEST)	5.0 (OUEST)	-
<i>Miscanthus</i>	-	-	-	7.0 (OUEST)
Cout de production total [EUR/GJ]				
<i>Saule</i>	26.5	-	41.2	30.0
<i>Paille</i>	26.0	42.3	41.5	-
<i>Miscanthus</i>	-	-	-	63.4

3.2. Le biométhanol

Les sociétés Nykomb Synergetics en Suède ainsi que SVZ et l'IEC (Institute for Energy Process, Engineering and Chemical Engineering) en Allemagne supportent d'importants projets d'unités de production de biométhanol (IFP, 2008). Aux Pays-Bas également, « Biomethanol Chemie Nederlands - BIOMCN », l'une des plus grandes entreprises au niveau mondial de biométhanol transforme la glycérine pure, obtenue lors de la synthèse de biodiesel, en biométhanol par un procédé industriel novateur. Après plusieurs années de construction, son usine est depuis la fin 2009 en phase de production et atteindra prochainement une capacité de 200 000 tonnes/an (BioMCN, 2010) Le développement du biométhanol est depuis longtemps ignoré suite à ses coûts élevés par rapport aux autres carburants et à sa faible densité énergétique. Les coûts de production du biométhanol s'élèvent entre 14 et 17 €/GJ (Hamelinck, 2004), c'est-à-dire entre 0,22 et 0,26 €/L (alors que le prix de l'essence se situe entre 0.13 et 0.19€/L¹³ sans taxes) et son contenu énergétique à environ 15 MJ/L. Selon Hamelinck, pour que le biométhanol soit compétitif par rapport à l'essence ou au diesel, il faudrait le produire à grande échelle, c'est-à-dire environ 2000 MWth. Cependant, cette taille de production requiert de grands volumes de biomasse. Pour un petit pays comme la Belgique, cela impliquerait des importations massives de biomasse. Ce transport sur de longues distances influencera le prix de celle-ci et donc le prix du biocarburant. En effet, les coûts de la matière première représentent environ 45 % des coûts totaux de production du biocarburant (Hamelinck, 2004). Le biométhanol peut également être produit à partir de glycérine, ce qui permet de contourner le problème de disponibilité et de transport de biomasse. Ceci est par exemple le cas de la société BioMCN. Toutefois, l'utilisation de la glycérine dans

13 Pour calculer le prix de l'essence, un prix entre 4 et 6 €/GJ a été considéré et un PCI de 32.18 MJ/L

l'industrie chimique, dans l'alimentation ou dans les produits cosmétiques semble actuellement plus avantageuse.

3.3. Le Bio-DME

La production mondiale de DME n'est actuellement que de 100 000 – 150 000 tonnes et utilise en majorité le gaz naturel comme matière première. Le DME est généralement utilisé dans les bombes aérosols, et est depuis peu envisagé comme carburant (Arcoumanis C. C. B., 2008). Plusieurs programmes de développement du bio-DME sont actuellement en cours. En Suède, les sociétés Chemrec et Volvo Transfer Technology ont mis en place un pilote de production de bio-DME à Piteå à partir de la liqueur noire (Figure 6). Une unité de démonstration est en préparation, celle-ci utilisera environ 20 tonnes de liqueur noire par jour pour une production quotidienne de quatre tonnes de bio-DME, destinés principalement aux poids lourds (Chemrec, 2010). Les coûts d'une telle usine sont estimés à 14 millions d'euros. Par ailleurs, un autre projet européen « Chrisgas » vise à recycler un ancien site de cogénération pour y installer une plateforme pilote de production de Bio-DME.

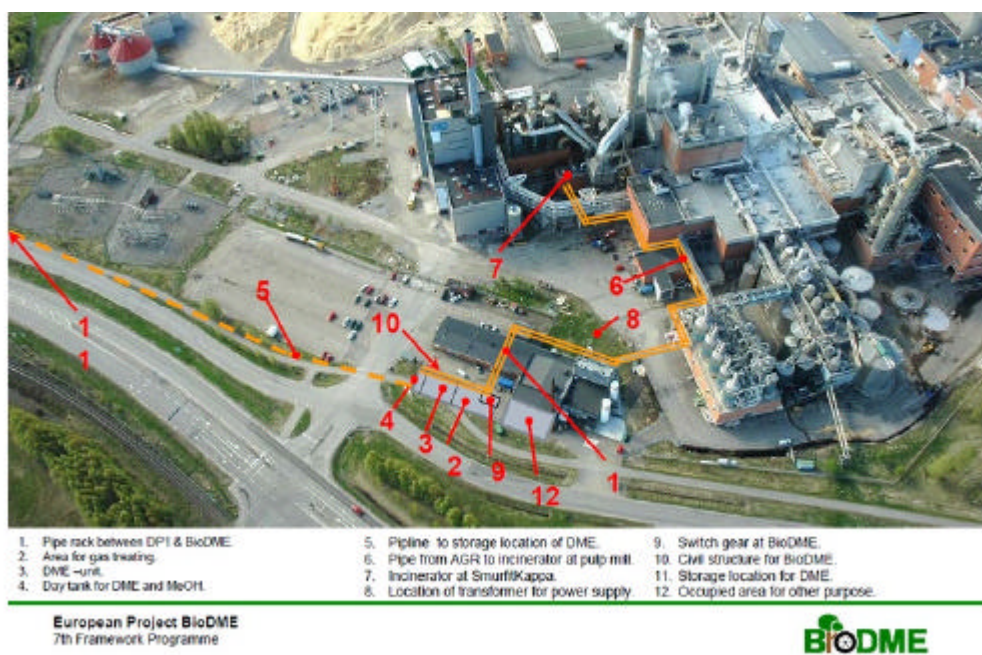


Figure 6 : Vue d'ensemble de la superficie du projet bio-DME - Source: www.bio-DME.eu

Etant donné que le DME possède des propriétés physiques similaires au LPG, les infrastructures actuelles de LPG pourront être utilisées pour sa distribution. Toutefois, la consommation de LPG en 2007 en Belgique atteignait seulement 63 ktep soit moins de 0,2% de la consommation énergétique finale (EUROSTAT, 2010). On dénombre 600 stations de distribution sur l'ensemble du territoire belge. Les véhicules roulant au LPG sont peu nombreux, selon les chiffres fournis par le Goca (société de contrôle technique et du permis de conduire) seulement 61 467 véhicules ont été recensés, soit 1,5% de l'ensemble des véhicules en Belgique. Les belges ne semblent donc pas opter actuellement pour des véhicules roulant au LPG alors que d'un point de vue économique

et écologique, ce carburant est plus intéressant que l'essence ou le diesel. Cela peut être dû à la nature gazeuse du LPG qui oblige à recourir à des réservoirs spéciaux pressurisés, à la capacité limitée de ces réservoirs (40L) ou encore à l'accès restreint des véhicules LPG au parking souterrains,... (FeBuPro, 2010). Le caractère gazeux du bio-DME représente donc un frein majeur à son développement. Suite au besoin de mettre en place des infrastructures de distributions et des véhicules adaptés pour l'utilisation du bio-DME, ce carburant pourrait être introduit dans un premier temps dans la flotte captive des poids lourds comme les bus publics ou les camions, et ensuite être progressivement introduit au sein des véhicules particuliers. Par exemple, dans le cadre d'un consortium impliquant l'Union européenne, l'Agence suédoise de l'énergie, des compagnies pétrolières, Volvo examine actuellement le bien-fondé d'un investissement à grande échelle dans le bioDME. Pour ce faire, Volvo compte mettre à disposition quatorze camions qui seront testés par différents clients sélectionnés dans quatre villes suédoises entre 2010 et 2012 (Volvo trucks, 2010). Ce genre d'exemple demande une coopération très étroite entre les producteurs de bioDME et l'industrie du transport et nécessitera du temps pour une telle mise en place en Belgique.

3.4. Le Biogaz

Actuellement, le biogaz (biométhane) est produit à petite échelle et est obtenu à partir de déchets organiques humides ou à partir de cultures agricoles comme le maïs. En Belgique, il est actuellement uniquement destiné à la production locale de chaleur et d'électricité. Le biogaz en tant que biocarburant est commercialisé dans certains pays européens. La Suède notamment, leader mondial au niveau de l'utilisation du biométhane dans le transport, possède déjà de nombreux véhicules (bus, taxis, voitures privées) et des pompes de remplissage à travers tout le pays. En France, dans la ville de Lille, une usine de production de biométhane a été mise en place en 1998. Cette usine produit environ 480 Nm³ par heure de biométhane et permet d'alimenter 100 bus et 10 camions poubelles.

En Belgique, il existe actuellement de nombreux producteurs de biogaz dans le secteur industriel, public ou encore agricole. Au niveau de la région wallonne, sur quatorze CET (Centre d'Enfouissement Technique), dix ont déjà les infrastructures pour valoriser les déchets en biogaz (SPAQuE, 2007). En Région wallonne, le potentiel du biogaz est encore largement sous exploité : 160 GWh électrique et thermique ont été valorisés contre 4100 GWh disponibles, soit moins de 4% du potentiel total en biogaz en Wallonie (CWaPE, 2009). Néanmoins, son introduction dans le réseau du gaz naturel n'est pas encore permise tout comme son utilisation en tant que carburant (CRA-W, 2007). Il existe peu de pompes de remplissage et de voiture CNG en Belgique. Selon SPF économie, on ne retrouve seulement que 149 voitures roulant au gaz naturel au total dans le pays. De nombreux véhicules CNG sont cependant disponibles sur le marché européen et les concessionnaires peuvent facilement introduire ces modèles sur le marché national. Les freins principaux au développement de ce type de biocarburant sont la nécessité de mettre en place de nouvelles infrastructures pour l'utilisation et la distribution de ce carburant ainsi que les coûts de production élevés (20 à 28€/GJ) dus à la nécessité d'épurer le biogaz (Ahman, 2010). Le processus d'épuration (pour atteindre la qualité du gaz naturel) est relativement coûteux et il n'existe pas encore de stations d'épuration en Belgique. La filière biogaz possède néanmoins, par rapport aux autres filières, l'avantage

de pouvoir utiliser les infrastructures existantes du gaz naturel. Le développement du gaz naturel dans les transports permettrait dès lors d'ouvrir le marché au biogaz carburant.

3.5. Le Gaz Naturel Synthétique – Bio-SNG

Le Bio-SNG est chimiquement identique au biométhane obtenu par digestion anaérobie de matières organiques humides (biogaz). Le bio-SNG est une des options intéressante en vue de produire du biométhane à plus grande échelle. En effet, la production de bio-SNG par gazéification de la biomasse ligneuse permet d'utiliser une plus large gamme de matière première.



Figure 7 - Phase 1 du projet GoBiGas (Burman, 2010)

En Suède, le projet « GoBiGas - Gothenburg Biomass Gasification », un projet de Göteborg Energi et E.ON, construit une usine de production de bio-SNG dans le port de Göteborg. Ce biométhane sera injecté dans le réseau gaz naturel et peut également être transporté par bateau et par train. Le projet se divise en deux phases. Une première phase vise à construire une usine de 20 MW produisant 160 GWh/an. Cette usine sera opérationnelle en 2012. La production de biométhane sera de 2000 Nm³/h ou 16 MNm³/an. La deuxième phase du projet consistera en la construction d'une usine de 80 MW produisant 640 GWh/an. Cette usine produira 8000 Nm³/h ou 64 MNm³/an de biométhane et sera opérationnelle après l'évaluation de la phase 1 du projet. L'échelle commerciale vise une usine de 100 MW produisant 80 MNm³/an ou 800 GWh/an. Le projet cofinancé par l'Agence Suédoise pour l'énergie (22 million d'euros). Les travaux sur le site débiteront en août 2010. Les permis environnementaux et de construction sont en cours d'obtention. Le planning d'implémentation du projet GoBiGas est détaillé dans la Figure 8.

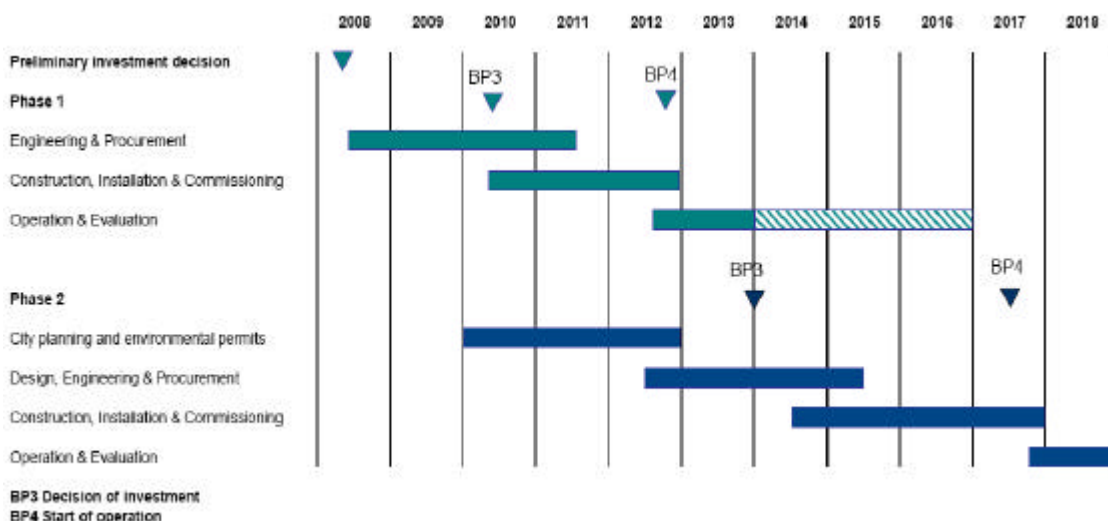


Figure 8 : Planning du projet GoBiGas (Burman, 2010)

En Autriche, une usine de démonstration (1MW) de la filière complète a été construite Güssing. L'usine produit 8 MW bio-SNG, 4,5 MWth et 2 MWe. La commercialisation des technologies employées est en préparation. Les usines de commercialisation seront de l'ordre de grandeur de 20 à 200 MW (EBTP, 2010).

Un avantage majeur du biométhane est la possibilité d'utiliser le réseau du gaz naturel pour sa distribution. La Belgique se situe à un carrefour stratégique en termes de transport de gaz naturel puisque plus de 50 % des réserves mondiales de gaz naturel se trouvent dans un rayon de 5000 km (aux Pays-Bas et aux Royaume-Unis par exemple). La Belgique possède un réseau très dense de pipelines d'environ 3.800 km de long (SPF Economie, 2010). De plus, elle dispose grâce au terminal méthanier de Zeebrugge, une porte d'accès au marché européen pour le gaz en provenance du monde entier ce qui représente par contre également un élément défavorable pour le développement du biométhane puisqu'il se verrait ouvert à une concurrence beaucoup plus forte.

Le développement de la filière biométhane carburant produit par fermentation des matières organiques, filière dont les technologies sont bien avancées, pourrait ouvrir et développer le marché dans un premier temps. Ensuite, sur le long terme le bio-SNG pourrait progressivement compléter cette ressource afin de pouvoir utiliser une plus large gamme de biomasse (Figure 9). De plus, les usines de bio-SNG ont une capacité de production plus importante que celle du biométhane (100MWth contre 10 MWth pour les usines de biométhane). L'intégration du bio-SNG au sein du réseau du gaz naturel n'est pas encore permise en Belgique (Figure 9).

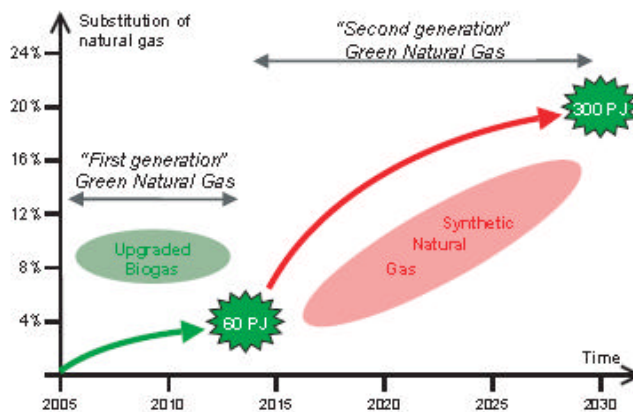


Figure 9 : Timing de l'implémentation du Bio-SNG aux Pays-Bas (ECN 2006)

Les coûts de production du SNG à partir de ressources ligneuses sont actuellement estimés à 20€/GJ, avec un coût de la biomasse de 4,5 €/GJ. Actuellement, cette filière n'est pas compétitive au niveau des coûts par rapport au gaz naturel, produit actuellement à environ 6 €/GJ. Avec une consommation en gaz naturel atteignant presque 30% de la consommation énergétique finale, la substitution du gaz naturel par un équivalent renouvelable semble être une option intéressante pour réduire significativement notre dépendance aux carburants fossiles et pour diminuer les émissions GES. Cependant même si des projets de démonstration existent actuellement en Europe, les technologies liées à une production intégrée de bio-SNG sont encore en phase de recherche et développement et certaines améliorations sont encore nécessaires pour assurer une implémentation efficace et pour permettre au SNG d'être compétitif en termes de coûts par rapport au gaz naturel.

3.6. Le biohydrogène

Actuellement, le gaz naturel sert à la fois de matière première et de source d'énergie pour la production de 95% de l'hydrogène. Une faible proportion seulement est destinée à la production d'énergie, l'hydrogène étant le plus souvent utilisé comme matière première dans l'industrie pétrochimique et chimique, en métallurgie... En Europe, de nombreux acteurs du secteur de l'énergie et des transports s'impliquent dans des projets de recherche et de démonstration pour la production d'hydrogène à partir de biomasse. On retrouve par exemple les projets « Hyvolution » et « Biohydrogen », étudiant différents types de procédés pour l'obtention de biohydrogène et son utilisation dans les voitures piles à combustibles (EBTP, 2010).

La Belgique et sa région frontalière, grâce aux quelque 800 km de conduites d'hydrogène souterraines, disposent d'un réseau de transport d'hydrogène important. Quelques véhicules hydrogènes ont été développés et une station hydrogène a été ouverte à Ruisbroek en 2008. Cette station distribue pour l'instant exclusivement de l'hydrogène liquide et uniquement pour une dizaine de véhicules BMW. L'hydrogène est stocké à -253°C dans un réservoir aérien d'une capacité de 17 600 litres. A l'avenir, l'extension à la distribution d'hydrogène gazeux est possible. Aujourd'hui il n'y a cependant pas d'infrastructure significative pour la distribution du biohydrogène et son stockage au sein du véhicule reste toujours problématique. Les véhicules adaptés, véhicules piles à

combustion (PAC), restent également coûteux et présentent un temps de vie relativement court. De plus, même avec une efficacité énergétique raisonnable, les coûts impliqués par la biomasse, ne permettent pas au biohydrogène d'être compétitif par rapport à l'essence. En effet, selon [Hamelinck] les coûts de production du biohydrogène s'élèvent entre 10 à 14 €/GJ contre 3 à 5 €/GJ pour l'essence. Malgré son avenir prometteur, le biohydrogène est toujours au stade de recherche et il faudra encore du temps pour résoudre les problèmes techniques restants, comme le stockage et la distribution de ce biocarburant ou encore les coûts de production du biohydrogène et des véhicules PAC.

3.7. L'éthanol cellulosique

De nombreux projets sont actuellement menés en Europe et dans le monde en vue de développer et commercialiser l'éthanol cellulosique (Figure 10). En vue d'une commercialisation de la filière d'éthanol cellulosique, des recherches intenses sont nécessaires pour réduire les coûts de prétraitement de la biomasse et des enzymes.



Figure 10 : Usines d'éthanol cellulosique dans le monde en février 2010 (Tuxen, 2010)

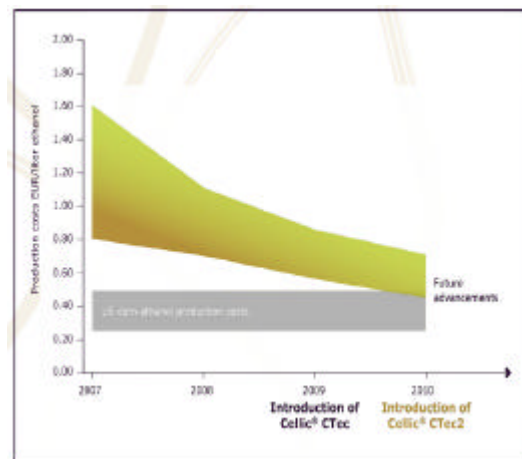


Figure 11 - Coût de production EUR/litre d'éthanol (Tuxen, 2010)

La société danoise Novozymes, fournisseurs d'enzymes et micro-organismes industriels, sont parvenus développer un processus de production d'éthanol cellulosique prêt à être commercialisé "Cellic CTec". Novozymes est parvenu à réduire la dose d'enzymes requise de 50%, diminuant significativement les coûts de production jusqu'à 0,10 EUR/litre (Figure 11). D'après Novozymes, le développement de la filière n'est actuellement plus un problème technique, mais plutôt une question de trouver une sécurité d'investissement suffisante pour les investisseurs. Süd-Chemie Group, actif dans le secteur de la chimie des surfaces et plus précisément les pulvérulents très fins de matière inorganique, a également développé un processus couvrant l'entièreté de la chaîne de production de l'éthanol cellulosique. Ce processus est commercialisé sous le nom « Sunliquid ». La production d'enzymes sur site rend le processus compétitif au niveau cout et indépendant de fournisseurs d'enzymes extérieurs (Danisco et Novozymes).

La société danoise Inbicon est pionnière dans la production d'éthanol cellulosique en Europe. Elle a inauguré, fin 2009, une usine de démonstration à Kalundborg utilisant environ 4 tonnes de paille par heure (30 000 tonnes/an) et produisant 4300 tonnes (soit 2.7 ktep) d'éthanol ainsi que 10 000 tonnes de biopellets par an (Inbicon, 2010). Les investissements s'élèvent à environ 54 millions d'euros (Strandgaard, 2010). En Juin 2010, l'usine est en phase de test visant à surmonter les dernières barrières et d'optimiser le processus : quelques années sont encore nécessaires avant l'étape de commercialisation.

Tableau 19 : Entrées et sorties de l'usine de démonstration Inbicon (Strandgaard, 2010)

Usine de démonstration 4t/h de paille		Tonnes/an	Tonnes MS/an	GJ/an
Entrées	Paille	30 000	25 000	432 000
Sorties	Ethanol	4 300	4 200	114 800
	Biopellets	13 000	12 300	181 100
	C5 (alimentation animale)	11 100	7 210	112 500

Cette usine engendrera également la production de 11.100 tonnes de molasses par an qui peuvent être utilisées en alimentation animale, pour la production de biogaz et pour la fermentation en éthanol ou autres produits alternatifs (Inbicon, 2010). L'usine projette un agrandissement progressif (« Upscalling ») en vue de diminuer l'investissement. La capacité finale sera de 440 000 tonnes de pailles par an (Figure 12).

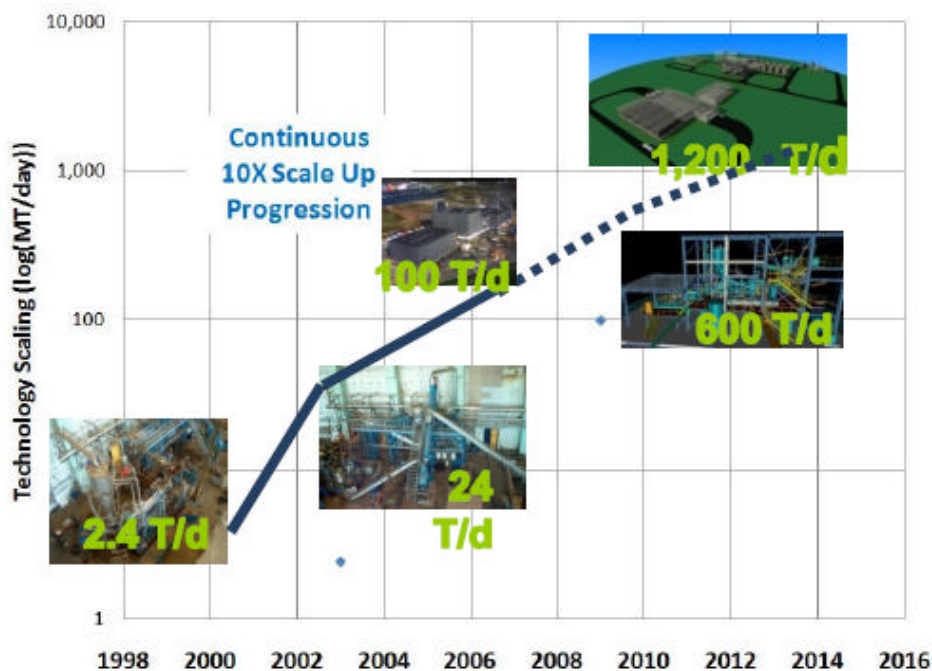


Figure 12: "Upscaling" de l'usine Inbicon (Strandgaard, 2010)

Si l'on veut appliquer ce genre de projet à la Belgique, les ressources en matières premières ne sont pas suffisantes pour satisfaire la production de cette quantité d'éthanol cellulosique. Selon [Didderen] et [Sassner], les 490 ktonnes de déchets ligneux et les 319 ktonnes de résidus ligneux disponibles en Flandres et en Wallonie respectivement ont le potentiel de produire environ entre 270 et 370 millions de litres d'éthanol par an en Belgique. Les 270 millions de litres d'éthanol, soit approximativement 150 ktep, pourrait contribuer pour 1,5% dans la consommation finale d'énergie dans le secteur du transport. Néanmoins, la biomasse lignocellulosique est également utilisée dans d'autres secteurs ; la production de chaleur et d'électricité constituent par exemple d'autres voies de valorisation importantes (Craenhals, 2009).

D'après la Commission Européenne, les premières usines commerciales apparaîtront en 2015-2018 et pourront donc contribuer à l'objectif européen. L'avantage de l'éthanol cellulosique comparé à d'autres biocarburants non conventionnels réside dans le fait que le marché a été développé par l'éthanol de première génération. L'éthanol cellulosique pourra donc bénéficier du réseau d'éthanol déjà bien implémenté et des véhicules compatibles E85 déjà disponibles sur le marché européen (Birath, 2008). Le potentiel de production d'éthanol cellulosique en Belgique est limité par deux contraintes principales : premièrement la Belgique est un pays relativement peuplé qui utilise presque toutes ces ressources en biomasse lignocellulosique. Ce manque d'espace pour l'accroissement de la biomasse restreint la production d'éthanol. Néanmoins, les importations de d'éthanol cellulosique sont possibles, la Belgique disposant d'une situation géographique favorable à cet effet. Deuxièmement, la demande en carburant dans le secteur du transport est dominée par le diesel (Craenhals, 2009).

3.8. Le bio-butanol

Généralement, le butanol est produit synthétiquement et utilisé comme solvant industriel dans de nombreux produits. Depuis quelques années, certains chercheurs s'intéressent à la production de butanol à partir de biomasse et à son utilisation en tant que biocarburant. Suite à une association entre le groupe pétrolier « BP » et la société chimique « Dupont », le projet « Butamax Advanced Biofuels LLC » a été créé en 2009. Il a pour but la production de biobutanol et une première usine de démonstration est actuellement en cours de construction au Royaume-Uni. D'ici 2013, le projet vise à mettre en place une usine de commercialisation de biobutanol (Butamax, 2010). Gevo, une entreprise américaine, s'est également lancée dans la construction d'une usine de démonstration fin 2009. D'ici 2011, la société a comme objectif de convertir une usine d'éthanol existante pour la production bio-butanol (Gevo, 2010).

La production de bio-butanol pourrait être intégrée au sein des usines d'éthanol car il utilise les mêmes matières premières et des procédés de production (fermentation) similaires (Butamax, 2010). Ce type de scénario semble être une bonne opportunité pour le développement de cette filière en Belgique afin de diminuer les investissements liés à l'implémentation de la filière. Les coûts de production s'élèvent actuellement à 1.64€/L. Le faible rendement suite au processus de fermentation particulier et le manque de familiarité du public avec ce type de produit freinent son développement à grande échelle (Pfromm, 2010). La production de bio-butanol via la fermentation ABE de la biomasse ne semble donc pas avantageuse pour le moment par rapport à l'éthanol conventionnel ou encore par rapport à l'éthanol cellulosique et de nombreuses incertitudes persistent encore quant à sa production. La commercialisation et la contribution de cette filière à l'objectif 2020 semblent donc limitées, et des innovations technologiques seront nécessaires pour permettre la production à grande échelle de manière compétitive.

3.9. Le Jatropha

Selon (GEXSI-, 2008), environ 240 projets liés à la culture de Jatropha ont été identifiés à travers le monde. Cette plante, qui requiert un climat tropical/subtropical pour sa croissance, se développe principalement en Asie (Inde, Indonésie, Vietnam,...), en Afrique (surtout au Ghana, Madagascar et Tanzanie) et dans une moindre mesure en Amérique Latine (Brésil, Mexique). Bien que cette filière de production de biodiesel en est seulement à ses débuts, depuis 2008, environ 900 000 hectares de Jatropha Curcas L. (JCL) ont déjà été implantés, dont 85% des cultures se situent en Asie. Approximativement 5 millions d'hectares sont attendus d'ici 2010 et 13 millions d'hectares d'ici 2015 (GEXSI-, 2008).

Au niveau Européen, l'intérêt pour cette culture est grandissant et de nombreuses compagnies investissent dans la production d'huile de Jatropha : les britanniques Sun Biofuels et BP- D1 oils, les néerlandais Bioshape et Diligent, l'allemand Prokon,... Les premiers projets de Jatropha commencent à voir le jour, notamment en Afrique de l'Ouest avec la société britannique Biofuel Africa (Stephano V., 2010). Un autre exemple est le projet « D1-BP fuels Crop », basé en Angleterre, qui vise la production de biodiesel et réunit le groupe pétroliers BP et la société de culture énergétique alternative D1 oils. Ce projet a commencé en 2004, 112 000 ha de jatropha sont actuellement cultivés en

Inde et D1 oils importe déjà de l'huile en Europe. Une unité d'extraction, qui pourrait traiter environ 100 tonnes/jour, est attendue mais aucune production commercialisable d'huile brute n'a été enregistrée pour le moment (D1 Oils plc). La société commercialise également un procédé pour produire des protéines de haute qualité issues des coproduits de la production d'huile. Cela permettra d'améliorer l'efficacité du procédé en général et d'offrir une nouvelle source de protéines à proximité des régions de production. Au niveau national, quelques entreprises envisagent l'utilisation d'huile de jatropha comme source énergétique. Depuis début 2008, la société Thenergo a commencé la construction d'une unité de cogénération alimentée en huile végétale de jatropha en Belgique. Baptisé Greenpower, le projet représente un investissement total de 11 millions d'euros et pourrait être opérationnel prochainement (Thenergo, 2010) La Belgique, ne bénéficiant pas des conditions climatiques adéquates pour la culture de Jatropha, devra obligatoirement importer la matière première, huile de jatropha ou biodiesel. De telles importations sont actuellement réalisées pour l'huile de palme par des sociétés belges comme Felisa, Akogroup ou encore le groupe Socfinal et sa filiale Socapalm (Stephano V., 2010). Les importations d'huile de jatropha (huile végétale pure ou biodiesel après traitement) pourraient permettre à la Belgique de répondre à ces objectifs de 13% de renouvelables mais soulèvent des questions de sécurité alimentaire et de durabilité. Le biodiesel produit à partir de jatropha pourrait voir le jour prochainement en Belgique mais il faudra, sans conteste, s'assurer d'une production durable d'un point de vue environnemental, profitable aux populations locales et qui pourra garantir le développement des communautés rurales.

3.10. Les algues

De nombreuses sociétés dans le monde disent aujourd'hui travailler sur les microalgues et les biocarburants. Le Tableau 20 présente quelques unes des plus importantes.

Tableau 20 : Acteurs impliqués dans la production de microalgues et de biocarburants.

Nom de la société	Pays	Bassins ouverts	Photobioréacteur	Autre	Type de biocarburant
Aquaflow Bionomic	Nouvelle Zélande	X			Hydrocarbures
Algenol	Etats-Unis		X		Ethanol
Green fuel technologies		X			Biodiesel
HR Biopetroleum	Hawaï	X	X		Biodiesel
Petrosun	Etats-Unis	X			
Sapphire energy	Etats-Unis	X			Hydrocarbures
Solazyme	Etats-Unis			X	Biodiesel
Solix biofuel	Etats-Unis		X		Biodiesel (principalement)
Solray Energy	Nouvelle Zélande	X			Hydrocarbures

Les sociétés travaillant sur les macroalgues semblent être moins nombreuses. La société BAL au Chili est impliquée dans la fermentation alcoolique des macroalgues pour produire de l'éthanol.

Il est intéressant de citer 2 projets concernant la fermentation alcoolique des macroalgues:

- *Ocean Sunrise Project*: ce projet Japonais a pour objectif de produire 5 milliard de L de bioéthanol à partir de la culture en mer de la macroalgue *Sargassum horneri*.
- *Energy Production from Marine Biomass (Ulva lactuca)* : au Danemark, Michael Bo Rasmussen (Université d'Aarhus) travaille sur la macroalgue *Ulva lactuca* (aussi appelée laitue de mer) où il étudie sa culture en bassin fermé puis sa conversion en bioéthanol.

Plusieurs initiatives illustrent l'émergence de la thématique «algues» en Belgique. En Région wallonne, on retrouve quatre projets dont un dédié au domaine de l'énergie:

BEMA Bio Energy from Micro Algae (2009-2013) : la recherche au sein du projet consiste à faire les études de systèmes de culture et de récolte de micro-algues pour permettre la séquestration de CO₂ et valoriser au mieux la production de lipides pouvant servir de biocarburant ainsi que d'autres éléments à haute valeur ajoutée. L'objectif principal est de mettre au point un prototype de photobioréacteur qui puisse faire la preuve de la production de biomasse algale à grande échelle.

Les partenaires du projet sont : ULg, Laboratoire de Génétique des Microorganismes et Labo de Biochimie végétale et de photobiologie, Liège, Belgique ; N-Side, Louvain-la-Neuve, Belgique (spin-off de l'UCL spécialisée en optimisation de process pour différentes industries) ; Wetlands Biosciences s.a., Wetlands Biosciences s.a. Louvain-la-Neuve, Belgique ; LHOIST, LHOIST Nivelles, Belgique ; UCL - GEBI, Unité de Génie Biologique, Louvain-la-Neuve, Belgique.

Autres projets sur les algues :

BIOVAMAT (2008-2011): photobioréacteurs efficaces pour la production de molécules à haute valeur ajoutée, basés sur une technologie innovante de mise en œuvre de matériaux nanoporeux.

SCALAB (2009-2011): systèmes de production d'anticorps à grande échelle La proposition est de développer un système mettant en œuvre des algues unicellulaires eucaryotes capables de sécréter des immunoglobulines fonctionnelles en quantités compatibles avec les demandes et exigences du marché.

NUTRIALG (2007-2009) : production algale de métabolites secondaires pour usage alimentaire.

En Région flamande, on trouve aussi plusieurs projets sur les algues :

SBO Sunlight (2009-2013) : le projet a pour objectif de créer et de valider de nouvelles ressources biologiques et de nouvelles technologies pour la culture de microalgues en photobioréacteurs extérieurs. Les premières molécules cibles pour la validation des technologies seront les lipides, obtenus à partir de microalgues diatomées. Des modèles de flux métaboliques, basés sur le génome, seront développés et utilisés pour déterminer

les stratégies à adopter pour augmenter la productivité en lipides. Les partenaires sont : l'Université de Gand, l'université de Wageningen, et l'Université catholique de Leuven.

BI-CYCLE (2008-2011) : Le projet a pour objectif de développer la production et la valorisation d'huile à partir d'algues et/ou de levures de manière économique. Un potentiel élevé de valorisation est attendu grâce à l'utilisation: (1) de fraction à haute valeur ajoutée (EPA, GLA, DHA ...) pour des applications alimentaires (2) de fraction à basse valeur ajoutée pour la production de biodiesel et (3) de composés chimiques (building blocks) de base. Les partenaires sont : la Haute Ecole Karel de Grote, la Haute Ecole Katholieke Hogeschool Sint-Lieven, l'Université d'Anvers et l'Université de Karlsruhe (Allemagne).

Proviron : Développement d'un nouveau photobioréacteur efficace et peu cher. Les partenaires sont Proviron, Matthys (société Belge, constructeur de machines sur mesure) et l'Université de Gand.

L'exploitation industrielle intensive de cultures d'algues comme source d'énergie émerge lentement du stade expérimental et en est encore à ses débuts pour la production énergétique. Les travaux de recherche dans ce domaine sont nécessaires notamment pour obtenir des procédés économiquement viables. En Belgique, le développement d'une filière « algues » ne pourra s'envisager qu'après notamment l'identification de la ressource la plus adaptée (sélection des macro/microalgues), l'étude des conditions de culture (culture offshore, photobioréacteurs, récolte dans des bassins...) et la mise au point des procédés d'extraction et de valorisation économiquement viables. Une solution pour réduire les coûts de production des biocarburants d'origine algale réside dans une production en synergie avec d'autres valorisations à plus haute valeur ajoutée: chimie verte, phytoremédiation du CO₂, nutrition.... Les microalgues étant consommatrices de CO₂, les cultures peuvent être couplées à une source de CO₂ industrielle. La biomasse ainsi produite peut servir à l'extraction de telle ou telle molécule.

IV. CONCLUSION

Dans une perspective à long terme des biocarburants non conventionnels, un des facteurs primordiaux sera d'assurer un approvisionnement en biomasse durable et compétitif. Les efforts devront se concentrer sur une amélioration de la productivité et de l'efficacité des filières en général, sur l'identification de la localisation optimale des usines et sur le développement d'une logistique adaptée pour le transport de la matière première. La compétition de l'utilisation de la biomasse et sa valorisation au travers les différents secteurs énergétiques devra également être pris en compte.

Par ailleurs, les freins majeurs au développement de ces filières sont les investissements et les coûts de production importants, limitant leur implémentation à court terme. Au niveau de la mise en place à grande échelle de ces filières, tant un soutien politique que financier sera nécessaire pour stimuler l'investissement ainsi que la normalisation européenne pour nécessaire à l'utilisation de ces carburants. Cependant, les risques commerciaux sont élevés, le retour financier long et la rentabilité de ces filières n'est pas encore totalement garantie.

Il est actuellement encore difficile de donner avec précision quelle filière atteindra prochainement le secteur du transport. Néanmoins, certains carburants non conventionnels sont à un stade de développement plus avancé et semblent, de cette façon, susceptibles d'atteindre plus rapidement l'étape de commercialisation. Aujourd'hui, de nombreux projets s'intéressent particulièrement aux biocarburants liquides comme le diesel FT ou encore l'éthanol cellulosique, qui permettront dans le futur d'utiliser les infrastructures de distribution et les véhicules existants. De plus, dans le cas du diesel FT, celui-ci pourra intégrer un marché de désélisation en pleine expansion. Ces biocarburants sont susceptibles d'établir une certaine synergie avec l'éthanol et le biodiesel conventionnels, qui dans un premier temps auront développé le marché. D'autres filières présentent d'importants avantages, comme par exemple le biogaz qui valorise l'utilisation de déchets organiques, ou encore le bioDME et le biohydrogène qui permettent une combustion très propre. Toutefois, ces trois biocarburants sont sous forme gazeuse et nécessiteront donc pour leur implémentation des structures particulières et une évolution des habitudes de consommation du grand public. Bien que les opportunités de production à l'échelle de la Belgique semblent donc encore difficiles à mettre en œuvre, le diesel FT, l'éthanol cellulosique et à plus petite échelle le biogaz semblent être pour le moment les filières les plus enclines à atteindre le réseau routier belge d'ici 2020. Il faudra cependant encore quelques années avant de voir la commercialisation à grande échelle de ces biocarburants, période pendant laquelle les barrières technologiques et les coûts de production pourront être réduits de manière importante.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AEBIOM. (2009). A Biogas Road Map for Europe. European Biomass Association, Bruxelles

Achten W.M.J, Verchot. L., Franken Y.J, Mathijs E., Singh V.P, Aerts R., Muys B. (2008). Jatropha bio-diesel production and use. Biomass and Bioenergy 32 , pp. 1063-1084.

Ahman, M. (2010). Biomethane in the transport sector- An appraisal of the forgotten option. Energy policy 38 , pp 208-217.

Aizawa M. et al., Seaweed Bioethanol Production in Japan – The Ocean Sunrise Project, 2007.

Arcoumanis C., Mashashi H. (2008). The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: A review. Fuel , pp. pp 1014-1030.

Ballerini, D., Alazard.-Toux N., Appert O., (2006). Les biocarburants, états des lieux, perspectives et enjeux de développement. IFP Publications.

Biogasmax. (2010). Technologie Biogaz Biocarburants. Consulté le Février 9, 2010, sur Biogasmax. A driving force. Stratégies et enjeux du biogaz.: www.biogasmax.fr

BioMCN. (2010). Bio-methanol. Consulté le 24 avril , 2010, sur Biomethanol Chemie Nederlands: <http://www.biomcn.eu/>

Birath K. , H. B. (2008). Technical guidance for biofuels. Technical information concerning the application of biofuels. Utrecht: Biofuels cities. A European Partnership.

Blin, J. (2007). La biomasse - Source d'énergie. In Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2E Groupe EIER-ETSHER, CIRAD, [En ligne]. http://www.2ieedu.org/j-energie/projet_bepita/activites_2ie_projet_bepita.pdf (Page consultée le 25octobre 2008).

Bruijstans, A.J., Beuman, W.P.H., Molen, M.v.d, Rijke, J.d., Cloudt, R.P.M., Kadijk, G., Camp, O.o.d., Bleumans, S. (2008). Biogas composition and Engine Performance, including database and biogas property model. BIOGASMAX Project.

Burman, Å (2010). The GoBiGas Project -Efficient transfer of biomass to biofuels. Presentation World Bioenergy conference 2010, Jönköping, Sweden, 25 - 27 May 2010. Göteborg Energi.

Bruton T et al., A Review of the Potential of Marine Algae as a Source of Biofuel in Ireland, Seabiotic, 2009

Butalco. (2010). Butalco-Bioethanol. Consulté le 24 Octobre , 2009, sur www.butalco.com

Butamax. (2010). About butamax. Butamax Advanced Biofuels LLC. Consulté le avril 28, 2010, sur www.butamax.com

Cadoret JP et al., La production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis, 2008.

Carlson AS., Van Beilen J., Möller R. and Clayton D., Micro- and macro-algae: Utility for industrial application, 2007; CPL Press.

Chemrec. (2010). About bioDME plants. Chemrec Corporation. Consulté le février 2, 2010, sur www.chemrec.se

Chemrec. (2010). Chemrec- Turning pulp mills into biorafineries. Consulté le 2 mai , 2010, sur Chemrec corporation: www.chemrec.se

Craenhals, D. (2009). Potential and economic viability of second generation bioethanol production in Belgium. MSc Thesis. Cranfield University.

CWaPE. 2009. Avis CD-9j06-CWaPE-258 concernant la mise en place d'un système de garanties d'origine pour les gaz issus de renouvelables injectés dans les réseaux de gaz naturel en vue de leur valorisation pour la production d'électricité verte.

CRA-W. (2007). Biogas Regions. Regional Strategy and action plan for the Walloon Region (Belgium). A summary. Gembloux: Valbiom- Biogas Regions- CRA-W Gembloux.

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

Didderen I., Destain J. (2008). Le éthanol de seconde génération: la production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique. Gembloux: Les presses agronomiques de Gembloux, A.S.B.L.

Doré-Deschênes F., Utilisation des microalgues comme source d'énergie durable, essai de maîtrise, Université de Sherbrooke, 2009.

EBTP. 2009. European Industrial Bioenergy Initiative. Consulté le 23 octobre 2009, sur European Biofuels Technology Platform: <http://www.biofuelstp.eu>

ECN. (2010). ECN. Bio-SNG. Consulté le 2 février , 2010, sur www.biosng.com

ECN. (2006). Production of Synthetic Natural Gas (SNG) from biomass. Development and operation of an integrated bio-SNG system. Energy reseach Center of the Netherlands.

Eurostat. 2010. Tableaux Energies - Eurostat. Consulté le 23 avril , 2010, sur le site de la Commission Européenne: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

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.

FeBuPro. 2010. Autogaz- FeBuPro. Consulté le mai 2, 2010, sur Fédération Butane Propane: www.febupro.be

FNR. (2009, Octobre). Biokraftstoffe - Basisdaten Deutschland. Consulté le 10 Mai , 2010, sur Nachwachsende-rohstoffe: www.fnr.de

Hamelinck C-N. 2004. Outlook for advanced biofuels. Proefschrift Universiteit Utrecht

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

Gevo. 2010. About biofuels. Gevo- Next generation biofuels. Consulté le avril 28, 2010, sur Gevo TM: www.gevo.com

- GEXSI-. (2008). Global Market Study on Jatropha. World Wide Fund for Nature (WWF), (p. 42). Berlin
- Greenwell HC et al., Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges, 2010.
- Huntley, M. and Redalje, D., CO₂ Mitigation and Renewable Oil from Photosynthetic Microbes: A New Appraisal. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006.
- IEA. (2008). Gaps in the research of 2nd Generation Transportation biofuels. IEA bioenergy.
- IEA Bioenergy ExCo64, Algae - The Future for Bioenergy - summary and conclusions, 2010, <http://www.ieabioenergy.com/MediaItem.aspx?id=6517>.
- IEA Bioenergy Task 37, Algal Biomass - Does it save the world ?, 2009, <http://www.iea-biogaz.net/Dokumente/AlgaeBiomass8-09.pdf>.
- IFP. (2008). Les unités pilotes de biocarburants de deuxième génération dans le monde. Panorama, pp. 1-8.
- Inbicon. (2010). Kalundborg-Demonstration plan. Consulté le 28 avril, 2010, sur Inbicon company: www.inbicon.com
- Olivo E., Conception et étude d'un photobioréacteur pour la production en continu de microalgues et écloséries aquacoles, thèse doctorale, Université de Nantes, 2007
- Persson M., Wellinger A. 2006. Biogas upgrading and utilisation. IEA Bioenergy. 32p.
- Pfromm P., V. A.-B. (2010). Bio-butanol vs. bio-ethanol: a technical and economic assessment for corn and switchgrass fermented by yeast or Clostridium acetobutylicum. Biomass and Bioenergy , 515-524
- RENEW. (2008). Renewable Fuels for advanced Powertrains. SYNCOM.
- Semelsberg T., Rodney L. Borup, Howard L. Greene. (2006). Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel. Journal of Power Sources, 156 , 497-511.
- SPAQuE. (2007). Valorisation énergétique du biogaz de décharge. Conférence Innovation et Technologie de la Transformation des Déchets en Energie p. 20). Liège: EF4.
- Stephano V., I. L. (2010). La course belge à l'or africain. Le vif l'express , 54-57.
- Strandgaard, R. J. 2010. Inbicon - A new technology with high international potential. Presentation World Bioenergy conference 2010, Jönköping, Sweden, 25 - 27 May 2010. Inbicon (DONG Energy Group).
- SPF économie. (2010). Statistiques - Agriculture. Consulté le 25 Avril, 2010, sur : SPF Economie, P.M.E, Classes moyennes et énergie - Statistiques énergétique: <http://statbel.fgov.be>
- Thenergo. (2010). Greenpower/ Thenergo. Consulté le 1 mai , 2010, sur le site : Thenergo, Synergy in Sustainable energy: <http://www.thenergo.eu>

TUXEN, A. L. 2010. ADVANCES IN THE BIOLOGICAL CONVERSION PATHWAY THE ENZYMES ARE READY. Presentation European Biofuels Technology Platform 3rd Stakeholder Plenary Meeting Brussels, April 14th 2010. Novozymes A/S.

Vogels, J. 2010. Commercial scale BTL production on the verge of becoming reality - The CHOREN Beta Plant and future developments. Presentation World Bioenergy conference 2010, Jönköping, Sweden, 25 - 27 May 2010. Choren Industries GmbH.

Volvo trucks. (2010). Volvo Trucks Bio-DME. Consulté le mai 2, 2010, sur <http://www.volvotrucks.com>

Whitwham M., Production de biocarburants à partir de micro-algues, Synthèse de l'étude réalisée par Philgea pour Enerbio, 2009.

Xu, H., Miao, X. and Q. Wu., High Quality Biodiesel Production from a Microalga *Chlorella protothecoides* by Heterotrophic Growth in Fermenters, 2006.

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.