

# **LA PRODUCTION DE BIODIESEL À PARTIR DES MICROALGUES AYANT UN MÉTABOLISME HÉTÉROTROPHE**

Par

Isabelle Cantin

Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de  
l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env)

CENTRE UNIVERSITAIRE DE FORMATION EN ENVIRONNEMENT

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Sherbrooke, Québec, Canada, juillet 2010

## **IDENTIFICATION SIGNALÉTIQUE**

### **LA PRODUCTION DE BIODIESEL À PARTIR DES MICROALGUES DE MÉTABOLISME HÉTÉROTROPHE**

Isabelle Cantin

Essai effectué en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env)

Sous la direction de Guy Viel

Université de Sherbrooke

juillet 2010

Mots clés : biocarburant, biodiesel, algocarburant, microalgue, biomasse, fermenteur, hétérotrophe, procédé.

Le secteur des transports est fortement dépendant des sources d'énergie fossiles. Face à l'éventuel épuisement des ressources, à la fluctuation importante des prix ainsi qu'à la pollution engendrée par leur utilisation, plusieurs alternatives ont été identifiées. La production de biodiesel d'origine microalgale présente plusieurs avantages dont l'importante productivité en biomasse et en huile ainsi que la possibilité de les cultiver sur des terres non arables. Étant donné que la croissance des microalgues de métabolisme hétérotrophe est indépendante du rayonnement solaire, il s'agit d'une option intéressante pour le Québec. Cette production pourrait être réalisée, dans un premier temps, par l'utilisation de résidus agricoles. Toutefois, l'analyse des aspects technologiques, économiques et environnementaux permet de constater que plusieurs efforts de recherche et développement devront être fournis afin de permettre une production d'algocarburants à l'échelle.

## SOMMAIRE

Les combustibles d'origine fossiles représentent actuellement la principale source énergétique utilisée dans le monde pour combler les besoins des populations en énergie. Les impacts environnementaux reliés à leur utilisation sont nombreux et en lien direct avec la problématique des changements climatiques et l'émission des gaz à effet de serre. Le secteur des transports demeure celui le plus problématique étant donné l'absence, actuellement, de moyens permettant de remplacer efficacement le pétrole.

En effet, les biocarburants actuellement produits tels le bioéthanol et le biodiesel à partir de cultures terrestres présentent un potentiel limité à la substitution des carburants utilisés dans le secteur des transports. Leur production nécessite d'importantes superficies en terres agricoles et entraînent l'apparition d'autres problématiques dont, notamment, la déforestation, l'augmentation des prix des aliments, l'augmentation de la consommation en eau et la pollution due à l'utilisation des pesticides.

Certaines compagnies et centres de recherche travaillent depuis plusieurs années à la production de biodiesel à partir des microalgues, et ce, principalement à partir de celles ayant un métabolisme autotrophe. La production en autotrophie dépend d'un ensoleillement ainsi que de températures optimales qu'il est possible de retrouver principalement à des latitudes se situant près de l'équateur. Le mode de production en autotrophie ne peut donc pas être appliqué dans les milieux nordiques tel le Québec. L'objectif principal de cet essai est de déterminer comment appliquer la production de biodiesel en contexte nordique comme le Québec, et ce, à partir des microalgues de métabolisme hétérotrophe, se caractérisant par une croissance en absence de lumière à partir d'une source d'hydrate de carbone.

Afin de répondre à cet objectif, les principales caractéristiques des microalgues ont été étudiées, et ce, autant au niveau de la diversité des espèces, de la nutrition de celles-ci que des méthodes de production utilisées. Les résultats des recherches ont permis de déterminer que plusieurs espèces microalgales sont encore inconnues et qu'il existe ainsi un potentiel intéressant d'identification de nouvelles espèces pouvant être utilisées à des

fins de production de biocarburant. Parmi celles actuellement identifiées, un nombre limité de microalgues possède un métabolisme hétérotrophe. Les microalgues de métabolisme hétérotrophe peuvent utiliser comme source de carbone principalement des monosaccharides ou encore des disaccharides tels le glucose, le sucrose et le glycérol. L'évaluation des méthodes de production utilisées a permis de constater que la production en fermenteur est une technique bien maîtrisée et que plusieurs modes d'alimentation en substrat peuvent être utilisés. Au niveau de la récolte et de l'extraction, les techniques disponibles sont multiples. Des efforts de recherche devront toutefois être fournis afin d'identifier une technique peu coûteuse et efficace adaptée à une production à l'échelle industrielle.

Les sources potentielles de matières organiques ainsi que les techniques pouvant être utilisées afin d'obtenir une source de carbone assimilable par les microalgues de métabolisme hétérotrophe ont ensuite été évaluées. Les matières lignocellulosiques présentent un potentiel intéressant étant donné leur coût moins élevé comparativement au glucose. Des matières tels les résidus agricoles et forestiers, la bagasse de canne à sucre et les cultures fourragères et ligneuses peuvent potentiellement être utilisées au Québec. Toutefois, l'utilisation des résidus agricoles, étant donné l'importance de sa production, serait l'avenue à privilégier. Les techniques pour obtenir du glucose à partir des matières lignocellulosiques sont nombreuses et, de façon générale, présentent des rendements de récupération en glucose supérieurs à 90 %. Toutefois, la conversion de la cellulose et de l'hémicellulose contenue dans les matières lignocellulosiques en glucose nécessite encore des efforts en recherche pour permettre une diminution des coûts. Les défis à relever se situent également au niveau de l'approvisionnement, de la collecte et du stockage de ces matières.

L'analyse des aspects technologiques, économiques, environnementaux et sociaux a permis de constater que la production de biodiesel à partir des microalgues de métabolisme hétérotrophe est avantageusement comparée aux productivités en mode autotrophe ainsi que comparativement à l'utilisation des cultures. Des rendements très intéressants ont d'ailleurs été calculés. Toutefois, les techniques de récolte et d'extraction

représentent encore le goulot d'étranglement pour permettre une diminution considérable des coûts de production. En effet, pour le moment, les techniques utilisées sont coûteuses et l'efficacité de celles-ci dépend grandement de l'espèce microalgale utilisée. La rentabilité de la production de biodiesel devra conséquemment être améliorée par de nombreux développements en recherche. L'avenue de la vente de coproduits à forte valeur ajoutée semble toutefois une alternative incontournable pour permettre une rentabilité à plus long terme. Des produits tels les nutraceutiques, les cosmétiques, les suppléments alimentaires pour l'alimentation animale et humaine peuvent être produits et donc engendrer des revenus. Au niveau environnemental, peu d'études ont été réalisées à ce sujet, mais la majorité des auteurs soulignent les impacts positifs tels qu'une diminution de l'utilisation des terres ainsi que l'absence d'impacts sur le prix des aliments et au niveau de la déforestation. La production des microalgues pourrait également contribuer à la création d'emplois et à la sécurité d'approvisionnement tout en contribuant à la diminution de la dépendance face aux combustibles d'origine fossiles.

C'est donc grâce à l'évaluation des caractéristiques des microalgues, des sources potentielles de matières organiques et des possibilités d'utilisation qu'il a été possible de conclure que la production de biodiesel à partir des microalgues de métabolisme hétérotrophe en fermenteur est une solution adaptée et applicable pour le Québec. Les matières lignocellulosiques telles que les résidus agricoles et forestiers ainsi que le glycérol pourraient être utilisés comme source de carbone pour assurer la croissance des microalgues.

## **REMERCIEMENT**

Je tiens à remercier mon directeur d'essai, Monsieur Guy Viel, Directeur du Centre de recherche sur les biotechnologies marines (CRBM) qui a su m'épauler tout au long de la rédaction. Ce dernier s'est montré très aidant en me fournissant certains documents pertinents pour la rédaction de mon essai. Il m'a d'ailleurs encouragé par ses commentaires positifs lors des moments les plus pénibles. Sa souplesse et sa compréhension m'ont également permis de cheminer à mon rythme tout au long de la rédaction tout en assurant le suivi de l'échéancier préalablement établi. Il a également été en mesure de me transmettre sa passion sur le sujet. Un gros merci pour la grande disponibilité accordée à mon essai et les réponses à mes questions. La rétroaction fut toujours rapide et pertinente.

Je tiens également à remercier tous mes amis qui m'ont encouragé à ne pas abandonner lors des moments plus difficiles.

# TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
<b>1 MISE EN CONTEXTE .....</b>	<b>4</b>
1.1 Consommation globale de pétrole et perspective .....	4
1.1.1 La situation actuelle .....	4
1.1.2 La demande future .....	5
1.2 Les biocarburants de première génération .....	6
1.3 Les biocarburants de deuxième et troisième génération .....	9
1.3.1 Éthanol cellulosique.....	9
1.3.2 Les algocarburants .....	10
<b>2 CARACTÉRISTIQUES DES MICROALGUES .....</b>	<b>13</b>
2.1 Modes de nutrition des microalgues .....	13
2.2 Classification des algues .....	14
2.2.1 Les Cyanophycées (algues bleues-vertes) .....	15
2.2.2 Les Chrysophycées (algues dorées) .....	15
2.2.3 Les Rhodophycées (algues rouges).....	15
2.2.4 Les Euglenophycées.....	16
2.2.5 Les chlorophycées (algues vertes) .....	16
2.2.6 Les bacillariophycées (diatomées).....	16
2.3 La nutrition des microalgues de métabolisme hétérotrophe et mixotrophe.....	18
2.4 La production de biodiesel à partir des microalgues de métabolisme hétérotrophe	20
2.4.1 Les principaux joueurs .....	20
2.4.2 Modes de production.....	23
2.4.3 La récolte des algues .....	25
2.4.4 L'extraction des huiles .....	28

<b>3</b>	<b>SOURCES POTENTIELLES DE MATIÈRES ORGANIQUES .....</b>	<b>31</b>
3.1	Composition des résidus lignocellulosiques .....	31
3.1.1	Conversion des matières lignocellulosiques en sucres .....	32
3.2	Utilisation de résidus agricoles et forestiers .....	37
3.2.1	Résidus forestiers .....	39
3.2.2	Résidus agricoles .....	41
3.2.3	Cultures fourragères.....	43
3.2.4	Nouvelles technologies .....	45
<b>4</b>	<b>ÉVALUATION DES POSSIBILITÉS D'UTILISATION .....</b>	<b>48</b>
4.1	Aspects technologiques.....	48
4.1.1	Analyse des performances des microalgues de métabolisme hétérotrophe .....	48
4.1.2	Rendement des procédés d'extraction et de récolte .....	51
4.1.3	Sources possibles de carbone et potentiels de développement .....	54
4.2	Aspects économiques.....	57
4.2.1	Facteurs d'influence sur le coût .....	57
4.2.2	Diminution des coûts .....	60
4.3	Aspects environnementaux et sociaux.....	63
	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>68</b>
	<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>72</b>
	<b>ANNEXE 1 BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>83</b>

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 2.1 : Fermenteur expérimental de 3 m <sup>3</sup> .....	24
Figure 2.2 : « Microstrainer » rotatif utilisé pour la récolte des microalgues.....	26
Figure 2.3 : Phénomène d'implosion créé par le principe de cavitation.....	30
Tableau 2.1: Les différents types nutritionnels des microalgues .....	14
Tableau 2.2: Principales espèces de métabolisme hétérotrophe pour la production de biodiesel .....	17
Tableau 2.3: Sources de carbone assimilables pour certaines espèces de microalgues .....	19
Tableau 2.4: Caractéristiques des systèmes employés pour cultiver les microalgues .....	25
Tableau 3.1: Proportions des constituants pour plusieurs types de biomasse.....	31
Tableau 3.2: Principaux procédés de prétraitement utilisés.....	33
Tableau 3.3: Effets de différents prétraitements sur la structure lignocellulosique de la biomasse .....	36
Tableau 3.4: Rendements en sucres obtenus pour certains types de biomasse lignocellulosique. ....	38
Tableau 3.5: Quantité de résidus disponibles en fonction du prix aux États-Unis et au Canada .....	40
Tableau 4.1: Productivité et rendement en lipides obtenus par la culture de microalgues ayant un métabolisme hétérotrophe. ....	50

## **LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES**

ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AIE	Agence Internationale de l'Énergie
CAFI	Consortium for Applied Fundamentals and Innovation
CNISF	Conseil National des Ingénieurs et des Scientifiques de France
CRAAQ	Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec
CRB	Commodity Research Bureau
CRBM	Centre de Recherche sur les biotechnologies marines - Rimouski
DOE	Department of Energy – États-Unis
EIA	Energy Information Administration – États-Unis
IFP	Institut Français du Pétrole
NREL	National Renewable Energy Laboratory – États-Unis
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économique
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
OGM	Organismes génétiquement modifiés
USDA	United States Department of Agriculture

## INTRODUCTION

Les récentes préoccupations de plusieurs spécialistes au niveau des ressources et des réserves disponibles en pétrole ont soulevé plusieurs inquiétudes au niveau de l'approvisionnement à plus long terme. La dépendance de la société face aux combustibles d'origine fossile, et ce, principalement dans le secteur des transports, en relation avec l'épuisement des ressources et le réchauffement climatique ont eu pour conséquences des avancées considérables dans le domaine de la recherche en énergies renouvelables. Ces recherches visent une substitution ou un remplacement des combustibles fossiles par diverses énergies renouvelables telles que le bioéthanol et le biodiesel.

Le développement des biocarburants comme le bioéthanol produit à partir du maïs et le biodiesel à partir de cultures comme le soya a toutefois entraîné l'apparition de plusieurs problématiques. En effet, l'essor de ces biocarburants a provoqué une hausse des prix des aliments présentant ainsi de nombreux impacts pour les populations, une utilisation accrue des terres favorisant la déforestation à travers le monde ainsi qu'une augmentation de la pollution due à l'utilisation d'engrais et de pesticides. C'est donc en lien avec ces constats et la crise énergétique que d'autres efforts ont été fournis dans la recherche de solutions alternatives telles que la production de biodiesel à partir des huiles produites par les microalgues.

Ces efforts de recherche se sont d'abord orientés vers la production à partir des microalgues à métabolisme autotrophe, c'est-à-dire utilisant le rayonnement solaire comme source d'énergie ainsi que le CO<sub>2</sub> comme source de carbone. Des résultats intéressants ont été obtenus tout en permettant une production sur des terres infertiles ou délaissées. Pour l'atteinte d'une productivité intéressante, ces microalgues nécessitent toutefois un rayonnement solaire optimal retrouvé principalement dans la zone équatoriale.

Une autre alternative explorée est la production de biodiesel à partir des microalgues à métabolisme hétérotrophe. Celles-ci se caractérisent par leur capacité de croissance dans l'obscurité et donc indépendamment du rayonnement solaire. Une source de carbone doit

toutefois être fournie pour assurer la croissance de celles-ci. Étant donné la possibilité de cultiver ces microalgues dans des fermenteurs, et ce, peu importe la localisation, il s'agit d'une alternative très intéressante pour les régions nordiques. De plus, les productivités en huile sont supérieures à celles obtenues en mode autotrophe.

Cet essai traitera de la production de biodiesel à partir des microalgues à métabolisme hétérotrophe. Il vise principalement à préciser l'application de la production en mode hétérotrophe dans un contexte nordique tel que celui du Québec. Il sera également question d'identifier les caractéristiques inhérentes à la production en hétérotrophie, de déterminer les différentes techniques biochimiques permettant d'obtenir des sources d'hydrates de carbone assimilables ainsi que d'identifier des sources de carbone disponibles et possiblement utilisables par les microalgues. Les aspects technologiques, économiques, environnementaux et sociaux seront également identifiés.

Afin de répondre à ces objectifs, plusieurs sources d'informations ont été consultées. Celles-ci proviennent principalement de l'internet ainsi que de diverses publications scientifiques. Les publications les plus récentes et les mieux documentées ont été utilisées comme source d'information afin de permettre l'atteinte des objectifs de cet essai.

Le présent essai comporte différentes sections. Dans la mise en contexte, il sera question de discuter de la situation actuelle et future des carburants d'origine fossile. Les biocarburants seront également traités afin de présenter les principales caractéristiques de ceux-ci tout comme les principales limites à leur utilisation à grande échelle. Le deuxième chapitre portera sur les microalgues ayant la capacité d'un métabolisme hétérotrophe et mixotrophe, les facteurs favorisant leur croissance ainsi que les caractéristiques de production en hétérotrophie. Par la suite, au troisième chapitre, les sources de carbone pouvant être utilisées par les microalgues seront traitées tout comme les procédés de transformation permettant d'obtenir une source de carbone assimilable par les microalgues. Les informations des chapitres précédents permettront ensuite, au quatrième chapitre, de faire l'analyse de plusieurs des concepts. Les aspects technologiques, économiques, environnementaux et sociaux seront donc analysés afin de permettre d'en tirer des

conclusions. La conclusion de cet essai permettra de déterminer comment appliquer la production de biodiesel en mode hétérotrophe dans un contexte comme celui du Québec.

# **1 MISE EN CONTEXTE**

La dépendance face aux combustibles fossiles dérivés du pétrole, tels l'essence et le diesel, principalement dans le secteur des transports, et la disponibilité de ces ressources non-renouvelables pour le futur ont entraîné des avancées dans la recherche sur les biocarburants. Ce chapitre vise à faire le point sur la consommation actuelle et future de carburants ainsi qu'à présenter certaines des caractéristiques et limites des biocarburants de première, deuxième et troisième génération.

## **1.1 Consommation globale de pétrole et perspective**

La consommation mondiale du pétrole, dont sont dérivés l'essence et le diesel, est en augmentation depuis plusieurs dizaines d'années. Le pétrole est une ressource non renouvelable et plusieurs prédictions quant à l'épuisement des réserves sont annoncées pour le futur.

### **1.1.1 La situation actuelle**

Les combustibles fossiles tels le pétrole lourd, le pétrole léger, le gaz naturel, le charbon et le propane sont des combustibles issus de la fossilisation de différents végétaux et animaux sous l'effet de la chaleur et de la pression interne de la croûte terrestre. Il s'agit d'un processus de formation de quelques centaines de milliers d'années. Ceux-ci sont présents en quantités limitées et fixes et sont donc non-renouvelables.

Depuis les cent dernières années, l'importante expansion de la croissance démographique et de l'économie de plusieurs pays a été accompagnée par une augmentation de la consommation des combustibles fossiles et une dépendance face à ces ressources. En effet, en 2006, la consommation mondiale de pétrole était chiffrée à environ 85 millions de barils par jour, dont environ 50 % de la consommation de carburants liquides provenait du secteur des transports (Energy Information Administration (EIA), 2009). L'EIA prévoit d'ailleurs que cette consommation mondiale aura atteint 106,6 millions de barils par jour en 2030 et que le secteur des transports serait alors responsable de 80 % de cette augmentation (EIA, 2009).

L'importante part du secteur des transports à l'augmentation de la consommation de carburants liquides comme l'essence et le diesel s'explique par le fait que ce secteur dépend à 97 % du pétrole et que, pour le moment, les solutions alternatives actuellement envisagées ne permettent pas une substitution importante et rapide du pétrole (Institut Français du Pétrole (IFP), 2008).

### **1.1.2 La demande future**

Puisque le pétrole est une énergie non-renouvelable, plusieurs scientifiques adhèrent à la théorie du pic pétrolier fondée sur un modèle élaboré en 1950 par M. King Hubbert selon laquelle la production de pétrole atteint son maximum pour ensuite tendre à diminuer progressivement (Beauregard-Tellier, 2006). Cependant, tous les scientifiques ne s'accordent pas quant à l'occurrence de ce pic. Certains croient que celui-ci arrivera vers 2010-2015 alors que d'autres comme l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) ne prévoient ce pic qu'après 2030 (Pimentel, 2008).

Les estimations faites par les scientifiques concernant l'épuisement éventuel du pétrole dépendent grandement des notions de réserves et de ressources. Les réserves prouvées représentent les quantités de pétrole pouvant être obtenues de gisements déjà découverts à partir des technologies existantes dans les conditions économiques et opérationnelles actuelles (IFP, 2005). Ces réserves seraient estimées à 1,342 milliards de barils (EIA, 2009). Les ressources, quant à elles, comprennent les gisements de pétrole découverts ainsi que non-découverts, mais dont les techniques actuellement disponibles n'en permettent pas la récupération. Selon les données avancées par l'EIA, un épuisement des réserves pourrait avoir lieu dans environ 43 ans, soit aux alentours de 2050 (EIA, 2009). Ces estimations ne tiennent toutefois pas compte de l'augmentation anticipée de la consommation de 44 % ni des ressources possiblement exploitables.

C'est donc en réponse à ces différents scénarios de crise pétrolière potentielle que plusieurs pays du monde investissent dans les programmes de recherche sur les énergies renouvelables, tels le bioéthanol et le biodiesel (Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE), 2007 et EIA, 2009). Ces scénarios se basent sur

l'augmentation de la demande provenant de l'Asie, sur la hausse du prix du baril de pétrole au cours des années ainsi que sur la pression grandissante due aux changements climatiques. Une croissance de la production de biocarburants de 8,6 % par année est anticipée d'ici 2030 (EIA, 2009). Dans le cas d'un prix du baril élevé, des technologies plus coûteuses pourront être utilisées, alors que si le prix demeure relativement peu élevé, seulement les technologies les moins dispendieuses et les plus efficaces pourront être utilisées.

## **1.2 Les biocarburants de première génération**

Les biocarburants sont des carburants utilisés en remplacement des combustibles fossiles pour alimenter des moteurs à combustion interne dans le secteur des transports. Ceux-ci sont produits à partir de ressources renouvelables telles que la biomasse végétale, les huiles végétales ainsi que les effluents municipaux et industriels. La distinction entre les biocarburants de première et de deuxième génération provient de la matière dont ceux-ci sont issus. Dans le cas des biocarburants de première génération, des produits alimentaires comme le maïs, la canne à sucre, la betterave sucrière et les huiles végétales sont utilisés, alors que les carburants de deuxième génération sont, quant à eux, issus de sources ligno-cellulosiques comme le bois, les feuilles, la paille et plusieurs autres.

Les deux principaux carburants de première génération utilisés dans le monde sont le bioéthanol, représentant 85 % du marché mondial des biocarburants et le biodiesel, représentant 15 % du marché (Tramoy, 2008). Le bioéthanol est produit par la fermentation de plantes riches en sucre et en amidon principalement aux États-Unis à partir du maïs et au Brésil à partir de la canne à sucre. Ces deux pays sont responsables de 91 % de la production mondiale de bioéthanol (Tramoy, 2008). Toutefois, plusieurs autres pays augmentent leur production comme la Chine, l'Union européenne et les pays d'Asie du sud et de l'est (OCDE, 2007). Le bioéthanol est utilisé comme additif à l'essence jusqu'à des proportions de 20 % sans avoir à modifier le moteur du véhicule. Il peut être utilisé à des proportions de 85 % et plus dans le mélange essence-éthanol pour un « Flexible Fuel Vehicle » (Gonzales, 2008).

Le biodiesel est obtenu par un procédé appelé transestérification par lequel les huiles réagissent avec un alcool (éthanol ou méthanol) afin d'obtenir des monoesters éthyliques ou méthyliques. Des huiles de palme, de soya et d'arachide peuvent être utilisées ou encore des graisses animales. Ces cultures produisent cependant très peu d'huiles pouvant être utilisées à la production de biodiesel, soit moins de 5 % de la biomasse totale de la culture en question (Chisti, 2007).

L'Union européenne est responsable de 90 % de la production mondiale de biodiesel qui peut être mélangé au gazole à des teneurs de 5 % à 30 % sans modifications du moteur (Tramoy, 2008). Il peut aussi être utilisé à 100 % en nécessitant l'emploi de joints particuliers dans les moteurs. L'utilisation de biodiesel correspond à approximativement 0,3 % de la demande totale en carburants pour le transport (Schenk et al., 2008). L'importante part de la production de biodiesel pour l'Union européenne est due à la prédominance de véhicules à moteur diesel (Kavolov et Peteves, 2004). D'ailleurs, la consommation mondiale de diesel augmente plus rapidement que celle de l'essence et tendra à augmenter dans le futur au détriment de l'essence (European commission, 2004).

Cependant, est-il possible de croire que ces biocarburants seront en mesure de remplacer les combustibles fossiles ? Selon différents experts, les biocarburants de première génération n'ont qu'un faible potentiel de remplacement, et ce, pour plusieurs motifs.

Tout d'abord, ceux-ci n'ont qu'une très faible densité énergétique comparativement aux sources d'énergie fossiles, ce qui implique que d'énormes superficies de terres devront être disponibles afin d'assurer un approvisionnement suffisant (OCDE, 2007). En effet, pour permettre de remplacer uniquement 4 % de la demande mondiale du secteur des transports en carburant, il serait nécessaire que les terres arables couvrent une superficie équivalente à celle de la France et l'Espagne (AIE, 2006). Un pays comme les États-Unis consomme 0,53 milliard de mètres cubes de diesel annuellement. Afin de satisfaire ces besoins, la culture du palmier, offrant les meilleurs rendements en huile, serait nécessaire sur une superficie de 111 millions d'hectares, soit 61 % de toutes les terres agricoles des États-Unis (Chisti, 2007). Ce besoin grandissant en terres arables est un facteur limitant pour la

production des biocarburants et a un impact considérable sur la déforestation. En Asie, entre 2000 et 2005, pratiquement 3 millions d'hectares de forêt ont été convertis par année pour la production d'huile de palme (Gonzales, 2008).

L'utilisation de cultures servant à l'alimentation humaine et animale pour la production de biocarburants soulève aussi plusieurs questions de nature éthique : est-il raisonnable d'utiliser des produits agricoles pour la production de biocarburants, alors que plusieurs personnes sont sous-alimentées dans le monde ? Ce phénomène est principalement observé dans les pays en voie de développement où plus de 800 millions de personnes souffrent de malnutrition et de faim (Schenk, 2008). L'utilisation des cultures servant à l'alimentation humaine a d'ailleurs entraîné une augmentation des prix de 75 % depuis 2005 pour les produits agricoles tel le maïs rendant ceux-ci moins accessibles pour tous (Gonzales, 2008).

La production de cultures servant à la production de biocarburants pourrait aussi entraîner les producteurs agricoles à favoriser certaines cultures plutôt que d'autres étant donné le prix plus élevé pouvant être obtenu. Les agriculteurs seront aussi davantage tentés de pratiquer la monoculture pour augmenter leur production pouvant entraîner des effets néfastes sur les sols comme l'érosion ainsi que la contamination des eaux de surface et souterraines due à l'augmentation de l'utilisation de fertilisants et pesticides.

Au cours des dernières années, le coût de production de l'éthanol dérivé de la canne à sucre se situait à environ 0,35 à 0,50 dollar US par litre d'équivalent essence, alors que celui du biodiesel dérivé d'huiles végétales se situait de 0,70 à 1,00 dollar US par litre d'équivalent diesel (OCDE, 2007). Le coût de production du bioéthanol est compétitif à celui du pétrole pour des prix du baril variant de 40 \$ à 60 \$ (Schenk et al., 2008). Pour que le biodiesel soit compétitif, le prix du baril doit être de 100 \$ (Schenk et al., 2008). Cependant, la production de biodiesel à partir d'huiles végétales a pratiquement atteint sa capacité maximale, ce qui ouvre le marché pour les biocarburants de deuxième et troisième génération (Schenk et al., 2008).

### **1.3 Les biocarburants de deuxième et troisième génération**

Les biocarburants de deuxième et troisième génération ont l'avantage de surmonter plusieurs des limitations soulevées par l'utilisation des biocarburants de première génération. La production d'éthanol à partir de matières lignocellulosiques ainsi que la production de biodiesel à partir des microalgues ont un potentiel intéressant de remplacement des carburants conventionnels.

#### **1.3.1 Éthanol cellulosique**

L'éthanol cellulosique est obtenu à partir de différents déchets agricoles et ligneux ainsi que d'arbres à croissance rapide comme la paille de blé et la canne de maïs, la bagasse de la canne à sucre, le panic raide, le peuplier, les sciures de bois et écorces, etc. En 2007, la production mondiale d'éthanol cellulosique représentait 0,1 % de la production totale d'éthanol (IEA/ Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD), 2008). L'augmentation de cette production à l'échelle mondiale est fortement dépendante des nouvelles technologies qui permettront de convertir la biomasse utilisée à des coûts moindres et plus efficaces.

La biomasse issue du bois ou de plantes fibreuses est composée de cellulose, de lignine et d'hémicellulose dans des proportions différentes tout dépendant du type de résidu utilisé. Les défis relatifs à l'obtention d'éthanol sont principalement dus à la présence de lignine qui agit comme un inhibiteur de l'hydrolyse et de la fermentation des sucres présents dans la cellulose et l'hémicellulose ainsi qu'à la difficulté d'hydrolyser la cellulose en glucose, en raison, principalement, de la rigidité de la liaison  $\beta$  1,4 glucosidique (IEA/OECD, 2008; Himmel, 2008).

La production d'éthanol peut se résumer en trois principales étapes, soit le prétraitement qui permet l'exposition de la cellulose et de l'hémicellulose pour ensuite réaliser l'hydrolyse. C'est l'hydrolyse enzymatique qui permet d'obtenir les sucres qui seront ensuite fermentés pour obtenir l'éthanol (Himmel, 2008).

Les programmes de recherche explorant les solutions les plus efficaces et rentables de production d'éthanol cellulosique reçoivent une aide substantielle des gouvernements, et ce, principalement aux États-Unis et au Canada. Mentionnons notamment la Chaire de recherche en éthanol cellulosique qui s'est vue accorder un soutien financier de 1,5 millions par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune afin de raffiner les procédés de production. La chaire de recherche peut compter sur l'appui de plusieurs partenaires comme Kruger, Ultramar, Éthanol Greenfield, Commodity Research Bureau (CRB) et Énerkem technologies. Le Dr.Chornet, directeur de la chaire, estime que l'éthanol cellulosique produit par les premières usines pilotes reviendra à 40 cents le litre et qu'une fois le procédé davantage maîtrisé, le coût diminuera de 40 à 50 % (Renaud, 2007).

Afin de permettre l'atteinte d'une efficacité économique, des programmes de recherche et développement doivent encore adresser certains points comme la nécessité de développer des installations permettant de traiter efficacement chaque type de biomasse selon les caractéristiques de chacune, évaluer la disponibilité des résidus, assurer la collecte, l'entreposage et le transport efficace de ceux-ci (Himmel, 2008). Les procédés utilisés doivent aussi permettre de faire diminuer les coûts de production de l'éthanol cellulosique pour assurer sa compétitivité par rapport au prix du baril de pétrole.

### **1.3.2 Les algocarburants**

Tel que discuté précédemment, les biocarburants de première génération ont un potentiel limité à remplacer les carburants d'origine fossile utilisés dans le transport. Cependant, depuis quelques années, les recherches ont permis des avancées dans de nouveaux domaines, tel celui de la production de biodiesel à partir des microalgues. Il semblerait d'ailleurs qu'il s'agisse du seul biocarburant permettant éventuellement de complètement remplacer le diesel, et ce, sans affecter les ressources alimentaires, la consommation d'eau et la détérioration des sols cultivables (Chisti, 2007). En effet, les microalgues possèdent plusieurs avantages dont l'importante capacité de production de biomasse par hectare, la fréquence de récolte très importante, la diminution de l'utilisation d'eau potable ainsi que celle d'émission de gaz à effet de serre.

Les microalgues et les cyanobactéries sont des organismes photosynthétiques qui utilisent la lumière du soleil comme source d'énergie pour fixer le dioxyde de carbone. Les lipides accumulés par les microalgues, pouvant atteindre jusqu'à 80 % de leur poids sec, sont principalement sous forme de triglycérides. Ces derniers peuvent ensuite être utilisés pour produire du biodiesel via une réaction appelée transestérification (Cadoret et Bernard, 2008; Chisti, 2007). Un des avantages de l'utilisation des microalgues pour la production de biodiesel est leur croissance extrêmement rapide puisque certaines espèces peuvent doubler leur biomasse de une à trois fois en 24 heures (Khan et al., 2009).

Les microalgues peuvent avoir un métabolisme autotrophe ou hétérotrophe. Les microalgues de métabolisme autotrophe utilisent le carbone inorganique, principalement le CO<sub>2</sub> comme source de carbone et la lumière comme source d'énergie, alors que les microalgues de métabolisme hétérotrophe doivent utiliser du carbone organique comme source de carbone et d'énergie.

Les microalgues ayant un métabolisme autotrophe sont principalement cultivées en bassins extérieurs, dans des photobioréacteurs ou encore grâce à des modèles hybrides permettant de conjuguer ces deux premières approches. Plusieurs éléments influencent l'efficacité des méthodes de culture utilisées, dont le choix des microalgues, la localisation et le climat. Pour assurer une efficacité en mode autotrophe, des températures moyennes d'au moins 15°C doivent être rencontrées ainsi que des conditions d'ensoleillement optimales. Celles-ci sont principalement retrouvées entre les 37° latitude nord et sud (Doré-Deschênes, 2009).

Les microalgues de métabolisme hétérotrophe sont principalement cultivées dans des bioréacteurs fermés en absence de rayonnement solaire. Les recherches effectuées à partir de ces microalgues permettent d'obtenir des résultats très concluants quant à leur utilisation pour la production de biodiesel. Des expérimentations réalisées en utilisant l'espèce *Chlorella* ont permis d'obtenir des rendements de 50 g en lipides/litre/semaine (Doré-Deschênes, 2009). Les technologies de production de biodiesel à partir des microalgues ayant un métabolisme hétérotrophe sont plus performantes de 500 à 1000 fois

que les cultures terrestres, tandis que des résultats pour les microalgues de métabolisme autotrophe ont permis des résultats dix fois supérieurs (Doré-Deschênes, 2009). Cependant, les microalgues en mode hétérotrophe nécessitent un apport en hydrates de carbone suffisant, abordable, et ce, provenant d'une source abondante et dont l'approvisionnement est stable.

Étant donné que les microalgues en mode hétérotrophe représentent un potentiel très intéressant pour la production de biodiesel et que leur croissance est indépendante des conditions d'ensoleillement et du rayonnement solaire, il s'agit d'une alternative intéressante à appliquer en milieu nordique.

## **2 CARACTÉRISTIQUES DES MICROALGUES**

Il existe plusieurs espèces microalgales possédant un métabolisme hétérotrophe. Celles-ci se distinguent toutefois de par leurs caractéristiques nutritionnelles et leur capacité à produire des acides gras pouvant servir à la production de biodiesel. Ces caractéristiques seront donc présentées dans cette section. Les nombreuses méthodes de culture, de récolte et d'extraction seront également discutées afin de permettre une compréhension générale des techniques de production utilisées.

### **2.1 Modes de nutrition des microalgues**

Les microalgues sont largement et principalement connues comme étant des organismes photoautotrophes. L'autotrophie est un mode de nutrition des microalgues leur permettant d'utiliser les rayons solaires afin de synthétiser leur énergie. Les microalgues de métabolisme autotrophe utilisent également une source de carbone inorganique comme le  $\text{CO}_2$  et le  $\text{HCO}_3^-$  pour la synthèse du carbone organique (Stevenson et al., 1996). Ce carbone organique est essentiel à la synthèse de toutes les composantes organiques nécessaires à leur survie. D'autre part, plusieurs microalgues ont un métabolisme hétérotrophe de nutrition et celles-ci n'ont pas besoin de l'énergie solaire. Elles utilisent plutôt une source de carbone organique pour la production de l'énergie et des composants organiques.

Les microalgues de métabolisme mixotrophe peuvent, soit avoir un métabolisme autotrophe, ou encore hétérotrophe. En effet, en absence d'énergie lumineuse, lorsqu'une source de carbone organique est disponible, le développement des chloroplastes est inhibé et ces microalgues métabolisent leur énergie en mode hétérotrophe (Stevenson et al., 1996). Le tableau 2.1 présente les différents types nutritionnels des algues.

Tableau 2.1 : Les différents types nutritionnels des microalgues

Mode de nutrition	Source d'énergie	Source de carbone
Photoautotrophe	Radiation solaire	CO <sub>2</sub> seulement
Photohétérotrophe	Radiation solaire	CO <sub>2</sub> et carbone organique
Chemoautotrophe	Composé inorganique	CO <sub>2</sub>
Chemohétérotrophe	Composé organique	Carbone organique

Le mode de culture des microalgues à métabolisme hétérotrophe possède plusieurs avantages en permettant d'améliorer la productivité et la densité des microalgues (Chen, 1996; Rosenberg et al., 2008). En effet, les algues photoautotrophes ont tendance à produire moins d'huiles et celles qui en produisent beaucoup démontrent de faibles taux de croissance. De plus, étant donné que les systèmes de culture utilisés pour ces algues se caractérisent souvent par un manque de lumière, la synthèse d'acides gras peut en être affectée (Green car congress, 2009).

Les microalgues à utiliser pour la production hétérotrophe doivent posséder certaines caractéristiques. Parmi ces caractéristiques, notons la capacité de croissance en absence de lumière, la croissance à partir de médias peu coûteux, une bonne capacité d'adaptation, une importante production d'huiles et la capacité de surmonter le stress provoqué par l'utilisation de bioréacteurs (Chen et al., 2003).

## 2.2 Classification des algues

Les microalgues sont très rarement regroupées en fonction de leur métabolisme énergétique ou encore en fonction de leur habileté à synthétiser les métabolites nécessaires, mais plutôt en fonction de leurs propriétés morphologiques (Fogg, 1953). Il existe donc différentes classes taxonomiques de microalgues dont les principales sont les cyanophycées, les chrysophycées, les rhodophycées, les euglenophycées, les chlorophycées et les bacillariophycées.

### **2.2.1 Les Cyanophycées (algues bleues-vertes)**

Les cyanophycées ou algues bleues-vertes sont des algues procaryotes très répandues ne possédant aucun noyau dont environ 7 500 espèces sont connues à ce jour (Wikipédia, 2009a). Elles sont habituellement de petites tailles, soit 10 µm ou moins, et peuvent être retrouvées dans pratiquement tous les habitats (eaux fraîches, eaux salées, eaux saumâtres et sols) étant donné leur aptitude à résister à des températures extrêmes et leur résistance à la dessiccation (Lechevalier et al., 1977). Cependant, la majorité des algues bleues-vertes ont des températures optimales de croissance de 32 à 35°C (Lechevalier et al., 1977). La principale restriction des cyanophycées provient du fait que ces dernières nécessitent la présence de lumière pour leur croissance et sont donc principalement des organismes autotrophes obligatoires. Certaines espèces seraient toutefois en mesure d'oxyder certains sucres en absence de lumière (Wikipédia, 2009a). Les cyanophycées emmagasinent principalement leur énergie sous forme d'amidon (amylose et amylopectine) ou encore sous forme d'huiles (Lechevalier et al., 1977).

### **2.2.2 Les Chrysophycées (algues dorées)**

Les chrysophycées ou algues dorées sont généralement présentes dans les eaux douces. Cette classe est représentée par 150 genres et environ 800 espèces. Le mode de nutrition de ces algues est très varié, mais certaines d'entre elles possèdent un mode de nutrition hétérotrophe comme *Ochromonas danica* qui comprend un pourcentage de 27,4 % en acides gras et dont la source de carbone assimilée est le glucose (Lechevalier et al., 1977).

### **2.2.3 Les Rhodophycées (algues rouges)**

Il existe près de 4 000 espèces d'algues rouges qui sont retrouvées dans les eaux saumâtres et salées et très rarement dans les eaux douces. Comme les phaeophycées, cette classe ne comprend aucune algue de métabolisme hétérotrophe et la plupart d'entre elles sont photoautotrophes ou photoorganotrophes (Lechevalier et al., 1977). Bien que certaines espèces contiennent des acides gras, leur utilisation pour produire du biodiesel en absence de lumière ne semble pas envisageable.

#### **2.2.4 Les Euglenophycées**

Il existe plus de 800 espèces d'euglenophycées qui sont retrouvées généralement dans les eaux saumâtres et douces. Les principales réserves de ces algues sont constituées de paramylon, une substance glucidique, et d'huiles. Les études réalisées à partir des euglenophycées démontrent que celles-ci possèdent une nutrition complexe et qu'il est difficile de définir des besoins nutritionnels communs pour plusieurs espèces. Une espèce en particulier, *Euglena gracilis*, peut croître en mode autotrophe et hétérotrophe (Lechevalier et al., 1977). Lorsque cultivée en absence de lumière, un substrat contenant acétate, acides organiques, alcool ou sucres peut être utilisé. Cette espèce possède d'ailleurs un intérêt particulier quant à la production d'acides gras.

#### **2.2.5 Les chlorophycées (algues vertes)**

Les chlorophycées sont retrouvées dans tous les types d'habitat et l'amidon et l'huile constituent leurs principales réserves énergétiques. Parmi ce groupe, plusieurs microalgues possèdent un métabolisme photoautotrophe, photohétérotrophe et chemohétérotrophe. L'espèce la plus étudiée possédant un métabolisme chemohétérotrophe est *Chlorella vulgaris*. Cette espèce est très intéressante pour la production de biodiesel en raison de son pourcentage intéressant en acides gras. Les principales sources de carbone assimilables le sont sous forme de sucres et d'acide acétique. D'autres espèces faisant partie de cette classe ont un potentiel intéressant pour la production d'algocarburants dont notamment l'espèce *Chlorella protothecoides*.

#### **2.2.6 Les bacillariophycées (diatomées)**

Les diatomées représentent souvent le groupe dominant de microalgues parmi les populations de phytoplancton et sont extrêmement répandues dans tous les types d'habitat. En effet, plus de 100 000 espèces sont connues et il en existerait plus de un million (Wikipédia, 2009b). Celles-ci sont unicellulaires et mesurent de 2 µm à 1 mm (Wikipédia, 2009b). Les diatomées emmagasinent leurs réserves sous forme de chrysolaminaran, un polysaccharide, ainsi que d'huiles. Elles sont d'ailleurs reconnues pour leur contenu en acides gras et pendant plusieurs années, les scientifiques croyaient que les lipides représentaient le seul composé de réserve (Werner, 1977). Les composants majeurs de ces

lipides sont les triglycérides. Les microalgues telles que *Nitzschia sp.* et *Navicula pelliculosa* sont intéressantes pour la production de biodiesel en mode hétérotrophe étant donné l'importance du pourcentage en acides gras (tableau 2.2).

Parmi les espèces de diatomées, plusieurs possèdent un métabolisme hétérotrophe obligatoire ou encore facultatif (principalement les diatomées pennales), alors que certaines autres possèdent plutôt un métabolisme photohétérotrophe (principalement les diatomées centriques) (Werner, 1977). Les diatomées possédant un métabolisme hétérotrophe ou encore mixotrophe sont très diversifiées quant au taux d'assimilation des hydrates de carbone ainsi qu'au type d'hydrate de carbone utilisé (Werner, 1977). Les substrats organiques favorisant leur croissance varient, alors que la présence de vitamines semble être essentielle pour la plupart des diatomées.

Parmi les principales classes ou phylums, certaines espèces de microalgues possèdent un potentiel intéressant pour la production de biodiesel en raison de leur importante production d'acides gras. Ces principales espèces sont présentées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Principales espèces de métabolisme hétérotrophe pour la production de biodiesel

Phylum ou Classe	Espèce	Contenu en huiles (% poids sec)	Référence
Chlorophycées	<i>Chlorella vulgaris</i>	56,6	Qiang et al., 2008; Li et al., 2008
Chlorophycées	<i>Chlorella protothecoides</i>	44,3-48,7	Li et al., 2007
Bacilliarophycées	<i>Nitzschia sp.</i>	45-47	Khan et al., 2009; Meng et al., 2009
Dinoflagellées	<i>Cryptocodinium</i>	20-30	Khan et al., 2009; Barclay et al., 1993
Chrysophycées	<i>Schyzochytrium</i>	50-77	Khan et al., 2009; Meng et al., 2009

### **2.3 La nutrition des microalgues de métabolisme hétérotrophe et mixotrophe**

Les microalgues de métabolisme hétérotrophe et mixotrophe doivent être en présence d'un substrat organique pour assurer leur croissance. Il serait possible de croire que celles-ci peuvent utiliser n'importe quelle source d'hydrates de carbone pour remplacer le rayonnement solaire en tant que source d'énergie pour leur métabolisme, alors que tel n'est pas le cas. En effet, certains substrats sont en mesure de supporter la croissance de certaines espèces alors que ces mêmes substrats sont inefficaces pour d'autres espèces. De plus, certains composés chimiquement similaires ne favorisent pas nécessairement la croissance d'une espèce microalgale donnée (Lewin, 1962).

De façon générale, les hydrates de carbone pouvant être assimilés par la plupart des microalgues sont principalement des monosaccharides tel le glucose (Lewin, 1962). Certaines espèces sont aussi en mesure d'assurer leur croissance à partir de disaccharides, d'acétate, de glycérol et de certains acides intermédiaires du cycle de Krebs (Wageningen University, 2009). Dans la littérature consultée, certaines espèces utiliseraient aussi pour leur croissance des polysaccharides comme l'amidon (Wen et Chen., 2003). Les microalgues, pour pouvoir assimiler les hydrates de carbone, doivent posséder un système de transport à haute affinité. Certains travaux réalisés à cet effet permettent de croire qu'il existe différents systèmes de transport :

- la diffusion passive qui n'exige aucune dépense énergétique;
- le transport actif via la présence d'un gradient de concentration à travers la membrane;
- le transport ainsi que la fixation par une enzyme transmembranaire (Lewin, 1962).

Le tableau 2.3 présente des principaux hydrates de carbone utilisés pour la croissance de certaines microalgues de métabolisme hétérotrophe ou mixotrophe intéressantes pour la production de biodiesel.

Tableau 2.3 : Sources de carbone assimilables pour certaines espèces de microalgues

Espèces	Source de carbone organique
<i>Chlorella vulgaris</i> (Métabolisme mixotrophe)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Glucose, fructose, galactose, acide acétique, acétate, glycérol (Lewin, 1962; Wolfgang, 1994; Liang et al., 2009).</li> </ul>
<i>Cryptocodinium sp.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Croissance favorisée par l'utilisation de glucose (5-20 g/L), d'acide acétique (le plus efficace pour la biomasse et la concentration en huiles) ou de galactose (De Swaaf, 2003).</li> </ul>
<i>Chlorella protothecoides</i> (Métabolisme mixotrophe)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Glucose principalement et acétate (Xu et al., 2006).</li> <li>• Par exemple, des essais en bioréacteurs de 11 000L à partir d'une concentration de glucose de 200 g/L ont permis d'obtenir un rendement en biomasse de 14,2 g/L et un pourcentage en lipides de 44 % (Li et al., 2007).</li> <li>• Hydrolysats de topinambour (30 g/L de sucre) pourcentages en huiles de 43-46 % (Cheng et al., 2008).</li> <li>• Hydrolysats de jus de canne à sucre (concentrations de 30 g/L) Le ratio de conversion sucre/biomasse et sucre/huiles était supérieur de 15,2 % et 8,8 % respectivement à celui contenu à partir du glucose. Le plus important contenu en huiles obtenu était de 53 % (poids sec) (Cheng et al., 2009; Green car congress, 2009)</li> </ul>
<i>Nitzschia sp.</i> (Métabolisme mixotrophe)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Glucose principalement.</li> <li>• <i>N.laevis</i> serait en mesure d'utiliser du glutamate.</li> <li>• <i>N.alba</i> serait en mesure d'utiliser la cellulose comme source de carbone organique, mais à un faible taux de croissance (Werner, 1977).</li> </ul>
<i>Schizochytrium sp.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Croissance plus importante à partir de glucose (5 g/L), mais aussi à partir d'acétate (1 g/L) (Vazhappilly et Chen, 1998).</li> </ul>

Les microalgues ont aussi besoin, pour leur croissance, d'une source d'azote qui peut être utilisée sous forme de nitrate, d'ammoniac, d'urée ou encore d'extrait de levure (Wolfgang, 1994). Cependant, des conditions de carence en azote sont connues pour stimuler la synthèse de lipides tout comme une carence en silice induit le même phénomène chez les diatomées (Cadoret et Bernard, 2008). Ces conditions de carence ne doivent toutefois pas être maintenues trop longtemps puisqu'elles peuvent éventuellement entraîner une consommation des lipides synthétisés.

Le phosphore représente aussi un nutriment majeur pour la croissance des microalgues étant donné son implication dans plusieurs processus cellulaires comme les transferts d'énergie et la synthèse d'acides nucléiques et de phospholipides. Ce phosphore est principalement assimilé sous forme inorganique ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ou  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) (Barsanti et Gualtieri, 2006). Des limitations en phosphore seraient responsables d'une augmentation de la synthèse de triacylglycérols chez certaines espèces tout comme des limitations en soufre permettraient une telle augmentation chez *Chlorella sp.* (Qiang Hu et al., 2008). Le soufre ainsi que le potassium sont aussi des éléments vitaux pour les microalgues, alors que d'autres comme le fer, le manganèse et le molybdène ne doivent être présents qu'en très infime concentration.

## **2.4 La production de biodiesel à partir des microalgues de métabolisme hétérotrophe**

Le biodiesel est produit actuellement par certaines compagnies, et ce, en mode hétérotrophe. Les techniques utilisées diffèrent tant au niveau de l'alimentation en substrat qu'au niveau des techniques de récolte et d'extraction. Les principaux joueurs ainsi que les techniques les plus couramment utilisées seront présentés.

### **2.4.1 Les principaux joueurs**

Depuis 2007, plusieurs investissements ont été réalisés pour la production de biocarburant à partir des microalgues. Ces contributions de plus de 1 milliard de dollars ont permis une croissance importante des différentes technologies et stratégies de production de biodiesel (Algae 2020, 2009). Il existe en effet plusieurs méthodes permettant la production d'algocarburants, soit en bassins extérieurs, en

photobioréacteurs, en fermenteurs ou encore via l'utilisation de systèmes hybrides. Les programmes de recherche et entreprises à travers le monde sont nombreux : des dizaines d'entreprises sont nées aux États-Unis en 2007 (Lefebvre et al., 2007). Bien que la plupart de celles-ci se concentrent principalement sur la production de biodiesel à partir de microalgues de métabolisme autotrophe, quelques-unes d'entre elles utilisent plutôt les microalgues de métabolisme hétérotrophe. Cependant, malgré toutes les sommes investies dans la R-D, aucune de ces entreprises n'a été en mesure, à venir jusqu'à date, de produire du biodiesel à l'échelle commerciale.

Parmi les projets utilisant les microalgues de métabolisme autotrophe, les principaux projets en bassins extérieurs sont Sapphire Energy et Petro Sun. Sapphire Energy utilise notamment la manipulation génétique d'algues afin d'inclure à celles-ci une résistance à l'utilisation de pesticides. Ceux-ci assurent un rendement maximal par l'utilisation de pesticides permettant de contrôler l'envahissement des bassins par des espèces indigènes non-désirées (Nathan, 2008). Ce projet est subventionné à raison de plusieurs millions notamment par l'organisme Wellcome Trust.

Les projets Solix et Green Fuel utilisent des technologies de production du biodiesel à partir de microalgues cultivées en photobioréacteurs (Solix, 2009; Greenfuel, 2009). Le projet Cellana, quant à lui, créé d'un partenariat entre les compagnies Shell et HR Biopetroleum, se spécialise dans la technologie hybride (Nathan, 2008). Les principaux projets utilisant des microalgues de métabolisme hétérotrophe sont les projets Solazyme et Fermentalg.

- Solazyme

Solazyme est une compagnie de San Francisco qui a été fondée en 2003. Elle se spécialise dans la production de biodiesel à partir de microalgues de métabolisme hétérotrophe, mais aussi dans la production de cosmétiques, de nutraceutiques et d'aliments à partir des coproduits générés lors de la production de biodiesel (Solazyme, 2009). Les microalgues sont cultivées dans des fermenteurs traditionnels caractérisés par l'absence de lumière en fournissant l'énergie nécessaire à leur croissance sous forme

d'hydrates de carbone. Ces hydrates de carbone proviendrait de la biomasse agricole et industrielle (résidus cellulosiques, amidon, glycérine, sucres) et le processus de fermentation et d'extraction utilisé serait unique dans le domaine (Solazyme, 2008; Semaska, 2008). Solazyme utilise principalement les techniques de manipulations génétiques afin d'optimiser son procédé et ainsi assurer une production maximale de triglycérides par les microalgues sélectionnées.

Depuis 2008, Solazyme, Chevron, la deuxième plus importante compagnie pétrolière américaine, et Imperium Renewables se sont associés afin de développer un procédé industriel relatif à la production de biodiesel (Semaska, 2008). C'est d'ailleurs en juin 2008 que Solazyme s'est vue accorder le prix de l'entreprise de technologies vertes la plus prometteuse et qu'en septembre de la même année, elle annonçait être la première compagnie à produire un kérosène à partir de microalgues. Ce kérosène, suite à une analyse, a été décrété conforme aux normes les plus exigeantes de l'American Society for Testing and Materials (ASTM).

En septembre 2009, Solazyme a été sélectionnée par l'US Department of Defense (DOD) afin de produire un algocarburant Soladiesel ®F-76 pour la marine. Ce soladiesel aurait déjà été produit et remis au ministère de la défense et aurait d'ailleurs obtenu la certification Navy F-76. Solazyme devra donc livrer 74 000 litres pour 2010 afin de débiter les tests de compatibilité (Rousseau, 2009; Baudu, 2009).

C'est aussi en 2009 que la compagnie a pu compter sur l'appui financier supplémentaire de nouveaux investisseurs tels Braemar Energy Ventures, Harris & Harris Group, Lightspeed Venture Partners, Roda Group et Vantage Point Venture Partners pour un total d'environ 57 millions de dollars (Voith, 2009). Solazyme prévoit utiliser ces investissements dans la phase de commercialisation de son procédé.

- Fermentalg

Fermentalg, une entreprise Libournaise créée en 2008, se spécialise aussi dans la production de biodiesel à partir de microalgues cultivées en absence de lumière dans des

fermenteurs. Un substrat carboné de type sucre est fourni aux microalgues pour leur croissance. En effet, Fermentalg s'approvisionne notamment auprès des sucriers, ce qui permet de recycler les déchets et les sous-produits de cette industrie (Lutzky, 2009). Cette entreprise utiliserait aussi les techniques dans le domaine de la sélection et de l'ingénierie génétique de souches de microalgues particulièrement performantes.

Parmi ses principaux investisseurs, Fermentalg peut compter sur l'appui du fonds de capital-risque Emertec, mais aussi, pour plus de 2 millions d'euro, par l'appui de CEA Valorisation, Picoty et le fonds régional Aquitaine Création Innovation (Lutzky, 2009). Fermentalg se prépare d'ailleurs à son passage à la production industrielle en menant des projets pilotes au sein de son laboratoire. En 2009, elle prévoit cultiver les microalgues en fermenteurs de 250 litres pour ensuite utiliser un réservoir de cinq mètres cubes en 2010. Afin de permettre le financement de ses activités, l'entreprise vise deux marchés complémentaires à la production de biodiesel, soit la production de biomasse pour l'aquaculture et la production de substituts aux huiles de poisson (cosmétologie et compléments alimentaires).

Selon plusieurs visites et entrevues, l'introduction de petits projets à l'échelle commerciale devrait débuter en 2011 avec une prédiction de production d'environ 1 million de gallons, et ce, principalement grâce aux start-up Solazyme et Sapphire (Algae 2020, 2009). De 2012 à 2015, plusieurs joueurs devraient entrer dans la course pour la production d'algocarburants à l'échelle commerciale pour ensuite permettre, vers 2015, une maturation des produits issus des algocarburants (Algae 2020, 2009).

#### **2.4.2 Modes de production**

Les microalgues de métabolisme hétérotrophe sont cultivées dans des bioréacteurs appelés aussi fermenteurs (figure 2.1). Les fermenteurs principalement utilisés pour la production industrielle de microalgues ont un volume de 80 à 200 m<sup>3</sup>. Ce mode de production possède plusieurs avantages comparativement à ceux utilisés pour les microalgues de métabolisme autotrophe (bassins extérieurs, PBR ou hybrides). En effet, la production en bioréacteurs est bien maîtrisée et connue tant au niveau du mode opérationnel qu'au niveau de ses caractéristiques. Elle permet aussi d'obtenir un meilleur

rendement en biomasse algale (20 à 100 g/L) comparativement aux systèmes en bassins ouverts (0,5 à 1,0 g/L) (Pienkos et Darzins, 2009; Borowitzka, 1998). Un meilleur rendement en biomasse permet une diminution des coûts de récolte (Borowitzka, 1998). Cette croissance maximale des microalgues est facilement maintenable étant donné la possibilité de contrôler les conditions de croissance efficacement comme le pH, la concentration en oxygène, la température et l'agitation (Wageningen university, 2009). Les problématiques de contamination par d'autres espèces rencontrées par la culture en bassins extérieurs peuvent aussi être éliminées grâce à la stérilisation du bioréacteur et en prenant les mesures nécessaires pour que la solution utilisée soit stérile (Chen, 1996).



Figure 2.1 : Fermenteur expérimental de 3 m<sup>3</sup> (Wageningen University, 2009).

Il existe plusieurs procédés d'alimentation en substrat des bioréacteurs. Le premier est un mode d'alimentation appelé non-continu ou fonctionnant en "batch" ou en cuvée. Pour ce mode, le substrat, riche en hydrates de carbone et autres, est introduit une seule fois au début de la réaction. Une fois le substrat consommé par les microalgues, celles-ci seront récoltées. Lors de la culture non-continue, des concentrations initiales importantes de substrat sont requises, alors que les microalgues ne peuvent tolérer que des concentrations relativement peu élevées (Chen et Johns, 1994).

Le second type d'alimentation en substrat est dit en continu, ce qui signifie que le substrat est introduit continuellement permettant ainsi que la concentration demeure constante. Pour permettre un volume constant à l'intérieur du bioréacteur, un volume équivalent à

celui ajouté doit être récolté. Cette opération peut se dérouler jusqu'à ce qu'il y ait des problèmes de contamination par certaines bactéries, de dénaturation des microalgues ou encore une contamination par la production de toxines. Le bioréacteur devra alors être stérilisé à nouveau.

Le dernier type d'alimentation en substrat est appelé semi-continu ou "fed-batch". Cette façon de procéder consiste à introduire de façon continue le substrat nécessaire à la croissance via une pompe d'alimentation. Cependant, une fois la capacité maximale du bioréacteur atteinte, il est nécessaire de récolter les microalgues. Le type d'alimentation en semi-continu est celui le plus utilisé puisqu'il permet d'atteindre des densités en biomasse algale plus importantes. Il minimise aussi les effets d'inhibition possibles dus aux concentrations initiales élevées en hydrates de carbone apportées par une alimentation en continu et son opération est relativement simple (Chen, 1996). Le tableau 2.4 présente quelques caractéristiques des systèmes utilisés fréquemment pour la culture des microalgues.

Tableau 2.4 : Caractéristiques des systèmes employés pour cultiver les microalgues. Adapté de Chen et Johns (1994).

	Coût	Opération	Densité	Inhibition du substrat
Non-continu	Bas	Simple	Basse	Significatif
Continu	Modéré	Modéré	Modéré	Modéré
Semi-continu	Modéré	Simple à Modéré	Modéré	Modéré

### 2.4.3 La récolte des algues

La récolte des microalgues représente un facteur économique important pour la production de biodiesel puisqu'il s'agit d'une étape limitante dans la production de biocarburants. Certaines estimations permettent de conclure que la récolte représente de 20 à 30 % du coût total de production du biodiesel (Pienkos et Darzins, 2009). Ces coûts importants sont dus, entre autres, au très petit diamètre des algues (de 2 à 20  $\mu\text{m}$  de diamètre) ainsi qu'à la faible concentration en biomasse atteinte dans les technologies de

production (Li et al., 2008). Présentement, les techniques de récolte utilisées sont éprouvées depuis plusieurs années. Étant donné leur coût élevé, elles peuvent davantage servir à l'obtention de produits ayant une valeur de revente plus importante tels les nutraceutiques. Les défis les plus importants sont donc de permettre d'atteindre une concentration importante de microalgues, et ce, en utilisant de nouvelles techniques efficaces et peu coûteuses.

La biomasse algale peut être concentrée en utilisant diverses méthodes comme la centrifugation, la filtration, la floculation et la flottation. La filtration nécessite l'utilisation d'une membrane de cellulose modifiée ainsi que d'une pompe. Les microalgues de très faible densité peuvent ainsi être retenues par la membrane. Cependant, cette technique est limitée par le volume traité puisque la succion exercée par la pompe entraîne fréquemment l'obstruction de la membrane (Oilgae, 2009). Certaines techniques peuvent par contre être utilisées afin d'éviter cette problématique, soit l'utilisation d'une pompe exerçant une pression au-dessus du filtre. Cette façon de faire permet de traiter des volumes plus importants tout comme l'utilisation de couteaux rotatifs pour prévenir l'agglomération ou encore par l'utilisation d'un "microstrainer" rotatif (Figure 2.2). La biomasse algale pénètre par le centre et est récoltée grâce à un procédé similaire à la centrifugation. Par contre, la technique de filtration est applicable principalement pour les microalgues formant des colonies (Lee et al., 2008).



Figure 2.2 : « Microstrainer » rotatif utilisé pour la récolte des microalgues (Oilgae, 2009).

La centrifugation permet de concentrer les microalgues d'une solution initiale ayant une concentration en biomasse de 10 à 20 g/L en une pâte de 100 à 200 g/L (Schenk et al.,

2008). Cette méthode nécessite l'utilisation d'une centrifugeuse qui fonctionne par rotation autour d'un axe principal, ce qui permet d'exercer une force perpendiculaire à cet axe et de récolter les algues ayant une densité plus importante que le substrat de croissance (Oilgae, 2009). Cette technique est toutefois considérée comme étant trop dispendieuse et énergivore pour la production d'algocarburants (Schenk et al., 2008).

La floculation et l'autofloculation sont aussi des méthodes communément utilisées pour concentrer les microalgues. La floculation est réalisée grâce à l'ajout de floculants tels le chlorure d'aluminium et de fer. Ces floculants permettent l'agglomération de la biomasse algale qui, étant donné sa densité plus élevée, précipitera et pourra être facilement récoltée. L'usage de floculants pose toutefois certains problèmes étant donné leur coût élevé et en raison de l'impossibilité d'utiliser la biomasse récoltée à partir de composés chimiques pour générer des coproduits (Shenk et al., 2008; Lee et al., 2008). Un autre floculant organique pouvant être utilisé et permettant la génération de coproduits à partir de la biomasse résiduelle est la chitine. Son utilisation est beaucoup plus efficace, mais est aussi plus dispendieuse que celle des floculants chimiques. L'autofloculation consiste en l'induction d'un stress tels un pH extrême, une augmentation ou diminution de la température optimale ainsi qu'une modification de la concentration en nutriments qui entraîneront une floculation de façon naturelle des microalgues (Shenk et al., 2008). Cette technique est peu coûteuse et potentiellement intéressante, mais le temps nécessaire à l'autofloculation des microalgues est très variable et peut être très long chez certaines espèces (Lee et al., 2008). Elle devra d'ailleurs être développée pour chaque espèce, souche et même selon le procédé de culture utilisé pour en améliorer l'efficacité (Benemann, 2009).

La floculation microbienne représente également une technique pouvant être utilisée. Lorsque soumis à un stress, certains microorganismes produisent des substances polymériques extracellulaires qui peuvent être utilisées pour appliquer dans un procédé de floculation des microalgues. Cette technique n'entraîne pas de changements dans la composition cellulaire des microalgues ni de contamination chimique. De plus, la glycérine peut être utilisée comme substrat organique pour la croissance bactérienne et il

s'agit d'un résidu généré lors de la production de biodiesel. Cependant, d'autres avancées seraient nécessaires afin d'optimiser ce processus (Lee et al., 2008).

La flottation nécessite l'ajout d'agents flocculants. Cette technique consiste en la création de bulles d'air qui viendront s'attacher aux microalgues et qui permettront ainsi à celles-ci de flotter à la surface grâce au principe de gravité. Elles pourront ensuite être récoltées. Il existe plusieurs procédés de flottation tout dépendant de la technique qui est utilisée pour produire les bulles d'air. Cette technique est toutefois encore trop dispendieuse pour un usage commercial (National Renewable Energy Laboratory (NREL), 1984).

Avant de procéder à l'extraction des huiles, il est parfois nécessaire de recourir au séchage de la biomasse qui est, encore une fois, une étape très énergivore (Cadoret et Bernard, 2008). C'est pour cette raison qu'il est préférable d'utiliser des techniques d'extraction à partir de biomasse humide. La sélection de la technique à utiliser pour la récolte des microalgues devra dépendre de certains facteurs tels que la valeur du produit à récupérer, la concentration en biomasse ainsi que le diamètre des microalgues (Li et al., 2008).

#### **2.4.4 L'extraction des huiles**

Il existe plusieurs méthodes permettant l'extraction des huiles microalgales. Cependant, ces techniques sont encore une fois très dispendieuses et représentent 50 % du coût total de production et 90 % de la consommation totale énergétique lorsque l'extraction nécessite une étape préliminaire de séchage (Lardon et al., 2009). En effet, il est estimé que le plus faible coût pour l'huile extraite de biomasse se situe à environ 2,80 \$/Litre, alors que l'huile de palme se vendait à 0,52 \$/Litre en 2006 (Chisti, 2007). Les principales techniques utilisées sont peu nombreuses pour le moment et requièrent l'utilisation, soit de méthodes physiques ou encore chimiques.

Le pressage mécanique est une technique physique utilisée suite au séchage de la biomasse algale. Elle permet de récupérer de 70 à 75 % de l'huile contenue dans les algues et est fréquemment utilisée en combinaison avec l'extraction par l'utilisation de solvants. Certains solvants comme le benzène peuvent être utilisés, alors que l'hexane est

celui le plus fréquemment utilisé en raison, notamment, de son faible coût. C'est donc suite au pressage qu'une solution de cyclohexane peut être ajoutée pour extraire les huiles résiduelles. La séparation du solvant et des huiles est réalisée par distillation. La combinaison de ces deux techniques permet d'atteindre une efficacité de récupération de 95 %. L'extraction des huiles en utilisant l'hexane peut aussi être réalisée seule comme unique technique d'extraction.

L'utilisation du CO<sub>2</sub> comme solvant permet aussi la récupération des huiles et il s'agit d'une méthode particulièrement efficace qui permet de récolter approximativement 100 % de l'huile. Afin de permettre au CO<sub>2</sub> d'agir comme un solvant, celui-ci est liquéfié par l'application d'une pression importante et chauffé afin que celui-ci puisse posséder les caractéristiques d'un gaz et d'un liquide simultanément. Cette technique d'extraction au CO<sub>2</sub> supercritique nécessite toutefois des appareils particuliers afin que la pression puisse être maintenue.

L'extraction enzymatique est réalisée par l'utilisation d'enzymes qui permettront de dégrader les parois cellulaires des algues. Cette réaction est toutefois plus dispendieuse que celle à partir de l'hexane.

Le choc osmotique consiste à provoquer une réduction de la pression osmotique, ce qui permettra une rupture des parois cellulaires des microalgues (Oilgae, 2009). Pour ce faire, un réacteur à ultrasons est nécessaire. L'action des ultrasons dans les milieux liquides entraîne la création de bulles suite à l'exposition à l'onde de pression osmotique. Il s'agit du phénomène de cavitation. Lorsque ces bulles entrent en collision avec une surface solide, il y a implosion et décapage de la surface solide (Figure 2.3). Cette technique permet donc de briser les parois des microalgues pour permettre d'en libérer le contenu.

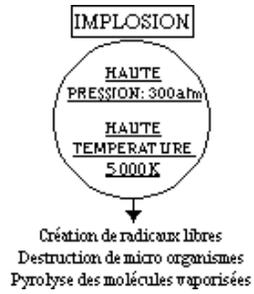


Figure 2.3 : Phénomène d'implosion créé par le principe de cavitation (Sinaptec, 2009).

Plusieurs travaux de recherche et développement sont réalisés quant à la production de biodiesel à partir des microalgues. Cependant, le parent pauvre de ces efforts de recherche semble être celui portant sur les techniques d'extraction des huiles, alors qu'il s'agit d'une étape cruciale affectant la rentabilité du procédé (NREL, 1998).

### 3 SOURCES POTENTIELLES DE MATIÈRES ORGANIQUES

La biomasse lignocellulosique est reconnue depuis longtemps comme étant une source potentielle très intéressante pour l'obtention de sucres pouvant être fermentés en éthanol. Cependant, les sucres obtenus de la biomasse peuvent aussi être utilisés par les microalgues de métabolisme hétérotrophe pour assurer leur croissance et permettre la production de biodiesel. Les sucres issus de la biomasse peuvent provenir de différentes sources et les techniques utilisées pour les obtenir sont nombreuses.

#### 3.1 Composition des résidus lignocellulosiques

La biomasse lignocellulosique est composée de lignine, d'hémicellulose ainsi que de cellulose. La cellulose est le composant majeur des parois cellulaires de la plupart des plantes et est constituée de longues chaînes de glucose (Gnansounou, s.d.). Ces chaînes de glucose sont arrangées en faisceaux cristallins qui sont reliées entre elles par l'hémicellulose, composée de xylose, glucose, galactose, mannose et arabinose (Krylova., 2008).

La biomasse lignocellulosique comprend généralement de 20 à 50 % de cellulose, de 20 à 35 % d'hémicellulose et de 10 à 35 % de lignine (Kumar et al., 2009). Cependant, les proportions de chacun des constituants peuvent varier en fonction de la biomasse utilisée (Tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Proportions des constituants pour plusieurs types de biomasse (Gnansounou, s.d.)

<b>Biomasse</b>	<b>Cellulose</b>	<b>Hémicellulose</b>	<b>Lignine</b>
Herbe	30-50 %	15-40 %	5-20 %
Bagasse	40-55 %	25-40 %	5-25 %
Bois dur	40-50 %	20-30 %	15-30 %
Bois tendre	40-55 %	10-15 %	25-30 %
Résidus agricoles	30-40 %	10-40 %	10-30 %

Les proportions de chacun des constituants représentent un facteur d'influence quant à la transformation. En effet, un contenu important en lignine et hémicellulose rend la biomasse plus difficile à convertir en sucres, alors qu'un contenu important en cellulose permet l'obtention de plus grandes quantités de sucres.

### **3.1.1 Conversion des matières lignocellulosiques en sucres**

La conversion des matières lignocellulosiques en sucres comporte deux étapes principales, soit le prétraitement permettant de libérer la cellulose et l'hémicellulose et ensuite l'hydrolyse qui permet la dépolymérisation de la cellulose et de l'hémicellulose pour produire des molécules de sucres à cinq ou six carbones (Kumar et al., 2009). Ces deux étapes nécessaires à l'obtention de sucres qui pourront être utilisés par les microalgues pour la production de biodiesel seront donc explicitées plus en détail.

- **Prétraitement**

Avant l'étape de prétraitement, il est parfois nécessaire de conditionner la biomasse utilisée. Ce conditionnement est généralement réalisé par broyage ou découpage des matériaux pour faciliter le transport, mais aussi la réalisation du prétraitement.

L'étape du prétraitement nécessaire pour rendre la cellulose accessible à l'hydrolyse peut être réalisée de plusieurs façons. Tout d'abord, le prétraitement peut permettre d'abaisser la teneur en lignine et en hémicellulose de la biomasse à traiter, de diminuer la cristallinité de la cellulose, d'augmenter la porosité du substrat ou encore la surface spécifique de celui-ci (Krylova et al., 2008). L'étape du prétraitement ne doit toutefois pas entraîner la perte ou la dégradation des sucres et doit permettre, si possible, d'éliminer l'étape de conditionnement de la biomasse. La demande énergétique du prétraitement doit être minimale tout en permettant de limiter les coûts (Mosier et al., 2005). Il existe de nombreuses techniques de prétraitement utilisant des méthodes physiques, physico-chimiques ainsi que chimiques qui sont énumérées dans le tableau 3.2. La méthode utilisée dépend toutefois grandement du substrat utilisé.

Tableau 3.2 : Principaux procédés de prétraitement utilisés (Ballerinni, 2006)

Procédés physiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mécanique</li> <li>• Thermolyse</li> </ul>
Procédés physico-chimiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thermohydrolyse</li> <li>• Explosion à la vapeur</li> <li>• Explosion à la vapeur en conditions acides</li> <li>• AFEX</li> <li>• Explosion au CO<sub>2</sub></li> </ul>
Procédés chimiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prétraitement à l'acide dilué</li> <li>• Prétraitement alcalin</li> <li>• Alkali</li> <li>• Procédé Organosolv</li> <li>• Oxydation chimique</li> <li>• Oxydation biologique</li> </ul>

Parmi les procédés physiques, le prétraitement mécanique permet d'augmenter la superficie de la biomasse qui pourra ensuite être davantage accessible à l'hydrolyse. Le broyage devra être réalisé jusqu'à l'obtention de fragments ayant un diamètre inférieur à 2 mm. Cette étape est toutefois très énergivore, et ce, tout dépendant de la biomasse utilisée et de son degré de siccité. La consommation énergétique élevée de ce procédé représente un facteur limitant pour son usage à grande échelle. La thermolyse est aussi un procédé physique qui consiste à exposer la biomasse à des températures inférieures à 300°C pour ainsi limiter la production de produits volatils et liquides (Ballerinni, 2006).

La thermohydrolyse est un procédé de traitement de la biomasse dans l'eau à une température et une pression élevée. Le temps de réaction se situe entre 15 et 60 minutes et permet une solubilisation de 80 à 100 % de l'hémicellulose et de la lignine tout en augmentant la porosité de la matière lignocellulosique et la diminution de l'indice de cristallinité de la cellulose (Mosier et al., 2005). Ce prétraitement suivi de l'hydrolyse

permet des rendements supérieurs à 90 %, mais présente certains défis quant à la pression élevée difficile à appliquer dans des réacteurs de grands volumes.

L'explosion à la vapeur permet de chauffer pendant un certain temps la biomasse par injection de vapeur à haute pression pour ensuite abaisser la pression brutalement. Ce procédé n'entraîne cependant pas une solubilisation maximale de l'hémicellulose et les rendements suite à l'hydrolyse sont inférieurs à 50 % (Ballerini, 2006). Lors de ce procédé, l'hémicellulose serait hydrolysée par les acides libérés durant ce prétraitement. Afin de permettre l'atteinte d'un meilleur rendement en sucres, l'explosion à la vapeur peut être réalisée en conditions acides à partir de  $H_2SO_4$  ou de  $SO_2$ . Il s'agit d'ailleurs d'un traitement très efficace pour les bois de résineux, et ce, principalement à partir de  $SO_2$ . L'exposition à la vapeur en conditions acides se caractérise par une demande énergétique peu élevée en raison, notamment, des températures moins élevées nécessaires au processus, et d'une faible consommation en réactifs chimiques.

Le procédé AFEX ou explosion en présence d'ammoniac nécessite l'utilisation d'ammoniac à haute température et sous pression. La pression est ensuite diminuée pour permettre l'évaporation de l'ammoniac tout comme l'explosion du substrat. Cette technique nécessite un temps de réaction plus long, soit environ 30 minutes et serait davantage applicable pour les plantes herbacées. Ce procédé semble toutefois peu applicable étant donné la nécessité de récupérer l'ammoniac et de le recycler pour assurer la viabilité économique du procédé.

Pour ce qui est des procédés chimiques utilisés, le prétraitement à l'acide dilué est un procédé réalisé principalement en utilisant de l'acide sulfurique ou l'acide chlorhydrique à des concentrations variant de 0,5 à 3 % (Ballerini, 2006). Lors de ce traitement, l'acide est ajouté à la biomasse et ce mélange est ensuite amené à des températures de 160 à 220°C durant une période inférieure à une minute (Mosier et al., 2005). Il existe aussi deux méthodes différentes pouvant être appliquées qui dépendent de la teneur en matières sèches du substrat. Des rendements supérieurs à 90 % ont été observés suite à l'hydrolyse. Cette technique est légèrement plus coûteuse que celle de l'explosion à la vapeur.

Le prétraitement en milieu alcalin par utilisation de concentrations de 8 à 12 % de NaOH par rapport au contenu en matières sèches à des températures de 80 à 120°C permet une solubilisation pratiquement complète de la lignine ainsi qu'un gonflement des fibres de cellulose (Kumar et al., 2009). Cette technique serait beaucoup plus efficace sur les résidus agricoles que sur les bois tendres et ligneux, mais il s'agirait d'une technique relativement coûteuse étant donné la nécessité de récupérer la soude et de procéder au lavage du résidu solide.

Le prétraitement à partir d'un alcali est une autre technique utilisée pouvant être menée à température ambiante, mais nécessitant des temps de réaction beaucoup plus importants pouvant aller de quelques heures à quelques jours tout dépendant de la biomasse traitée. Des alcalis tels que la lime, le sodium, le potassium, le calcium et l'hydroxyde d'ammonium peuvent être utilisés (Mosier et al., 2005). Cette technique possède l'avantage d'être peu coûteuse et le pourcentage de rendement en glucose suite à l'hydrolyse serait d'environ 90 % (Eggeman et Elander, 2005).

Le procédé organosolv, malgré les résultats intéressants pouvant être obtenus par l'utilisation de cette méthode, pose plusieurs problèmes quant à son utilisation comme le coût élevé du solvant utilisé (éthanol ou méthanol) et la nécessité de le récupérer à 100 %. Il en est de même du procédé d'oxydation qui nécessite l'utilisation d'importantes quantités d'ozone rendant le procédé très coûteux bien que celui-ci permette d'obtenir une délignification très efficace. Une problématique semblable est observée quant à l'utilisation d'enzymes (peroxydases ou champignons lignolytiques) étant donné le prix trop élevé des enzymes et la vitesse de réaction.

Les prétraitements tels que l'explosion à la vapeur, celui à l'acide dilué ainsi que la thermohydrolyse semblent être les trois techniques les plus couramment utilisées en raison de leur efficacité et/ou de leurs coûts moins élevés. Le tableau 3.3 permet un résumé des principaux effets de certains prétraitements pouvant être utilisés.

Tableau 3.3 : Effets de différents prétraitements sur la structure lignocellulosique de la biomasse. Adapté de Himmel (2008).

	Augmenta- tion de la surface accessible	Décristalli- sation de la cellulose	Libération de l'hémicell ulose	Libération de la lignine	Altération de la lignine	Rendement suite à l'hydrolyse
Explosion à la vapeur	XX		XX		X	< 50 %
Thermo- hydrolyse	XX	ND	XX		X	> 90 %
Acide dilué	XX		XX		XX	> 90 %
AFEX	XX	XX	X	XX	XX	ND

Note : XX, effet important; X, effet modéré; ND, non déterminé

- Hydrolyse

Malgré l'étape préliminaire de prétraitement généralement appliquée à la biomasse lignocellulosique, l'hydrolyse, qui peut être de nature chimique ou enzymatique, constitue une opération difficile. En effet, la cristallinité de la cellulose et son association avec la lignine et les hémicelluloses sont des facteurs influençant le rendement des procédés appliqués.

L'hydrolyse chimique de la cellulose peut être réalisée par emploi d'acide concentré ou encore dilué (Krylova et al., 2008). De plus, étant donné le prix moins élevé pour l'acide sulfurique, il s'agit de l'acide le plus couramment utilisé.

L'hydrolyse de la cellulose réalisée à partir d'acide dilué à des températures élevées de 120 à 220 °C ainsi qu'à des pressions élevées de 15 psi à 75 psi permet d'obtenir un rendement de 90 % en sucres (Kumar et al., 2009). Le temps de réaction est variable, mais dure généralement de 30 minutes à 2 heures (Kumar et al., 2009).

Cette hydrolyse peut aussi être réalisée par l'utilisation d'acide sulfurique concentré à 70 %, ce qui permet d'obtenir un meilleur rendement en sucres, principalement en glucose et xylose. De plus, les températures de réaction de 40 à 50°C et la pression sont moins élevées lorsque le procédé à l'acide concentré est utilisé. Des rendements d'environ 99 %

peuvent être obtenus par l'utilisation de cette méthode (Kumar et al., 2009; Krylova et al., 2008).

L'hydrolyse enzymatique catalysée par la cellulase est aussi couramment utilisée et semble être la voie à préconiser du point de vue économique et scientifique. Celle-ci nécessite toutefois l'application d'un prétraitement pour permettre de briser la structure cristalline de la lignocellulose, ce qui permettra d'exposer la cellulose et l'hémicellulose à l'action exercée par l'enzyme. Sans l'utilisation d'un prétraitement, un rendement inférieur à 20 % peut être obtenu alors qu'avec un prétraitement, des rendements de 90 % peuvent être obtenus (Kumar et al., 2009). Il existe trois classes majeures de cellulase, soit les endoglucanases, les exoglucanases et les  $\beta$ -glucosidases. Celles-ci, afin de permettre d'assurer leur efficacité, doivent être maintenues en conditions optimales, soit des températures de 45 à 50°C et à un pH aux alentours de 4,8. Le tableau 3.4 présente les rendements en sucres obtenus en fonction des procédés de prétraitement et d'hydrolyse utilisés pour certaines des matières lignocellulosiques.

### **3.2 Utilisation de résidus agricoles et forestiers**

La biomasse pouvant être utilisée afin d'obtenir des sucres pour l'alimentation des microalgues peut provenir de résidus forestiers tels les copeaux de bois et les brans de scie tout comme de résidus agricoles comme les pailles de blé et de maïs, la bagasse de canne à sucre et les résidus d'émondage des épis de maïs. Elle peut aussi être produite à partir de plantes énergétiques comme le panic érigé (*Panicum virgatum*) en raison de leur rendement important en biomasse et de leur croissance rapide.

Afin de déterminer le type de biomasse à utiliser, plusieurs facteurs doivent être pris en considération dont les principaux sont la disponibilité ainsi que le coût de celle-ci. L'utilisation de la biomasse doit permettre un approvisionnement constant tout en étant disponible au prix le plus faible. Des facteurs tels que le coût de production, de récolte, de transport et d'entreposage doivent être pris en considération pour permettre d'assurer

Tableau 3.4 : Rendements en sucres obtenus pour certains types de biomasse lignocellulosique.

Matériau lignocellulosique	Rendements
Panicum virgatum	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le prétraitement à l'acide dilué à des températures de 180°C pendant 30 secondes suivi de l'hydrolyse à partir de cellulase ont permis des rendements de 91,4 % de la cellulose en glucose et cellobiose (Mousdale, 2008).</li> </ul>
Blé	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le prétraitement à l'acide dilué (0,5 %) à une température de 140°C pendant une heure suivi de l'hydrolyse à partir de cellulase (celluclast) et <math>\beta</math>-glucosidase (Novozyme 188) ont permis des rendements de 313 mg de glucose/g de MS (Saha et al., 2005).</li> <li>• Le prétraitement du blé à partir d'un acide dilué serait le plus efficace avec un rendement en sucres de 179,2 mg/g de biomasse (Chen et Yu, s.d.)</li> </ul>
Bagasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le prétraitement réalisé à partir de NaOH (0,1 N) pendant 1 heure à 120°C pour ensuite réaliser l'hydrolyse à partir de cellulase de <i>Trichoderma reesei</i> et BLG de <i>Aspergillus niger</i> ont permis des rendements de 0,89 g de sucre/g de biomasse (Sukumaran et al., 2009).</li> <li>• Le prétraitement réalisé à partir de HCl (0,1 N) dans les mêmes conditions a permis des rendements de 0,88 g de sucre/g de biomasse (Sukumaran et al., 2009).</li> </ul>
Résidus ligneux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le prétraitement AFEX à une température de 180°C et à une pression de 700 psi pour une durée de 30 minutes, suivi d'une hydrolyse à partir de cellulase et de <math>\beta</math>-glucosidase ont permis des rendements en glucose de 0,32 à 0,45 g de sucres/g de biomasse (Balan et al., 2009).</li> </ul>

viabilité du procédé. De plus, le coût de la biomasse pour la production d'hydrates de carbone est sujet à une forme de compétition provenant des autres filières en raison de leur usage multiple pour l'alimentation animale, l'amendement des sols ou encore comme matériau pour la litière animale.

### **3.2.1 Résidus forestiers**

Les résidus forestiers incluent tous les résidus d'exploitation du bois générés par les opérations de coupe tout comme ceux provenant des usines de pâtes et papiers et des scieries. Les résidus de coupe sont, pour la plupart, laissés en forêt, et ce, principalement en raison de l'absence de modes de collecte (Kumarappan et al., 2009). Les résidus les plus accessibles proviennent donc des différentes usines utilisant le bois comme matière première et sont principalement constitués d'écorces, de sciures et de copeaux (Bradley, 2006).

Étant donné que le Canada et les États-Unis sont d'importants joueurs quant à l'exploitation forestière, ces résidus sont produits en quantités importantes. Au Canada, les résidus forestiers représenteraient 16 % de la production totale en bois rond, alors que ceux-ci représenteraient de 4 à 28 % aux États-Unis (Kumarappan et al., 2009). En 2003, la production de bois rond était chiffrée, en milliers de mètres cubes, à 191 714 pour le Canada et 405 159 pour les États-Unis (Mäki-Simola et Panagopoulos, 2005).

Une des principales problématiques de l'utilisation des résidus forestiers pour l'obtention d'hydrates de carbone provient du fait que les résidus laissés au sol suite à la coupe sont difficiles à ramasser, ce qui entraîne une augmentation des prix payés pour leur utilisation en tant que source d'hydrates de carbone.

La plupart des résidus pouvant être utilisés proviennent donc des usines de transformation du bois en raison du prix moins élevé pour les obtenir et de leur disponibilité plus importante. Les quantités disponibles en résidus forestiers en fonction du prix sont présentées dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Quantité de résidus disponibles en fonction du prix aux États-Unis et au Canada. Adapté de Kumarappan (2009).

Prix (\$US/tonne)	Quantité de résidus forestiers disponibles (millions de tonne MS)	
	Canada	États-Unis
30	12	12
40	12	80
50	30	114
60	43	130
70	43	133
80	43	135
90	43	135
100	43	135

L'utilisation des résidus forestiers pour l'obtention d'hydrates de carbonés présente cependant certains inconvénients étant donné leur contenu important en lignine. Ce facteur diminue l'efficacité du prétraitement et par conséquent l'efficacité de l'hydrolyse enzymatique. Cette problématique se traduit par une augmentation de l'utilisation d'enzyme et donc d'une augmentation importante des coûts. Cependant, étant donné l'importante disponibilité des résidus forestiers, son utilisation pour l'obtention des sucres demeure une avenue intéressante (Mousdale, 2008).

Parmi les technologies les plus couramment utilisées pour réaliser le prétraitement des résidus ligneux, celle en deux étapes semble très intéressante. Tout d'abord, l'explosion à la vapeur est réalisée à basse température pour permettre l'hydrolyse de l'hémicellulose. Ensuite, la deuxième étape est opérée à des températures plus importantes et pendant une plus longue durée pour libérer le glucose formant la cellulose. De l'acide sulfurique ou encore du SO<sub>2</sub> sont utilisés comme catalyseur de la réaction lors des deux étapes. Des rendements en sucres de 100 g de glucose/kg de MS ont été obtenus grâce à ce procédé (Mousdale, 2008).

### 3.2.2 Résidus agricoles

- Fourrage de maïs et paille de blé

Les résidus agricoles tels que le fourrage de maïs et la paille de blé peuvent être utilisés pour l'obtention de sucres. Ces résidus consistent en la partie résiduelle se retrouvant au champ suite au battage des céréales, soit principalement la paille. Cette paille est composée de la tige, des feuilles ainsi que du système racinaire de la plante en question (Kerstetter et Lyons, 2001). Étant donné que le maïs et le blé sont des cultures très bien établies tant au Québec, qu'en Europe et aux États-Unis, les résidus issus de celles-ci représentent un potentiel intéressant d'utilisation à des fins de production d'énergie. En effet, au Canada, la culture du blé occupait en 2009 une superficie d'environ 10 millions d'hectares, alors que celle du maïs occupait une superficie de 1 million d'hectares (Statistiques Canada, 2009). Aux États-Unis, la production de blé en 2009 occupait une superficie d'environ 48 millions d'hectares, alors que celle de maïs serait de 32 millions d'hectares (United States Department of Agriculture (USDA), 2009b). Les cultures telles que l'orge et le riz représentent aussi un potentiel intéressant en raison de leur importance.

Selon certaines estimations, les quantités disponibles de biomasse provenant de résidus agricoles seraient de 250 millions de tonnes de MS aux États-Unis à un prix inférieur ou égal à 100 \$/tonne (Kumarappan, 2009). Pour le Canada, les quantités de biomasse provenant des résidus agricoles seraient de 42 millions de tonnes de MS, et ce, à un prix inférieur ou égal à 100 \$/tonne (Kumarappan, 2009). Ces estimations prennent en considération la quantité nécessaire de résidus devant être incorporés au sol pour permettre une diminution de l'érosion des sols, du ruissellement ainsi qu'une amélioration du bilan humique réduisant du fait même les apports en fertilisant devant être ajoutés pour la culture suivante.

L'utilisation des résidus agricoles comme source de biomasse possède aussi un avantage dû au fait qu'il n'est pas nécessaire d'adapter la machinerie pour permettre de récolter la paille au sol puisque celle-ci est déjà utilisée pour la récolte du fourrage servant à

l'alimentation animale. Cependant, une forme de compétition est à prévoir puisque les résidus de culture sont également utilisés comme litière pour les animaux tout comme pour l'alimentation animale.

La compagnie Iogen corporation, située en Ontario, utilise d'ailleurs la paille de blé pour obtenir des sucres qui seront ensuite fermentés en éthanol. Cette compagnie se spécialise notamment dans la production d'enzymes permettant l'hydrolyse de la cellulose en sucre. Iogen réalise le prétraitement de la paille de blé en utilisant le procédé modifié d'explosion à la vapeur pour ensuite réaliser l'hydrolyse enzymatique de la paille de blé à partir de cellulase (Iogen corporation, 2009).

Selon Kristenson et al. (2007), l'efficacité des méthodes de prétraitement pour la paille de blé serait, en ordre décroissant, l'explosion à la vapeur (215°C), l'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (190°C), la thermohydrolyse (190°C), l'ammoniac (195°C) et ensuite l'acide (190°C). Pour ce qui est des prétraitements pouvant être utilisés pour la paille de maïs, ceux-ci peuvent être très variés (acide ou alcalin) et permettent d'obtenir des rendements intéressants (Mousdale, 2008).

- Bagasse de canne à sucre

La bagasse est un résidu fibreux obtenu suite au broyage des tiges de canne à sucre lors du procédé menant à la fabrication du sucre. L'utilisation de la bagasse de canne à sucre pour l'obtention d'hydrates de carbone est une avenue possible étant donné l'importance de la culture de la canne à sucre dans le monde, son contenu intéressant en cellulose (environ 50 %) ainsi que son rendement important comparativement à d'autres cultures (80 tonnes/ha) (Pandley et al., 2000). La production mondiale de canne à sucre était chiffrée, en 2003, à environ 13 333 millions de tonnes dont les principaux pays producteurs sont le Brésil, l'Inde et la Chine (Wikipédia, 2009c).

Le procédé de fabrication du sucre permet de générer des quantités importantes en bagasse de l'ordre d'environ 250 kg par tonne de canne à sucre (Dias et al., 2009). Cependant, puisque cette bagasse générée est principalement utilisée pour la production

de vapeur, de chaleur ou encore d'électricité servant à l'alimentation énergétique de l'unité de transformation du sucre, seuls les excédents peuvent être utilisés à d'autres fins (Dias et al., 2009). Ces excédents seraient de l'ordre de 120 kg/tonne de canne à sucre. Cependant, les résidus laissés au champ pourraient également servir pour l'obtention de sucres. Ceux-ci ne sont présentement pas récoltés et sont plutôt laissés au champ pour le contrôle des plantes adventices, mais 50 % de ces résidus, soit environ 140 kg/tonne de canne à sucre pourraient également servir pour la production d'algocarburants (Dias et al., 2009). Il n'existe cependant pas, présentement, de machinerie permettant de récolter ces résidus au champ.

De plus, l'utilisation de la bagasse de canne à sucre pour la production d'algocarburants dans des pays plus nordiques tel le Québec est limitée par les frais de transport importants pour son exportation éventuelle. La faible densité des résidus de culture entraîne aussi une augmentation importante des coûts pour son transport.

Au Brésil, de l'éthanol est déjà produit à partir de la bagasse de canne à sucre. La méthode de prétraitement utilisée par les Brésiliens est l'extraction à partir d'un solvant organique ou organosolv. Toutefois, plusieurs autres prétraitements sont proposés et permettent aussi d'obtenir des résultats intéressants en sucre, soit l'explosion à la vapeur et la thermohydrolyse à 230°C.

### **3.2.3 Cultures fourragères**

- Panic érigé

Le panic érigé est une graminée qui possède certains avantages quant à son utilisation en Amérique du Nord tant au niveau économique, agricole que social. Cette graminée se caractérise par son importante productivité, sa pérennité ainsi que son utilisation efficace de l'eau et des nutriments. Comparativement au maïs qui exige des apports importants en fertilisants azotés au sol, la culture du panic érigé ne nécessite que très peu d'intrants pour favoriser une croissance optimale. Sa production ne nécessite pas non plus de labour du sol à intervalle fréquent et permet ainsi une diminution de l'érosion des sols tout comme une diminution du ruissellement des eaux de pluie à la surface du sol (Mousdale,

2008). Il s'agit d'ailleurs d'une plante adaptée aux conditions climatiques du Québec, de l'est du Canada ainsi que des États-Unis.

Puisque le panic peut être récolté avec la même machinerie que celle servant à la récolte du fourrage, et ce, une fois par an, il n'est pas nécessaire d'investir dans la conception de nouveaux équipements. De plus, la culture du panic permet des rendements importants en biomasse de l'ordre de 8 à 12 tonnes de MS/ha/an (Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (CRAAQ), 2008). Cependant, la culture du panic érigé n'est présentement implantée que chez très peu d'agriculteurs au Québec, ce qui implique un changement dans les cultures au détriment de celles présentement établies ou encore une valorisation de terres marginales (Kumarappan, 2009). Le potentiel d'utilisation de cultures énergétiques est donc grandement dépendant des prix qui pourront être obtenus par la vente de la biomasse générée par les cultures énergétiques comparativement aux cultures traditionnelles.

Pour l'obtention de sucres à partir du panic érigé, le prétraitement à l'acide dilué a été exploré, notamment à des concentrations en acide de 1,2 % et une température de 180°C pour une durée de 0,5 minute. Ces expérimentations ont permis d'obtenir des rendements en sucres de 91,4 % (Mousdale, 2008).

- Cultures ligneuses

Les cultures pérennes telles que le saule et le peuplier peuvent représenter un potentiel intéressant pour l'obtention d'hydrates de carbone étant donné leurs proportions élevées en cellulose et leur rendement élevé en biomasse de 7 à 23 tonnes de MS/ha/an (CRAAQ, 2008). La culture du saule présenterait un avantage comparativement à celle du peuplier étant donné sa capacité à produire à répétition des rejets de souches suite au recépage. Cependant, le saule doit être cultivé dans des sols possédant certaines caractéristiques, soit un pH de 5,5 à 7,5 ainsi qu'un drainage modéré à imparfait. Des coûts plus importants et un rendement moindre sont à prévoir si le saule est cultivé sur des sols ayant un mauvais drainage ou un pH trop acide.

Contrairement au panic érigé, la récolte n'est possible qu'à un cycle de trois à quatre ans et celle-ci nécessite une adaptation de la machinerie. Des adaptations peuvent être réalisées à partir des récolteuses de canne à sucre, d'ensileuses ou encore de presses à balles rondes (CRAAQ, 2008). Comme la plantation du saule s'effectue par bouturage, des équipements spéciaux devront aussi être conçus. Il est toutefois possible de planter le saule à la main.

Certaines études ont été réalisées afin de déterminer le potentiel d'utilisation des cultures énergétiques pour obtenir, entre autres, des hydrates de carbone. Une étude réalisée par Kumarappan et al. (2009) permet l'interrelation entre les quantités de biomasse disponibles et le prix obtenu. Ces études démontrent que la biomasse provenant de cultures énergétiques ne pourra être obtenue aux États-Unis que si les prix sont supérieurs ou égaux à 70 \$ US par tonne de MS. À ce prix, des quantités de 35 millions de tonnes de biomasse seraient disponibles. Pour ce qui est du Canada, l'obtention de biomasse provenant de cultures tel le panic érigé ne sera possible que si les prix sont de 80 \$ US par tonne de MS ou plus pour un total de 26 millions de tonnes de MS. Le potentiel maximal en fonction du prix pour le Canada est de 31 millions de tonnes, alors que celui-ci est de 85 millions de tonnes aux États-Unis.

### **3.2.4 Nouvelles technologies**

Étant donné que l'étape du prétraitement des matières lignocellulosiques est la plus coûteuse pour l'obtention de sucres et que son importance est primordiale pour l'hydrolyse enzymatique, plusieurs travaux de recherche visent à identifier les méthodes les plus efficaces et les moins coûteuses, et ce, pour chaque type de biomasse utilisée.

D'ailleurs, afin de permettre des avancées dans ce domaine, le département de l'énergie des États-Unis (DOE) a défini les plus importants défis à relever. Tout d'abord, la clé pour permettre une meilleure efficacité des procédés réside en une meilleure compréhension de la structure physique et chimique des parois cellulaires des plantes. Une fois les connaissances acquises à ce sujet, il sera possible d'identifier de nouvelles

plantes spécifiquement pour la production de carburants et de définir les méthodes les plus efficaces autant au niveau du prétraitement que de l'hydrolyse (DOE, 2006).

Le Consortium for Applied Fundamentals and Innovation (CAFI) travaille aussi à l'évaluation de méthodes de prétraitement. Chacun des participants évalue une méthode de prétraitement, ce qui permet une comparaison de la performance des divers prétraitements en fonction de la biomasse utilisée. Ces connaissances permettent de définir les approches les plus efficaces et les meilleures conditions pour leur application (concentration, température, pH, etc.) (NREL, 2007).

Les chercheurs de l'Université de Georgia auraient d'ailleurs développé une nouvelle technologie de prétraitement efficace pour plusieurs types de biomasse permettant d'obtenir dix fois plus de sucres que les technologies présentement applicables. Ce procédé serait réalisé sans l'utilisation d'acide et permettrait d'éviter le traitement ou encore la disposition particulière des composés chimiques présents dans la solution une fois le traitement réalisé (University of Georgia, 2008).

Plusieurs efforts sont aussi fournis afin d'identifier de nouvelles enzymes ou encore des mélanges spécifiques d'enzymes pour permettre une augmentation du rendement en hydrates de carbone du procédé. C'est d'ailleurs le cas de Novozymes Biotech, Inc., dont une des filiales de recherche est basée en Californie et travaille sur la production de nouvelles enzymes pour l'hydrolyse de la cellulose contenue dans les matières lignocellulosiques. L'équipe de recherche travaille principalement sur la biomasse de résidus de maïs ayant d'abord subi un prétraitement à l'acide dilué. L'objectif principal des recherches menées par cette compagnie se spécialisant dans la production d'enzymes est de permettre une diminution des coûts des cellulases (Novozymes, 2003). Cette réduction des coûts permettra d'améliorer la rentabilité du procédé et la concurrence éventuelle avec les prix par rapport aux carburants actuels.

Plusieurs autres défis restent cependant à relever pour les transformateurs de biomasse principalement au niveau de l'approvisionnement, de la collecte et du stockage de la

biomasse (Novozymes, 2003). Dernièrement, la compagnie canadienne Comet Biorefining Inc., qui se spécialise dans les technologies de conversion de la biomasse et en service conseil pour les industries, a annoncé l'obtention prochaine de son brevet pour une nouvelle technologie de conversion de la biomasse. La nouvelle technologie annoncée serait applicable pour plusieurs types de biomasse tels le panic érigé, les copeaux de bois ainsi que les résidus de maïs et permettrait de réaliser le prétraitement de la biomasse non plus nécessairement dans les installations de production de biocarburant, mais bien à proximité du lieu de production de la biomasse. Suite au prétraitement réalisé *in situ*, les sucres cellulosiques peuvent ensuite être transportés sur de longues distances et stockés en raison de leur plus grande stabilité et densité énergétique. Les sucres cellulosiques pourraient être produits pour aussi peu que sept cents par livre et cette technologie permettrait de réaliser des économies d'échelle via la construction d'usines beaucoup plus productives puisque celles-ci ne devront plus être situées à proximité du lieu de production de la biomasse (Lane, 2009).

La compagnie Purevision technology inc., a aussi développé une nouvelle technologie de fractionnement de la biomasse à contre-courant dans une chambre sous pression pour plusieurs résidus agricoles et forestiers. Ce procédé peut être réalisé en une ou deux étapes et permet le fractionnement de la biomasse en ses trois constituants principaux : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Cette compagnie mise aussi grandement sur la production de coproduits à partir de la lignine récupérée pour permettre une meilleure rentabilité du procédé impliqué dans la production de biocarburants (Purevision, 2009). La lignine peut donc servir à divers usages industriels et en tant que combustible pour la production d'électricité et de vapeur dans les bioraffineries.

Plusieurs autres groupes, compagnies, universités et gouvernements travaillent toujours à la mise au point de nouvelles technologies permettant de rentabiliser la production d'hydrates de carbone à partir de biomasse et de rendre les coûts de production concurrentiels aux carburants actuels.

## **4 ÉVALUATION DES POSSIBILITÉS D'UTILISATION**

Afin de juger de l'applicabilité d'une nouvelle technologie de production, plusieurs aspects doivent être pris en considération. Parmi ceux-ci, notons l'évaluation des aspects technologiques, économiques, environnementaux et sociaux. C'est donc en partie à partir des informations présentées dans les sections précédentes que l'analyse de ces aspects sera réalisée afin de déterminer si la production de biodiesel à partir des microalgues de métabolisme hétérotrophe est une solution applicable et efficace pour les régions nordiques tel le Québec.

### **4.1 Aspects technologiques**

Les aspects technologiques sont primordiaux afin de valider si une technologie présente un potentiel d'utilisation intéressant. L'analyse des performances de production des microalgues en terme de rendement en huile et de productivité en biomasse sera présentée tout comme les rendements des différentes techniques d'extraction et de récolte. Le potentiel d'utilisation de certaines sources de carbone sera également présenté.

#### **4.1.1 Analyse des performances des microalgues de métabolisme hétérotrophe**

Les divers travaux de recherche réalisés sur la production de biodiesel à partir des microalgues mentionnent les résultats obtenus quant à la quantité de biomasse algale et aux pourcentages en lipides des microalgues utilisées. Les paramètres de culture tels que les concentrations en hydrates de carbone, les volumes utilisés pour la croissance des microalgues ainsi que la durée de fermentation sont également soulignés dans les différents articles consultés. C'est donc grâce à ces données qu'il est possible de calculer la productivité en termes de biomasse et de lipides des microalgues (Tableau 4.1).

Selon ces résultats, la productivité maximale obtenue est de 0,69 g en biomasse sèche/L·h, ce qui correspond à une productivité en lipides de 0,297 g/L·h, et ce, à partir de la microalgue *Chlorella pyrenoidosa*. Ce rendement permet une production annuelle d'environ 2 605 g de lipides/L ou encore de 2 605 kg de lipides/m<sup>3</sup>, ce qui correspond à

une production en biodiesel annuelle d'environ 2 557 g/L ou de 2 557 kg/m<sup>3</sup> considérant un taux de conversion de 98,15 % via la réaction subséquente de transestérification. La production en biodiesel peut être estimée en utilisant l'équation suivante (Li et al., 2007).

$$\text{Production de biodiesel} = \text{Concentration en biomasse} \times \text{Contenu en lipides} \times \text{Taux de conversion de la transestérification}$$

Puisque le biodiesel a une densité de 0,87 à 0,89 kg/L (Environnement Canada, 2003), cette production représente 2 873 L/m<sup>3</sup>/an.

Cependant, les résultats de productivité en biomasse tendent à diminuer en fonction du volume utilisé pour la fermentation (Li et al., 2007). Le contenu en lipides des microalgues tend également à diminuer selon les volumes utilisés (Li et al., 2007). En effet, des résultats beaucoup moins intéressants sont obtenus pour un volume de fermentation de 11 000 L, soit une productivité en biomasse algale de 0,07 g/L·h qui correspond à un rendement annuel en lipides de 270 g/L ou 270 kg/m<sup>3</sup>. Ces résultats permettraient d'expliquer, entre autres, pourquoi aucune entreprise ne produit actuellement de biodiesel à l'échelle commerciale.

Les résultats quant à la productivité en lipides des microalgues de métabolisme hétérotrophe peuvent cependant être avantageusement comparés à ceux obtenus par les microalgues de métabolisme autotrophe. En effet, les résultats les plus intéressants de productivité concernant les microalgues de métabolisme autotrophe sont de 0,204 g de lipides/L/j, ce qui correspond à un résultat 3,5 fois inférieur au résultat le plus faible obtenu pour les microalgues de métabolisme hétérotrophe présentées au tableau 4.1. Les résultats obtenus par Wu et Shi (2007) sont quant à eux 35 fois supérieurs. Ces productivités inférieures obtenues pour les microalgues de métabolisme autotrophe peuvent être expliquées par un pourcentage généralement inférieur en lipide ainsi que par

Tableau 4.1 : Productivité et rendement en lipides obtenus par la culture de microalgues ayant un métabolisme hétérotrophe.

Microalgues	Source de carbone	Durée (heure)	Mode d'alimentation	Productivité (g biomasse/L·h)	Lipides (%)	Productivité (g en lipide/L·h)	Rendement (g biomasse/g de substrat)	Référence
<i>Chlorella protothecoides</i> (5 L)	Glucose	184	Semi-continu	0,08	46,1	0,04	ND	Li et al., 2007
<i>Chlorella protothecoides</i> (11 000 L)	Glucose	200	Semi-continu	0,07	44,3	0,03	ND	Li et al., 2007
<i>Chlorella protothecoides</i> (1 L)	Hydrolysats de topinambour	100	Non-continu	0,17	43	0,07	0,006	Cheng et al., 2008
<i>Chlorella protothecoides</i> (5 L)	Hydrolysats de jus de canne à sucre	168	Non-continu	0,14	46	0,065	0,004	Cheng et al., 2009
<i>Chlorella pyrenoidosa</i> (19 L)	Glucose	ND	Semi-continu	0,69	43	0,297	ND	Xiong et al., 2008; Wu et Shi, 2007

une déficience en énergie solaire caractéristique des différents systèmes utilisés pour la culture des microalgues (Cheng et al., 2009). De plus, les algues de métabolisme autotrophe ayant un fort potentiel de croissance montrent généralement une faible production en huiles et vice-versa (Cheng et al., 2009).

Les productivités des microalgues de métabolisme hétérotrophe sont aussi supérieures à celles obtenues à partir des cultures servant à la production de biodiesel. La productivité obtenue à partir du soya est de 48 gallons/acre, alors que celle calculée précédemment pour les microalgues de métabolisme hétérotrophe est de 2 873 L/m<sup>3</sup> (Pienkos et Darzins., 2009). Si nous faisons l'hypothèse d'un fermenteur cubique de 1 m x 1 m x 1 m, cette productivité pourrait également correspondre à 2 873 L/m<sup>2</sup> ou encore à 3 071 gallons/acre. Donc, les productivités obtenues à partir des microalgues seraient environ 13 000 fois supérieures.

Afin de permettre une augmentation de la productivité, plusieurs recherches en manipulation génétique visent à permettre une augmentation du contenu en lipides des microalgues ainsi qu'une augmentation du taux de croissance. En effet, les efforts en R-D doivent permettre de démontrer qu'il est possible de réaliser la culture de masse des microalgues, et ce, pour permettre une production commerciale. C'est donc à ce niveau qu'une productivité intéressante en biomasse algale doit être obtenue même lorsque les microalgues sont cultivées dans des fermenteurs de très grande capacité. Une augmentation de la productivité en lipides permettra d'ailleurs une diminution des coûts de production en raison des volumes plus importants possiblement générés.

Les entreprises se spécialisant notamment dans la production d'algocarburants à partir de microalgues de métabolisme hétérotrophe telles que Solazyme et Fermentalg travaillent ainsi en manipulation génétique afin de permettre la sélection de caractéristiques essentielles à la production d'algocarburants par les microalgues.

#### **4.1.2 Rendement des procédés d'extraction et de récolte**

Plusieurs techniques d'extraction et de récolte des microalgues ont été exposées précédemment. Cependant, on ne peut actuellement identifier la technique idéale à utiliser

puisque l'efficacité de celle-ci dépend grandement de l'espèce microalgale utilisée (concentration en biomasse, diamètre, caractéristiques morphologiques, etc.), de la valeur du produit désiré qui doit être compétitif au prix du baril ainsi que des coproduits générés permettant une meilleure rentabilité du processus. De plus, l'extraction et la récolte influencent présentement la rentabilité du processus de production de biodiesel en raison des coûts élevés généralement associés aux techniques présentement disponibles. En effet, la récolte représenterait de 20 à 30 % du coût total de production de biodiesel, alors que l'extraction représenterait 50 % des coûts de production (Pienkos et Darzins, 2009). Une meilleure connaissance des espèces microalgales permettra d'ailleurs d'identifier des solutions d'extraction spécifiques, efficaces et peu coûteuses en fonction de l'espèce utilisée.

Les informations concernant les techniques à privilégier en fonction de l'espèce microalgale utilisée et de ses caractéristiques sont peu documentées. Il est toutefois possible de faire certaines constatations. En effet, au niveau des techniques disponibles pour la récolte des microalgues, la centrifugation serait présentement la technique la plus utilisée (Benemann et al., 1980; Mohn, 1980; Richmond, 1986) . Toutefois, étant donné qu'elle est très dispendieuse et énergivore, elle serait l'avenue à privilégier uniquement pour les produits à haute valeur dont notamment les nutraceutiques et les cosmétiques. Puisque le biodiesel est un produit de faible valeur, la centrifugation entraînerait une augmentation importante des prix de ce biocarburant. Comme la production de biodiesel à partir de microalgues de métabolisme hétérotrophe devra s'orienter sur la vente des coproduits ayant une valeur de revente élevée, cette orientation permettra peut-être de rentabiliser une technique telle que la centrifugation. De plus, puisque cette technique n'entraîne pas de contamination chimique ni de changements dans la composition cellulaire des microalgues, il s'agit d'une technique efficace permettant de générer des coproduits à haute valeur pouvant servir à l'alimentation humaine et animale dont notamment les nutraceutiques. Cette technique serait d'ailleurs adaptée à la production de biodiesel à grande échelle (Mata, 2010).

Une technique telle que la filtration pourrait être utilisée, mais ce, uniquement pour les microalgues formant des colonies ou encore filamenteuses telles que *Spirulina sp.* ou *Micractinium sp.* (Lee et al., 2008). En effet, les microalgues de très faible diamètre telles que

*Chlorella sp.* provoquent l'obstruction des filtres utilisés et nécessitent le changement fréquent de ces derniers. Ces manipulations entraînent ainsi une augmentation des coûts tout comme une augmentation de la durée nécessaire à la récolte.

Comme la floculation nécessite l'utilisation d'agents floculants et entraîne donc la contamination de la biomasse algale, cette technique n'est pas avantageuse dans l'optique où la rentabilité du biodiesel produit à partir de biomasse algale dépendra de la valorisation et la vente des coproduits. La biofloculation causée par un stress environnemental peut causer des changements dans la composition cellulaire des microalgues et serait difficilement utilisable à l'échelle commerciale pour des raisons économiques.

Au niveau de l'extraction des huiles microalgales, plusieurs techniques actuellement utilisées ont été présentées. Cependant, les informations obtenues concernant leur rentabilité sont peu nombreuses et la technique pour toutes les espèces de microalgues n'a toujours pas été identifiée (Lee et al., 2010). Selon la littérature consultée, la technique fréquemment utilisée est l'extraction par solvant utilisant l'hexane, le benzène ou encore l'éthanol (Mata et al., 2010). Bien que celle-ci soit relativement efficace (Mata et al., 2010), il s'agit d'une technique coûteuse qui entraîne d'ailleurs l'émanation de composés organiques volatils (Viel, 2009). Dans l'optique d'une production de biocarburants visant une diminution de la pollution créée par la combustion de carburants d'origine fossiles tout comme une diminution de l'émission de gaz à effet de serre, l'utilisation de solvants organiques comme méthode d'extraction n'est pas une option à privilégier dans un contexte de développement durable. Le pressage mécanique, une autre technique d'extraction, est quant à elle inefficace, énergivore et trop coûteuse pour permettre la rentabilisation du biodiesel produit à partir de microalgues.

Selon une étude portant sur différentes techniques d'extraction des huiles, celle par micro-ondes a permis d'obtenir les résultats les plus intéressants en terme d'efficacité pour toutes les espèces microalgales testées soit, *Botryococcus sp.*, *Chlorella vulgaris* et *Scenedesmus sp.* (Lee et al., 2010). De plus, cette méthode d'extraction est simple, peu coûteuse, rapide et ne nécessite pas l'utilisation de composés chimiques. Il s'agit donc d'une avenue possiblement intéressante à explorer davantage. D'autres recherches sur l'extraction sont actuellement en

cours dont celles de la société Valcobio qui est un des partenaires du projet Shamash. Cette société travaille notamment à l'élaboration de techniques n'utilisant pas de produits chimiques (Conseil National des Ingénieurs et des Scientifiques de France (CNISF), 2009).

Puisqu'il n'existe actuellement aucune technique idéale permettant la récolte des microalgues et l'extraction des huiles, de nombreux efforts de R-D devront être fournis afin de sélectionner une méthode peu coûteuse, non polluante, efficace et peu énergivore. Il s'agit d'ailleurs d'un des plus grands défis de la production de biodiesel à partir des microalgues.

#### **4.1.3 Sources possibles de carbone et potentiels de développement**

Présentement, la source de matière organique majoritairement utilisée dans la plupart des travaux expérimentaux consultés est le glucose. L'importance de diminuer les coûts du biodiesel pour permettre à celui-ci d'être compétitif par rapport au pétrole favorise la recherche de sources de carbone alternatives. En effet, une source alternative de carbone pour alimenter les microalgues de métabolisme hétérotrophe permettrait une diminution des coûts.

Le glucose représenterait environ 80 % du coût total du substrat utilisé pour la croissance des microalgues (Li et al., 2007). Une source alternative moins dispendieuse permettrait donc une diminution des coûts de production. Parmi les alternatives envisageables, mentionnons notamment l'amidon, le glucose obtenu par transformation des matières lignocellulosiques, le glycérol, le sucrose ainsi que l'acétate. En effet, ces différents substrats seraient en mesure de supporter la croissance de plusieurs espèces microalgales en hétérotrophie à un coût moindre (Li et al., 2007).

L'amidon serait deux fois moins coûteux que le glucose et entraînerait une diminution du prix du substrat utilisé de 40 %. Dans la littérature consultée, seulement quelques auteurs font mention de la possibilité d'utiliser l'amidon comme substrat pour la croissance des microalgues (Li et al., 2007 et Benemann, 2008a). Ce substrat serait idéal pour une espèce telle que *Chlorella* (Li et al., 2007).

Les résidus lignocellulosiques entraîneraient pour leur part une diminution des coûts de 60 à 70 % (Li et al., 2007). L'utilisation des résidus lignocellulosiques semble donc être une alternative efficace pour permettre une diminution intéressante des coûts de production. Les compagnies se spécialisant dans la production de biodiesel à partir de microalgues de métabolisme hétérotrophe telles que Solazyme et Fermentalg utiliseraient ce type de résidus pour l'obtention de leur biocarburant ou encore pour l'industrie alimentaire et des cosmétiques (Harisson et al., 2010). Solazyme travaillerait principalement avec des microalgues du genre *Chlorella* et utiliserait principalement comme source de carbone une multitude de matériaux celluloseux et non-celluloseux, en combinaison ou non. Mentionnons notamment les copeaux de bois, le panic érigé, la paille de blé, et les résidus de bagasse. Le glycérol et le sucrose feraient également parti des sources d'hydrate de carbone utilisées (Harisson et al., 2010). La manipulation génétique est l'avenue favorisée par la compagnie Solazyme.

Comme il a été souligné dans le chapitre précédent, plusieurs techniques de prétraitement et d'hydrolyse peuvent être utilisées pour l'obtention de glucose à partir de différents résidus agricoles et forestiers. Étant donné la nécessité de poursuivre les efforts de R-D, il est difficile d'identifier les techniques à utiliser les plus efficaces. Toutefois, parmi les différentes sources de carbone organique, les résidus agricoles et forestiers représentent pour le moment et à court terme l'alternative la plus intéressante étant donné leur disponibilité et leur coût moins élevé. Les résidus forestiers sont moins dispendieux que les résidus agricoles, et ce, principalement en raison de la densité moins importante des cultures agricoles et donc, des coûts de transport plus importants.

Les rendements obtenus en glucose pour les résidus agricoles tel le blé sont inférieurs à ceux obtenus pour le panic érigé, la bagasse ainsi que les résidus ligneux (Tableau 3.4). Ces rendements sont de l'ordre de 0,179 à 0,313 g de glucose/g de MS et peuvent s'expliquer par un pourcentage moins élevé en cellulose (30-40 %) comparativement aux résidus ligneux (40-55 %) ou à la bagasse de canne à sucre (40-55 %) (Gnansounou, s.d.; Saha et al., 2005; Chen et Yu, s.d.). Les rendements obtenus à partir de résidus forestiers sont quant à eux de l'ordre de 0,32 à 0,45 g de glucose/g de biomasse (Balan et al., 2009). Comparativement aux résidus agricoles, les résidus forestiers présentent des avantages au niveau du coût et de la disponibilité au Québec.

La bagasse présente le meilleur rendement en sucre (0,89 g de glucose/g de biomasse), mais l'éloignement des zones de production par rapport au Québec, aux États-Unis ou au Canada rend l'utilisation de ces résidus peu intéressante pour le moment (Sukumaran et al., 2009). Leur utilisation pourrait devenir intéressante dans le cas où la technologie de transformation des résidus *in-situ* brevetée par la compagnie Comet Biorefining inc. serait commercialisée (Lane, 2009).

Une alternative à l'utilisation du glucose serait également l'utilisation du glycérol obtenu suite à la réaction de transestérification. Cette réaction entraîne la formation d'une mole de glycérol pour chaque mole de triglycéride réagissant avec du méthanol (Chisti., 2007). Le glycérol, un sous produit de la réaction menant à la synthèse d'esther de méthyle, pourrait donc être utilisé en tant que substrat pour la production industrielle de biodiesel (Wageningen University, 2009). Toutefois, dans les ouvrages consultés, peu de microalgues sont en mesure d'utiliser le glycérol comme source de carbone organique. D'ailleurs, l'espèce *Chlorella pyrenoidosa*, possédant la productivité la plus intéressante en lipides pourrait uniquement assimiler le glucose, le galactose et l'acétate (Samejima et Myers; 1958). Parmi les espèces intéressantes pour la production de biodiesel en conditions hétérotrophes, seule l'espèce *Chlorella vulgaris* serait en mesure d'utiliser le glycérol comme source de carbone. Récemment, certains chercheurs ont découvert qu'il était possible d'utiliser les rejets de glycérol en tant que source d'hydrate de carbone pour des microalgues produisant des acides gras de type oméga-3 (Oilgae, 2010). Ces acides gras peuvent ensuite être utilisés pour divers usages telles l'alimentation animale et humaine. Puisque plusieurs compagnies misent sur le génie génétique pour permettre une augmentation de la productivité en huiles des microalgues, il serait possible, dans le futur, que ces efforts rendent possible l'utilisation du glycérol par plusieurs espèces microalgales.

Il a également été démontré par des chercheurs que l'espèce *Chlorella protothécoïdes* était en mesure d'assimiler le sucrose suite à une hydrolyse de jus de topinambour et de canne à sucre et que les rendements en huiles étaient plus élevés d'environ 8 % lorsque du glucose était utilisé (Cheng et al., 2009). Il serait donc possible d'utiliser l'hydrolysate de certaines substances riches en sucrose afin d'alimenter les microalgues.

## **4.2 Aspects économiques**

La faisabilité économique est primordiale à la commercialisation ainsi qu'à la viabilité du processus de production en entier. Bien que plusieurs autres aspects aient des impacts bénéfiques en environnement ou encore socialement, un projet non rentable ne pourra voir le jour. À cet effet, tous les paramètres doivent être calculés afin d'obtenir une approximation réelle des coûts, en tenant compte des investissements de départ, des coûts de production ainsi que les revenus engendrés par la vente du biodiesel. Plusieurs facteurs d'influence sur le coût peuvent être identifiés ainsi que certaines solutions permettant une diminution des coûts de production et donc une meilleure rentabilité.

### **4.2.1 Facteurs d'influence sur le coût**

La majorité des analyses économiques réalisées concernent davantage la production de biodiesel à partir des microalgues de métabolisme autotrophe utilisant le rayonnement solaire comme source de carbone. Il est toutefois possible de faire certaines constatations au niveau de la production de biodiesel en hétérotrophie.

Plusieurs facteurs tels que les coûts des techniques utilisées pour la récolte et l'extraction, la productivité en biomasse, le pourcentage en huile, la consommation énergétique et l'apport en substrat ont une influence majeure sur le coût de revient du biodiesel microalgal. La plupart des auteurs à ce sujet mentionnent que, pour le moment, les coûts de production sont encore trop importants pour permettre de concurrencer face aux prix du pétrole ainsi que pour permettre la production industrielle de biodiesel (Benemann, 2008b). En effet, les revenus engendrés par la vente de biodiesel doivent permettre de rentabiliser les coûts d'investissement tout comme les coûts de production et de maintenance.

Les verrous à lever se situent principalement au niveau technologique ainsi qu'au niveau des coûts d'opération et de maintenance tels ceux nécessaires à la croissance, à la consommation énergétique, à la récolte et à l'extraction des huiles microalgales (Brown, 2009). Au niveau de la production en mode hétérotrophe, un substrat carboné doit être fourni aux microalgues pour assurer leur croissance, ce qui n'est pas nécessaire en mode autotrophe. L'apport en matières premières nécessaires à la culture des microalgues représenterait des coûts de l'ordre de 2,40 \$

par litre d'huile extraite (Li et al., 2007). Ces frais seraient engendrés selon les proportions à 45,4 % pour le glucose, 3,2 % pour les composés inorganiques tels que l'azote et le potassium, 30,6 % pour la consommation énergétique, 14,2 % pour la production de vapeur et 6,6 % pour aseptiser l'air (Li et al., 2007). L'étape subséquente de transestérification ne poserait quant à elle pas de problèmes et est relativement peu coûteuse (Li et al., 2007). En effet, les coûts du raffinage par transestérification se situeraient aux environs de 0,02 \$/litre (Doré-Deschênes, 2009).

Les analyses des coûts réalisées varient en fonction du pourcentage d'huile ainsi qu'en fonction de la productivité. De façon générale, les coûts du biodiesel estimés pour la production en autotrophie varient de 6,60 \$/litre pour une faible productivité d'environ 10g/m<sup>2</sup>/jour et un contenu de 15 % en triacylglycérols à 0,66 \$/litre lorsqu'une productivité de 50g/m<sup>2</sup>/jour et un pourcentage en acides gras de 50 % sont obtenus (Pienkos et Darzins, 2009). D'autres auteurs obtiennent quant à eux des résultats d'environ 1,40 à 1,81 \$/litre tout dépendant du système de culture utilisé et donc des productivités obtenues (Chisti, 2007).

Selon un article traitant des différents modes de production (bassins extérieurs, photobioréacteurs et fermenteurs), la production en fermenteur est la technique la plus avantageuse au niveau des coûts (Tampier, 2009). En effet, les coûts du biodiesel produit en fermenteur seraient environ cinq et neuf fois inférieurs à ceux produits en bassins extérieurs et en photobioréacteurs respectivement (Tampier, 2009). Les facteurs influençant ces coûts sont notamment les coûts de récolte (4,03 \$/litre d'huile) plus élevés dans le cas des bassins extérieurs et ceux d'investissement (15,56 \$/litre d'huile) dans le cas des photobioréacteurs. Le pourcentage en huile permet aussi d'obtenir un prix plus faible en fermenteur à partir de microalgues de métabolisme hétérotrophe étant donné les pourcentages supérieurs en huiles obtenus.

Donc, si une part des immobilisations est comptabilisée dans le prix final du biocarburant, les prix seront supérieurs en mode autotrophe étant donné l'importance des infrastructures à mettre en place. En effet, la construction de bassins extérieurs ou encore de photobioréacteurs entraîne une augmentation substantielle des coûts. Les fermenteurs conventionnels sont, quant

à eux, bien maîtrisés et les coûts d'achat sont inférieurs (Tampier, 2009). Des études estiment que des investissements initiaux de l'ordre de 52 \$/litre de biodiesel seraient nécessaires pour la production en bassin et que ceux-ci pourraient aller jusqu'à 111 \$/litre pour les photobioréacteurs (Tampier, 2009). Les investissements en fermenteur sont de beaucoup inférieurs (2 \$/litre) (Tampier, 2009). Encore une fois, ces estimations dépendent de la productivité obtenue qui est supérieure dans le cas de la production en mode hétérotrophe.

Un facteur non négligeable est la compétitivité des prix du biodiesel par rapport à ceux du baril de pétrole. En effet, les coûts de production additionnés des revenus doivent permettre de vendre le biodiesel à un prix se rapprochant de celui du baril de pétrole. Puisque, pour le moment, les réserves de pétrole permettent encore l'approvisionnement pour plusieurs années, les prix du biodiesel devront diminuer de façon importante ou encore ceux du pétrole devront atteindre un certain seuil critique afin que les projets de production de biodiesel soient rentables.

En effet, lorsque les prix du baril ont atteint leur maximum en 2008, plusieurs projets dans le domaine des biocarburants et énergies renouvelables ont vu le jour. Cependant, les prix actuels ont diminué et se situent aux environs de 81 \$ le baril comparativement à 100,10 \$ en 2008 (Prix du baril, 2010).

Pour estimer la quantité de biomasse algale équivalente à l'énergie contenue dans un baril de pétrole, une équation proposée par Chisti (2008) peut être utilisée :

$$M = \frac{E_{\text{pétrole}}}{q(1-w)E_{\text{biogaz}} + ywE_{\text{biodiesel}}}$$

Où :

M = Quantité de biomasse (tonnes)

$E_{\text{pétrole}}$  = Énergie contenue dans un baril de pétrole (6100 MJ)

q = biogaz produit par la digestion de la biomasse résiduelle (400 m<sup>3</sup>/tonne)

w = Contenu en huiles de la biomasse (70 %)

$E_{\text{biodiesel}}$  = Énergie du biodiesel (34 800 MJ/tonne)

$E_{\text{biogaz}}$  = Énergie du biogaz (23,4 MJ/m<sup>3</sup>)

y = Rendement en biodiesel (80 %)

En utilisant un contenu en huile d'environ 70 %, ce qui correspond aux pourcentages fréquemment obtenus pour les microalgues de métabolisme hétérotrophe, la valeur calculée pour M est de 0,273 tonne. S'il est assumé que la conversion d'une même quantité de biomasse en énergie coûte approximativement le même prix que la conversion d'un baril de pétrole en énergie, la formule suivante peut être utilisée pour obtenir le prix maximal pouvant être payé :

$$\text{Prix acceptable de la biomasse (\$/tonne)} = \frac{\text{Prix du baril de pétrole (\$)}}{M}$$

Étant donné que le prix du baril est actuellement d'environ 81 \$, la biomasse algale devrait être produite à un coût se situant aux alentours de 296,70 \$/tonne pour que celui-ci puisse être concurrentiel par rapport au prix du baril. Présentement, la biomasse coûterait environ 1 540 \$/tonne à produire en mode hétérotrophe comparativement à 2 660 \$/tonne en mode autotrophe (Tampier, 2009).

Les coûts de production sont donc très élevés et ne permettent pas de garantir la viabilité de la production d'algocarburant à court terme d'un point de vue économique. Toutefois, plusieurs facteurs peuvent entraîner une diminution des coûts de production et permettre au biodiesel de source microalgale d'être davantage compétitif.

#### **4.2.2 Diminution des coûts**

Le principal obstacle à la production industrielle de biodiesel est l'aspect économique. D'ailleurs, dans une étude mandatée par le Département de l'Énergie des États-Unis (DOE) pour identifier les éléments prioritaires à développer, quatre constats majeurs ont été identifiés (Brown, 2009). Ceux-ci peuvent être résumés comme suit :

- 1- Faire des efforts de R-D afin de permettre une diminution des coûts de maintenance et d'opération;
- 2- Mettre l'emphase sur la production et la mise en marché de coproduits à forte valeur ajoutée pour permettre de maximiser les revenus;

- 3- Développer des technologies et procédés efficaces pour améliorer les rendements sans affecter les coûts à la hausse;
- 4- Réduire les coûts d'investissement de production de biomasse algale et de récolte.

Plusieurs facteurs permettraient une diminution des coûts de production. En effet, des efforts importants de R-D doivent absolument être fournis pour permettre une amélioration des technologies de récolte et d'extraction de la biomasse algale. Pour l'instant, il n'est pas possible d'identifier une méthode de récolte efficace et peu coûteuse pouvant être appliquée à des fins de production industrielle de biocarburant. Au niveau de l'extraction des huiles, une technique permettant l'extraction à partir de biomasse humide devra être identifiée, ce qui permettrait des économies importantes étant donné la consommation énergétique du procédé de séchage. Puisqu'il est impossible de sécher la biomasse au soleil sur une base annuelle au Québec, l'identification d'une technique est d'autant plus importante pour le développement industriel dans cette province.

Étant donné la nécessité de fournir une source de carbone aux microalgues de métabolisme hétérotrophe, une source alternative au glucose et moins dispendieuse permettrait une diminution des coûts d'opération et de maintenance. Des sources tels le glycérol, les résidus agricoles et forestiers semblent des alternatives intéressantes à explorer davantage. Étant donné l'influence de la source de carbone sur le coût du biodiesel, l'approvisionnement à partir d'une source alternative engendrerait des économies importantes. Toutefois, étant donné les nombreuses réactions et l'énergie nécessaires au prétraitement et à l'hydrolyse de la matière lignocellulosique, les coûts pour ces matières sont probablement moins avantageux que l'utilisation de glycérol ou d'amidon. N'en reste pas moins qu'une fois ces technologies davantage développées, l'utilisation de ces matériaux au Québec pourrait représenter une excellente alternative. Des installations de production de biodiesel devront par contre être développées à proximité des lieux de production pour une diminution des frais de transport et pour que le bilan énergétique soit davantage positif.

L'identification de nouvelles espèces microalgales dont la productivité en huiles serait plus intéressante permettrait aussi une diminution des coûts. Étant donné que quelques centaines de

milliers d'espèces sont encore inconnues, plusieurs possibilités intéressantes demeurent (Mata et al., 2010). D'autres auteurs, quant à eux, mentionnent que la manipulation génétique semble le moyen le plus efficace pour entraîner une diminution substantielle des coûts de production du biodiesel d'origine algale (Benemann, 2009; Brown, 2009). Toutefois, les progrès dans ce domaine restent marginaux pour le moment bien que certaines compagnies y travaillent ardemment.

Une des alternatives permettant une augmentation des revenus est l'extraction de produits à base d'algues ayant une forte valeur ajoutée. Les opportunités de marché devront aussi être identifiées afin de générer le maximum de profits étant donné que la production de biodiesel ne représente qu'une faible contribution aux revenus. En effet, la production de triacylglycérols est minime comparativement aux autres produits possiblement récupérables pouvant être utilisés à d'autres fins que celles des énergies renouvelables (Brown, 2009).

Les divers produits extraits de la biomasse algale peuvent être utilisés à plusieurs autres fins que celle de la production de biocarburant. En effet, tout dépendant de l'espèce microalgale utilisée, certains composés intéressants peuvent être extraits. Parmi ceux-ci, notons les acides gras de type oméga-3 et oméga-6, certaines vitamines (A et B), des antioxydants ou encore des pigments tels que les phycobilines et les caroténoïdes (Li et al., 2008, Mata et al., 2010). Ces coproduits à haute valeur peuvent donc être produits pour assurer une augmentation des revenus. Les domaines les plus exploités par plusieurs compagnies comme Fermentalg et Solazyme sont ceux des nutraceutiques, de l'alimentation animale, des cosmétiques de la nutrition et de la santé (Fermentalg, 2010; Li et al., 2008).

La stratégie de production de biocarburants devra donc s'orienter vers cette avenue permettant d'augmenter considérablement les revenus. Il serait d'ailleurs possible d'atteindre un marché de plusieurs milliards de dollars (Benemann, 2009). Toutefois, une saturation du marché serait possible dans le cas d'une trop grande offre et donc les prix diminueraient de façon importante. Selon plusieurs auteurs, les producteurs devront, en premier lieu, assurer la production efficace de ces coproduits pour ensuite pouvoir se concentrer vers une production

de biocarburants. Les techniques auront ainsi le temps de se développer et d'évoluer et les efforts de R-D pourront porter fruit à plus ou moins long terme.

Un moyen de permettre au biodiesel d'être davantage compétitif provient des subventions de nature diverses. Des subventions accordées comme des crédits d'impôt pour les installations de production, des prêts subventionnés ainsi qu'une collaboration publique dans les efforts de recherche sur les divers procédés impliqués. Pour le consommateur, ces mesures peuvent se traduire par des crédits de taxe lors de l'achat. Les politiques internes pourraient également favoriser l'essor de la production de biocarburant comme par la mise en place d'une taxe du carbone.

La production commerciale est donc fortement dépendante des efforts qui seront investis afin de permettre une diminution des coûts de production et une augmentation des revenus. Les moyens mentionnés ci-haut devront être appliqués dans le futur pour que les projets de commercialisation voient le jour. D'après une étude de marché, cette commercialisation d'algocarburant à grande échelle ne serait prévue que vers 2013 à 2020 (Algae 2020, 2009).

### **4.3 Aspects environnementaux et sociaux**

Bien que les facteurs économiques et technologiques constituent une part importante du facteur décisionnel dans l'application d'une solution au remplacement complet ou partiel des énergies fossiles, il n'en demeure pas moins important d'analyser les facteurs environnementaux et sociaux. La production de biodiesel à partir des microalgues de métabolisme hétérotrophe nécessite des efforts encore importants de R-D et, pour le moment, aucune compagnie ne produit actuellement de biodiesel à l'échelle industrielle. Les informations quant aux impacts environnementaux et sociaux se basent donc principalement sur des hypothèses et des extrapolations des effets qu'aurait une production de ce biocarburant à grande échelle.

Plusieurs des effets environnementaux de la production de biodiesel microalgal semblent positifs. Parmi ceux-ci, notons le potentiel de diminution des émissions de gaz à effet de serre. En effet, les biocarburants ont l'avantage, comparativement aux sources d'énergie fossiles, d'émettre moins de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Le CO<sub>2</sub> émis lors de la combustion du biodiesel

provient des sources de carbone assimilées par les microalgues pour leur croissance, alors que le CO<sub>2</sub> émis par la combustion des combustibles fossiles provient du carbone stocké dans le sol depuis des milliers d'années.

Toutefois, afin de quantifier les avantages réels par rapport aux combustibles fossiles ainsi que par rapport aux autres biocarburants, des analyses de cycle de vie devront être réalisées. Celles-ci permettront une analyse de la consommation énergétique globale impliquée dans chacune des étapes du processus de production du biodiesel, la quantification des émissions de GES totales, la consommation en eau ainsi que l'analyse des besoins en azote et phosphore (Cadoret et Bernard, 2008).

Une analyse détaillée de la consommation énergétique semble représenter pour plusieurs une étape cruciale afin de déterminer les réels avantages de l'utilisation d'algocarburants (Pienkos et Darzins, 2009). Selon une étude récemment publiée concernant la consommation énergétique totale impliquée dans le processus de production en autotrophie, le ratio énergétique serait positif, variant de 3,3 à 7,5 (Pienkos et Darzins, 2009). Les résultats obtenus dépendent toutefois de plusieurs facteurs comme la productivité, le pourcentage en huile, le recyclage des nutriments utilisés, etc. D'autres auteurs mentionnent que, pour le moment, le bilan énergétique établi à partir de scénarios représentatifs de la situation actuelle peut rapidement être compromis par l'atteinte de résultats négatifs (Lardon et al., 2009). Toutefois, ces résultats seraient issus du niveau de maturité des technologies utilisées présentement et des besoins encore nécessaire en R-D.

Pour le moment, plusieurs des biocarburants présentement sur le marché sont critiqués en raison de leurs impacts au niveau de l'utilisation des terres ainsi qu'au niveau de leurs impacts sur la sécurité alimentaire (Tampier, 2009). Les algocarburants ont cet avantage de ne pas entraîner une augmentation de l'utilisation des terres ayant un potentiel agricole étant donné la possibilité de les cultiver sur des terres marginales (Benemann, 2008b). En effet, les fermenteurs peuvent être installés partout, et ce, indépendamment des caractéristiques des sols sous-jacents.

La production de biocarburants tels que l'éthanol à partir du maïs ainsi que le biodiesel à partir du soya a entraîné une augmentation des prix des grains tout en amenant plusieurs producteurs à vendre leurs récoltes pour la production de biocarburants plutôt que pour l'alimentation humaine étant donné les prix payés. La production de biodiesel d'origine microalgale n'entraînera pas de concurrence à l'alimentation humaine dans la mesure où la source de carbone fournie aux microalgues pour leur croissance serait issue des résidus agricoles et forestiers, du glycérol produit lors de la transestérification ou encore des rejets d'amidonnerie (Tampier, 2009; Benemann, 2008a). Si possible, l'utilisation d'une culture tel le *Panicum virgatum* aurait des avantages au niveau de la biodiversité et permettrait de valoriser des terres dégradées ou abandonnées (Carolan, 2009). Toutefois, cette culture est encore présente de façon marginale au Québec et ailleurs dans le monde.

Certains auteurs soulignent que la production de biodiesel microalgal permettrait une diminution substantielle des besoins en fertilisants comparativement à la production à partir de cultures énergétiques. Étant donné les impacts des pesticides sur la biodiversité ainsi que sur la contamination de la ressource en eau, il s'agit d'un avantage comparatif non négligeable (Lardon et al., 2009).

Parmi les aspects plus mitigés, certains auteurs font mention des quantités importantes d'eau nécessaires à la production du biodiesel à partir des microalgues. Il s'agit d'une problématique pouvant entraîner des problématiques au niveau de l'approvisionnement, et ce, principalement dans les régions de pénuries plus marquées (Benemann, 2008b). Cette problématique semble davantage marquée pour la production en mode autotrophe étant donné la nécessité de construire les bassins dans des zones d'ensoleillement maximal souvent caractérisées par une faible pluviométrie et de fortes évaporations. Toutefois, ces besoins en eau seraient moindres que ceux nécessaires à l'irrigation des cultures comme le soya pour des fins de production de biodiesel (Benemann, 2008b).

La majorité des compagnies se spécialisant dans la production de biodiesel microalgal utilisent des techniques de manipulation génétique afin de permettre une augmentation des performances obtenues et donc des revenus. Les microalgues génétiquement modifiées

(OGM) peuvent alors présenter des risques environnementaux si celles-ci sont relâchées dans l'environnement. Il s'agit d'ailleurs d'un sujet grandement controversé. En effet, ces OGM peuvent entraîner des effets importants quant à l'équilibre trophique des espèces indigènes naturellement présentes et donc modifier les écosystèmes actuellement établis tout comme la stabilité de la chaîne alimentaire. La libération de ces souches dans l'environnement pourrait également entraîner la disparition de certaines espèces microalgales moins bien adaptées au milieu naturel.

Ces risques sont toutefois davantage possibles dans le cas de la production en autotrophie puisque les bassins sont situés à l'extérieur. Les microalgues cultivées en fermenteur sont confinées dans celui-ci et les contacts avec l'extérieur sont négligeables. Certaines autres compagnies telles que Fermentalg semblent utiliser des techniques de sélection dirigée qui n'impliquent pas l'introduction de gènes étrangers dans le génome des cellules. Ces techniques favorisent plutôt la sélection naturelle de souches plus performantes via la sélection naturelle en plaçant les espèces dans des milieux contrôlés caractéristiques aux conditions utilisées pour la production de biodiesel. Cette technique est d'ailleurs intéressante en raison du temps de génération très court des microalgues et pourrait également présenter des impacts environnementaux moins importants que ceux inhérents à l'utilisation de souches génétiquement modifiées.

La contamination des cours d'eau par les rejets d'eau chargée en éléments nutritifs tels le phosphore et l'azote pourrait également présenter une problématique. Ces éléments, utilisés pour la croissance des microalgues, peuvent se retrouver en concentrations relativement importantes dans les eaux du procédé puis rejetés à l'environnement. Des conséquences connues telles que l'eutrophisation, l'acidification ainsi que la contamination des cours d'eau pourraient survenir (Lardon et al., 2009). Ces composés doivent donc être recyclés ou encore valorisés afin de diminuer les impacts environnementaux possibles (Cadoret et Bernard, 2008).

Au niveau de l'analyse des aspects sociaux reliés à la production d'algocarburants, peu d'informations sont disponibles. Les principaux impacts peuvent tout de même être soulignés.

En effet, la commercialisation des algocarburants permettrait une diversification des sources d'énergie et donc une diminution de la dépendance face aux carburants d'origine fossiles tout comme une augmentation de la sécurité énergétique des pays importateurs et fortement dépendant du pétrole. Cette diversification des sources d'énergie pourrait d'ailleurs entraîner une stabilisation des prix de l'énergie tout en permettant à certains pays de développer leur économie, leurs infrastructures et d'améliorer le niveau de vie de la population. De plus, étant donné que l'approvisionnement en pétrole est source de plusieurs tensions géopolitiques, la production de biodiesel microalgal favoriserait une amélioration de la qualité de vie et une diminution des conflits.

La création d'emplois dans les domaines de la construction, de la production, de l'entretien et de la recherche et développement fait également partie des impacts positifs de la production de biodiesel à partir des microalgues. Pour la production en photobioréacteurs, de 1 à 15 personnes par hectare seraient requises uniquement pour opérer de telles installations (Tampier, 2009). D'autres études exhaustives pourraient être menées pour cibler et définir les besoins en main d'œuvre.

Afin de favoriser l'acceptabilité sociale de la production d'algocarburants, des efforts devront être fournis afin de sensibiliser et d'informer la population. Une meilleure connaissance générale permettra ainsi de favoriser l'acceptabilité sociale. De plus, puisque certaines compagnies utiliseront probablement des microalgues manipulées génétiquement pour permettre une augmentation des performances, il sera d'autant plus important de favoriser la transparence du processus. Des démonstrations devront d'ailleurs être réalisées afin de démontrer que ces OGM ne causeront pas de problématiques environnementales majeures (Benemann, 2008b).

## CONCLUSION

Le secteur des transports est grandement dépendant des combustibles d'origine fossiles qui, selon les nombreuses prédictions, tendent vers un épuisement des réserves à plus ou moins long terme. De plus, l'utilisation de ceux-ci cause de nombreuses problématiques reliées, entre autres, au réchauffement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre, à l'instabilité des prix et aux nombreuses tensions géopolitiques. C'est donc face à ces constats que les biocarburants tels le bioéthanol et le biodiesel ont vu le jour. Toutefois, la production de ceux-ci a soulevé de nouvelles problématiques dont l'utilisation accrue des terres agricoles, l'augmentation des prix des aliments, la déforestation, la pollution des cours d'eau par les fertilisants et pesticides ainsi que des impacts négatifs sur la sécurité alimentaire. Ces biocarburants ont d'ailleurs un potentiel très limité à assurer un remplacement des combustibles fossiles.

Dans l'optique de limiter les impacts de l'utilisation des combustibles fossiles, la production de biodiesel à partir des microalgues a émergé comme une solution idéale pour assurer un remplacement total ou partiel des carburants non renouvelables utilisés dans le secteur des transports. Plusieurs avantages sont reliés à l'utilisation des microalgues comparativement aux autres biocarburants. En effet, les microalgues possèdent une capacité de production importante en biomasse, un contenu en huile très intéressant ainsi qu'une croissance extrêmement rapide. Leur production n'entraîne pas une augmentation de l'utilisation des terres et n'affecte pas la sécurité alimentaire. La biomasse produite peut également servir à la production de divers produits dérivés pouvant être utilisés pour l'alimentation humaine et animale (vitamines, nutraceutiques, cosmétiques).

Les microalgues peuvent être cultivées en mode autotrophe ou encore hétérotrophe. Les productivités des microalgues en mode hétérotrophe sont de loin supérieures à celles obtenues en mode autotrophe (dix fois supérieures) ainsi qu'à celles obtenues à partir des cultures terrestres (500 à 1000 fois supérieures). De plus, puisque la production des microalgues de métabolisme hétérotrophe est indépendante du rayonnement solaire, il s'agit d'une solution pouvant être explorée pour la production de biodiesel en milieu nordique comme le Québec.

L'étude des caractéristiques de production des microalgues de métabolisme hétérotrophe a permis de constater l'immense diversité des microalgues dont plusieurs espèces sont encore, à ce jour, inconnues. Toutefois, un nombre relativement restreint de microalgues ont été identifiées possédant un métabolisme hétérotrophe. Celles-ci utiliseraient principalement comme source de carbone des monosaccharides tel le glucose. Certaines d'entre elles seraient également en mesure d'utiliser l'acétate, le glycérol et l'amidon.

Les microalgues sont cultivées dans des fermenteurs et différentes étapes sont impliquées dans le processus pour permettre d'obtenir les huiles produites dont la récolte des microalgues et l'extraction des huiles. Ces étapes présentent certaines problématiques au niveau de l'efficacité des techniques utilisées ainsi qu'au niveau de la consommation énergétique exigée notamment en raison des caractéristiques propres à chacune des espèces microalgales. Elles ont d'ailleurs un impact sur le prix de revient du biodiesel. Bien que certaines compagnies dont Fermentalg et Solazyme se spécialisent dans la production de biodiesel à partir de microalgues de métabolisme hétérotrophe, aucune d'entre elles ne produit actuellement d'algocarburant à l'échelle industrielle.

Pour leur croissance, les microalgues de métabolisme hétérotrophe sont dépendantes d'une source de carbone, et ce, principalement sous forme de glucose. Ce glucose peut être obtenu par l'hydrolyse de la biomasse lignocellulosique. Selon le type de biomasse utilisé (herbe, bagasse, bois dur, bois tendre et résidus agricoles), les contenus en glucose diffèrent et les techniques utilisées pour réaliser le prétraitement et l'hydrolyse sont nombreuses. L'efficacité du traitement varie également en fonction de la composition en lignine, hémicellulose et cellulose de la matière choisie. La biomasse lignocellulosique, afin de permettre la production de biodiesel, doit être collectée, entreposée et transportée efficacement vers les installations de production.

Au Québec, étant donné l'importance de l'industrie forestière et agricole dans l'économie, plusieurs types de résidus sont générés et pourraient être utilisés pour la production de biodiesel. Les résidus forestiers générés au Canada proviennent principalement des usines de transformation du bois et sont constitués d'écorces, de sciures et de copeaux. Les quantités

disponibles seraient évaluées à 43 millions de tonnes de MS. Au niveau des résidus agricoles, ceux-ci sont principalement constitués de paille de maïs et de blé. Les quantités estimées de biomasse seraient de 42 millions de tonnes de MS au Canada. Des cultures indigènes du Québec telles que le panic érigé et les cultures ligneuses de saule et de peuplier pourraient également servir de source de glucose pour les microalgues.

L'évaluation des possibilités d'utilisation en fonction des aspects technologiques, économiques et environnementaux permet une analyse globale des possibilités de production de biodiesel à partir des microalgues de métabolisme hétérotrophe. Cette analyse permet également de souligner les efforts à fournir dans les différents domaines pour assurer la viabilité de la production du biodiesel à l'échelle industrielle.

Présentement, les principales limites à la production de biodiesel à partir des microalgues hétérotrophes au Québec se situent au niveau des facteurs technologiques et économiques. En effet, la productivité des microalgues cultivées en fermenteur a été démontrée par l'atteinte de résultats en biodiesel de l'ordre de 2 873 L/m<sup>3</sup>/an. Toutefois, l'atteinte de rendements intéressants en fermenteur de très grande capacité reste à démontrer en raison d'une diminution du taux de croissance lorsque de grands volumes sont utilisés. À court terme, l'utilisation des résidus agricoles et forestiers représente, pour le Québec, l'alternative la plus intéressante pour fournir une source de glucose aux microalgues. À plus long terme, l'utilisation du glycérol comme source de carbone est l'alternative à privilégier pour atteindre une diminution importante des coûts de production étant donné qu'il s'agit d'un sous-produit de la réaction de transestérification.

Au niveau des techniques de récolte et d'extraction, des efforts importants de R-D devront être fournis afin d'identifier des techniques peu coûteuses et efficaces. Pour le moment, ces étapes affectent la rentabilité du processus de production. Des techniques telles la floculation microbienne pour la récolte et l'extraction à partir de micro-ondes devraient être davantage explorées.

Le facteur économique influence la production industrielle du biodiesel. Pour assurer la commercialisation du biodiesel d'origine microalgal, les prix de celui-ci doivent être concurrentiels par rapport à ceux du pétrole et donc se situer aux alentours de 296,70 \$/tonne. Pour le moment, les coûts de production en mode hétérotrophe évalués se situent plutôt aux alentours des 1 540 \$/tonne. Plusieurs éléments peuvent affecter à la baisse les coûts de production et devront être mis en œuvre pour assurer la viabilité du processus. Les efforts de R-D devront se concentrer à la recherche de techniques peu coûteuses, à l'identification de nouvelles espèces microalgales ayant une plus importante productivité en huile ainsi qu'à la recherche de marchés intéressants pour la vente des coproduits générés tels que les acides gras oméga-3 et oméga-6, les vitamines, les antioxydants ainsi que les pigments.

Au niveau environnemental et social, la production de biodiesel microalgal engendre divers impacts positifs comme la diminution de l'émission des gaz à effet de serre, la création d'emplois, la diminution des conflits liés au pétrole, la possibilité d'utiliser des terres marginales et infertiles ainsi que la diminution de l'utilisation des pesticides. Des analyses de cycle de vie devront toutefois être réalisées pour évaluer la consommation énergétique globale impliquée dans le processus de production.

En regard des informations présentées, il appert que la production du biodiesel à partir des microalgues de métabolisme hétérotrophe est une solution envisageable pour le Québec. En effet, la culture en fermenteur est indépendante des températures ainsi que du degré d'ensoleillement. Des productivités intéressantes ont d'ailleurs été obtenues expérimentalement. Toutefois, la commercialisation à grande échelle ne sera possible que si les éléments technologiques et économiques problématiques sont résolus. Étant donné qu'il s'agit d'un domaine en évolution et que des progrès sont constamment réalisés, l'application industrielle demeure un objectif réalisable à plus ou moins long terme.

Cet objectif de commercialisation devra toutefois probablement s'orienter dans un premier temps vers une production efficace des coproduits ayant une forte valeur ajoutée pour ensuite se concentrer à la production de biocarburants. Cette commercialisation ne serait prévue que dans un horizon de trois à dix ans.

## RÉFÉRENCES

- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) (s.d.). Mélasse de betterave et de canne, [En ligne]. <http://www.inst-levage.asso.fr/html1/IMG/pdf/Fichecoprod08.pdf> (Page consultée le 25 novembre 2009).
- Algae 2020 (2009). Advanced biofuels and biomass markets, Producer profiles, and commercialization outlook, [En ligne]. <http://www.emerging-markets.com/algae/Algae2020StudyandCommercializationOutlook.pdf> (Page consultée le 15 octobre 2009).
- Association nucléaire canadienne (2008). Combustibles fossiles, [En ligne]. [http://www.cna.ca/curriculum/cna\\_world\\_energy\\_res/fossil\\_fuels-fra.asp?bc=Combustibles%20fossiles](http://www.cna.ca/curriculum/cna_world_energy_res/fossil_fuels-fra.asp?bc=Combustibles%20fossiles). (Page consultée le 5 octobre 2009).
- Balan, V., Sousa, L.d.C., Chundawat, S.P.S., Marshall, D., Sharma, L.N., Chambliss, C.K. et Dale, B.E. (2009). Enzymatic digestibility and pretreatment degradation products of AFEX-treated hardwoods (*Populus nigra*). *Biotechnology progress*, vol. 25, n° 2, p. 365-375.
- Ballerinni, Daniel (2006). État des lieux, perspectives et enjeux du développement. *In* Institut français de presse, [En ligne]. <http://www.ifp.com/information-publications/ouvrages-ifp/les-biocarburants-d-ballerini> (Page consultée le 1er décembre 2009).
- Barclay, W.R., Meager, K.M., Abril, J.R. (1993). Heterotrophic production of long chain oméga-3 fatty acids utilizing algae and algae-like microorganisms. *Journal of applied phycology*, vol. 6, p.123-129.
- Barsanti, L. et Gualtieri, P. (2006). *Algae : Anatomy, biochemistry, and biotechnology*, [En ligne]. <http://books.google.fr/books?id=t4ZORWvr510C&pg=PP1&dq=algae#v=onepage&q=&f=false> (Page consultée le 20 octobre 2009).
- Baudu, L.J. (2009). Solazyme et ses micro-algues à tout faire, [En ligne]. <http://www.latribune.fr/journal/edition-du-2809/green-business/277711/solazyme-et-ses-micro-algues-a-tout-faire.html> (Page consultée le 2 novembre 2009).
- Beauregard-Tellier, F. (2006). Le pic pétrolier : deux points de vue. *In* Service d'information et de recherche parlementaires, Bibliothèque du Parlement, [En ligne]. <http://www.parl.gc.ca/information/library/PRBpubs/prb0594-f.pdf> (Page consultée le 20 septembre 2009).
- Benemann, J.R. (2009). Microalgae biofuels : a brief introduction, [En ligne]. <http://advancedbiofuelsusa.info/wp-content/uploads/2009/03/microalgae-biofuels-an-introduction-july23-2009-benemann.pdf> (Page consultée le 14 octobre 2009).

- Benemann, J.R. (2008a). Opportunities and challenges in algae biofuels production. *In* food and agriculture organization of the united nations [En ligne]. [http://www.fao.org/uploads/media/algae\\_positionpaper.pdf](http://www.fao.org/uploads/media/algae_positionpaper.pdf) (Page consultée le 16 février 2010).
- Benemann, J.-R. (2008b). Open Ponds and Closed Photobioreactors – Comparative Economics. *In* Benemann Associates and Manager International Network on Biofixation of CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Abatement (réd), 5th Annual World Congress on Industrial Biotechnology & Bioprocessing, Chicago, 30 avril, 2008, [En ligne]. [http://www.bio.org/ind/wc/08/breakout\\_pdfs/20080430/Track1\\_ContinentalA/Session9\\_2\\_30p400pm/Benemann\\_Continental\\_A\\_Wed.pdf](http://www.bio.org/ind/wc/08/breakout_pdfs/20080430/Track1_ContinentalA/Session9_2_30p400pm/Benemann_Continental_A_Wed.pdf) (Page consultée le 28 février 2010).
- Benemann, J.R., Kopman, B.L., Weissman, D.E., Eisenberg, D.E., Goebel, R.P. (1980). Development of microalgae harvesting and High rate pond technologies in California. *Algal biomass*, p.457.
- Borowitzka, M.A. (1998). Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of biotechnology*, vol. 70, p. 313-321.
- Bradley, D. (2006). Canada biomass-bioenergy report. *In* climate change solution, [En ligne]. [http://www.climatechangesolutions.net/pdf/canada\\_country2006.pdf](http://www.climatechangesolutions.net/pdf/canada_country2006.pdf) (Page consultée le 14 décembre 2009).
- Brown, P. (2009). Algal biofuels research, development, and commercialization priorities : a commercial economics perspective, [En ligne]. <http://www.epoverviews.com/oca/Algae%20Biofuel%20Development%20Priorities%200.pdf> (Page consultée le 15 février 2010).
- Cadoret, J-P., Bernard, O. (2008). La production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis. *Journal de la société biologique*, vol.202, n°3, p. 201-211.
- Carolan, M.S. (2009). The cost and benefits of biofuels : a review of recent peer-reviewed research and a sociological look ahead. *Environmental practice*, vol.11, n°1, p.17-24.
- Chen, F. (1996). High cell density culture of microalgae in heterotrophic growth. *Trends in biotechnology*, vol. 14, n°11, p. 421-426.
- Chen, F., Johns, M.R. (1994). A strategy for High cell density culture of heterotrophic microalgae with inhibitory substrates. *Journal of applied phycology*, vol.7, p. 43-46.
- Chen, S. et Yu, X. (s.d.). Evaluating pretreatment technologies for converting washington biomass to bio-ethanol, [En ligne]. [http://www.pacificbiomass.org/documents/BeyondWaste\\_PretreatmentTechForBiomassToEthanol.pdf](http://www.pacificbiomass.org/documents/BeyondWaste_PretreatmentTechForBiomassToEthanol.pdf) (Page consultée le 27 novembre 2009).

- Cheng, Y., Lu, Y., Gao, C., Wu, Q. (2009a). Alga-based biodiesel production and optimization using sugar cane as the feedstock. *Energy & Fuels*, vol. 23, p.4166-4173.
- Cheng, Y., Zhou, W., Gao, C., Lan, K., Gao, Y. et Wu, Q. (2009b). Biodiesel production from Jerusalem artichoke (*Helianthus Tuberosus* L.) tuber by heterotrophic microalgae *Chlorella protothecoides*. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 84, n° 5, p. 777-781.
- Chisti, Y. (2008). Biodiesel from microalgae beats bioéthanol, [En ligne]. <http://www.massey.ac.nz/~ychisti/Trends08.pdf> (Page consultée le 24 septembre 2009).
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*, vol.25, p. 294-306.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire et Agroalimentaire du Québec (CRAAQ) (2008). La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique, [En ligne]. <http://www.craaq.qc.ca/data/DOCUMENTS/EVC030.pdf> (Page consultée le 22 novembre 2009).
- Conseil National des Ingénieurs et des Scientifiques de France (CNISF) (2009). Les microalgues : le nouvel or vert ?, [En ligne]. [http://www.cnisf.org/biblioth\\_cnisf/librairie/microalgues.pdf](http://www.cnisf.org/biblioth_cnisf/librairie/microalgues.pdf) (Page consultée le 7 novembre 2009).
- Department of Energy (DOE) (2006). Breaking the biological barriers to cellulosic éthanol, [En ligne]. <http://genomicsgtl.energy.gov/biofuels/2005workshop/b2blowres63006.pdf> (Page consultée le 16 novembre 2009).
- De Swaff, M.E. (2003). *Docosahexaenoic acid production by the marine alga *Cryptocodinium cohnii**. Thèse de doctorat, Universiteit Delft, Rotterdam, Pays-Bas, 127 p.
- Dias, M.O.S., Ensinas, A.V., Nebra, S.A., Filho, R.M., Rossell, C.E.V., Maciel, R.W. (2009). Production of bioéthanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse : Integration to conventional bioéthanol production process. *Chemical engineering research and design*, vol.87, n°9, p. 1206-1216.
- Dimitrov, K. (2007). GreenFuel Technologies: A. Case Study for Industrial. Photosynthetic Energy Capture, Brisbane, Australia. In Nanostring.net, [En ligne]. [www.nanostring.net/Algae/CaseStudy.pdf](http://www.nanostring.net/Algae/CaseStudy.pdf) (Page consultée le 20 octobre 2008).
- Doré-Deschênes, F. (2009). *Utilisation des microalgues comme source d'énergie durable*. Essai de maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 111 p.
- Eggeman, T et Elander, R.T. (2005). Process and economic analysis of pretreatment technologies. *Bioresource technology*, vol. 96, n°18, p. 2019-2025.

- Energy Information Administration (EIA) (2009). Energy outlook 2009, [En ligne]. [http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2009\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2009).pdf) (Page consultée le 20 septembre 2009).
- International energy agency (IEA) (2008). From first to second generation biofuel technologies: A review of current industry and RD&D activities, [En ligne]. [http://www.iea.org/textbase/papers/2008/2nd\\_Biofuel\\_Gen.pdf](http://www.iea.org/textbase/papers/2008/2nd_Biofuel_Gen.pdf) (Page consultée le 23 septembre 2009).
- Environnement Canada (2003). Examen critique du biodiesel employé comme carburant dans les transports au Canada. In Direction des systèmes de transport : publications [En ligne]. <http://www.ec.gc.ca/cleanair-airpur/CAOL/transport/publications/biodiesel/biodiesel4fr.htm> (Page consultée le 13 décembre 2009).
- Fermentalg (2010). Santé, nutrition, cosmétique, [En ligne]. <http://www.fermentalg.com/> (Page consultée le 12 février 2010).
- Fogg, G.E. (1953). *The metabolism of algae*. London, Methuen, 149 p. (Collection Methuen's monographs on biological subjects).
- Gnansounou, E. (s.d.). Le bioéthanol, [En ligne]. [http://www.google.ca/search?client=safari&rls=en&q=gnansounou+le+bioethanol&ie=UTF-8&oe=UTF-8&redir\\_esc=&ei=NFfKS\\_LSK4H-8Abf2pHFBA](http://www.google.ca/search?client=safari&rls=en&q=gnansounou+le+bioethanol&ie=UTF-8&oe=UTF-8&redir_esc=&ei=NFfKS_LSK4H-8Abf2pHFBA) (Page consultée le 12 novembre 2009).
- Gonsalves, J. B. (2006). United nation conférence on trade and development : An assessment of the biofuels industry in Thailand, [En ligne]. [http://www.unctad.org/en/docs/ditcted20067\\_en.pdf](http://www.unctad.org/en/docs/ditcted20067_en.pdf) (Page consultée le 4 octobre 2009).
- Gonzales, A. D. C. (2008). Overall stocktaking of biofuel development in Asia-Pacific: Benefits and challenges, [En ligne]. [http://www.unescap.org/ESD/energy/dialogue/biofuels/benefit\\_challenges/documents/Overall%20Stocking%20of%20Biofuel%20Development-Final.pdf](http://www.unescap.org/ESD/energy/dialogue/biofuels/benefit_challenges/documents/Overall%20Stocking%20of%20Biofuel%20Development-Final.pdf) (Page consultée le 30 septembre 2009).
- Gopal, A. R. et Kammen, D. M. (2009). Molasses for éthanol : the economic and environmental impacts of a new pathway for lifecycle graanhouse gas analysis of sugarcane éthanol, [En ligne]. <http://iopscience.iop.org/1748-9326/4/4/044005/pdf?ejredirect=migration> (Page consultée le 16 novembre 2010).
- Green car congress (2009). Tsinghua researchers find that sugarcane juice is a good fermentation feedstock for algal biodiesel, [En ligne]. <http://www.greencarcongress.com/2009/06/tsinghua-algae-20090628> (Page consultée le 22 septembre 2009).

- Harisson, F.D., Day, A.G., Trimbur, D.E., Im, C-S., Franklin, S., Coragliotti, A. (2010). Use of cellulosic materials for cultivation of microorganisms, [En ligne]. <http://www.faqs.org/patents/app/20090011480> (Page consultée le 23 novembre 2009).
- Himmel, M.E. (2008). *Biomass recalcitrance : deconstructing the plant cell wall for bioenergy*. Oxford, Blackwell Pub., 505 p. (2007043423).
- Institut français du pétrole (IFP), (2008). L'évolution de la demande énergétique, [En ligne]. <http://www.ifp.fr/espace-decouverte-mieux-comprendre-les-enjeux-energetiques/les-grands-debats/quel-avenir-pour-le-petrole/l-evolution-de-la-demande-energetique> (Page consultée le 2 octobre 2009).
- Institut français du pétrole (IFP), (2005). Réserves de pétrole : des données évolutives en fonction de la technique et de l'économie, [En ligne]. [http://www.ifp.fr/content/download/57554/1264970/version/1/file/IFP-ConfPresse-31mai05\\_Reserves\\_6\\_DonneesEvolutivesSurLesReserves.pdf](http://www.ifp.fr/content/download/57554/1264970/version/1/file/IFP-ConfPresse-31mai05_Reserves_6_DonneesEvolutivesSurLesReserves.pdf) (Page consultée le 23 septembre 2009).
- Iogen corporation (2009). Cellulosic éthanol : process. In Iogen corporation [En ligne]. [http://www.iogen.ca/cellulosic\\_ethanol/what\\_is\\_ethanol/process.html](http://www.iogen.ca/cellulosic_ethanol/what_is_ethanol/process.html) (Page consultée le 28 septembre 2009).
- Kavalov, B., Peteves, S. (2004). Impacts of the increasing automotive diesel consumption in the EU. In European commission, publications [En ligne]. [http://ie.jrc.ec.europa.eu/publications/scientific\\_publications/2004/EUR%2021378%20EN.pdf](http://ie.jrc.ec.europa.eu/publications/scientific_publications/2004/EUR%2021378%20EN.pdf) (Page consultée le 10 octobre 2009).
- Kerstetter, J.D., Lyons, J.K. (2001). Wheat straw for ethanol production in Washington : A resource, technical, and economic assessment. In Washington state university [En ligne]. <http://www.energy.wsu.edu/documents/renewables/WheatstrawForEthanol.pdf> (Page consultée le 15 novembre 2009).
- Khan, S.A., Hussain, M.Z., Prasad, S. et Banerjee, U. (2009). Prospects of biodiesel production from microalgae in India. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 9, p. 2361-2372.
- Kristensen, J.B., Borjesson, J., Bruun, M.H., Tjerneld, F. et Jorgensen, H. (2007). Use of surface active additives in enzymatic hydrolysis of wheat straw lignocellulose. *Enzyme and microbial technology*, vol. 40, n° 4, p. 888-895.
- Krylova, A.Y., Kozyukov, E.A., Lapidus, A.L. (2008). Ethanol and diesel fuel from plant raw materials: a review. *Solid fuel chemistry*, vol.42, n° 6, p. 358-364.
- Kumar, S., Singh, S., Mishra, I. et Adhikari, D. (2009). Recent Advances in Production of Bioethanol from Lignocellulosic Biomass. *Chemical Engineering & Technology*, vol. 32, n° 4, p. 517-526.

- Kumarappan, S., Joshi, S., Maclean, H.L. (2009). Biomass supply for biofuel production : estimâtes for the united states and Canada. *Bioresources*, vol.4, n° 3, p. 1070-1087.
- Kumar, S., Singh, S., Mishra, I. et Adhikari, D. (2009). Recent Advances in Production of Bioethanol from Lignocellulosic Biomass. *Chemical Engineering & Technology*, vol. 32, n° 4, p. 517-526.
- Lane, Jim (2009). Comet biorefining develops low-costs cellulosic sugar technology with focus on pre-treatment process. In *Biofuels digest* [En ligne]. <http://www.biofuelsdigest.com/blog2/2009/09/14/comet-biorefining-develops-low-cost-cellulosic-sugar-technology-with-focus-on-pre-treatment-process/> (Page consultée le 22 novembre 2009).
- Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J. et Bernard, O. (2009). Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae. *Environmental science & technology*, vol. 43, n° 17, p. 6475.
- Lechevalier, Hubert A. (1977). *Volume II Fungi, Algae, Protozoa, and Viruses*. 2ème édition, Floride, Laskin, Allen I., 874 p., CRC handbook of microbiology.
- Lee, J-Y., Yoo, C., Jun, S-Y., Ahn, C-Y., Oh, H-M. (2010). Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae. *Bioresource technology*, vol.101, p. 575-577.
- Lee, A., Lewis, D. et Ashman, P. (2009). Harvesting of a marine microalgae for the production of biodiesel by microbial flocculation. *Phycologia*, vol. 48, n° 4,
- Lee, A.K., Lewis, D.M., Ashman, P.J. (2008). Microbial flocculation, a potentially low-cost harvesting technique for marine microalgae for the production of biodiesel. *Journal of applied phycology*, vol.21, p. 558-567.
- Lefebvre, D. (2007). Huile carburant d'algues, les nouveaux chercheurs d'or vert américains. In *éconologie* [En ligne]. <http://www.econologie.com/biocarburant-a-base-d-huile-de-microalgues-et-centrale-verte-articles-3576.html> (Page consultée le 23 octobre 2009).
- Lewin, R.A. (1962). *Physiology and biochemistry of algae*. New York, Academic Press Inc, 929 p.
- Li, Q., Du, W., Liu, D. (2008). Perspectives of microbial oils for biodiesel production. *Applied microbiology biotechnology*, vol.80, p.749-756.
- Li, X., Xu, H. et Wu, Q. (2007). Large-scale biodiesel production from microalga *Chlorella* protothecoides through heterotrophic cultivation in bioreactors. *Biotechnology and bioengineering*, vol. 98, n° 4, p. 764-771.
- Liang, Y., Sarkany, N., Cui, y. (2009). Biomass and lipid productivities of *Chlorella vulgaris* Under autotrophic, heterotrophic and mixotrophic growth conditions. *Biotechnology*, vol. 31, p. 1043-1049

- Lutzky, Ana. (2009). Dans le noir, les micro-algues mangent du sucre. *In Usine nouvelle* [En ligne]. <http://www.usinenouvelle.com/article/dans-le-noir-les-micro-algues-mangent-du-sucre.159075> (Page consultée le 20 octobre 2009).
- Mata, T.M., Martins, A.A. et Caetano, N. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n° 1, p. 217-232.
- Mäki-Simola, E. et Panagopoulos, K. (2005). La production de bois et de produits de l'industrie forestière dans l'UE25. *In eurostat* [En ligne]. [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY\\_OFFPUB/KS-NN-05-044/FR/KS-NN-05-044-FR.PDF](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-NN-05-044/FR/KS-NN-05-044-FR.PDF) (Page consultée le 13 novembre 2009)
- Meng, X., Yang, J., Xu, X., Zhang, L., Nie, Q., Xian, M. (2009). Biodiesel production from oleaginous microorganisms. *Renewable energy*, vol.34, p.1-5.
- Mohn, F.H. (1980). Experiences and strategies in the recovery of biomass from mass cultures of microalgae. *Algae biomass*, p. 547-71.
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y.Y., Holtzapple, M., Ladish, M. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, vol. 96, n°6, p. 673-686.
- Mousdale, David M. (2008). *Biofuels : biotechnology, chemistry, and sustainable development*. États-Unis, CRC press, 404 p.
- Nathan, S. (2008). Late bloomer. *Fuel technology*, vol. 293, n°7752, p.26-27.
- Novozymes (2003). De la paille au carburant, [En ligne]. [http://www.novozymes.com/NR/rdonlyres/AE97F3F6-42CB-4E61-8F71-290AE2D13477/0/FR\\_straw.pdf](http://www.novozymes.com/NR/rdonlyres/AE97F3F6-42CB-4E61-8F71-290AE2D13477/0/FR_straw.pdf) (Page consultée le 27 novembre 2009).
- National Renewable Energy Laboratory (NREL) (2007). Research advances : cellulosic éthanol, [En ligne]. <http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/40742.pdf> (Page consultée le 5 décembre 2010).
- National renewable energy laboratory (NREL) (1998). A look back at the U.S. department of energy's aquatic species program – Biodiesel from algae, [En ligne ]. <http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf> (Page consultée le 21 octobre 2009).
- Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) (2007). Biocarburants pour les transports: politiques et possibilités, [En ligne]. <http://www.oecd.org/dataoecd/2/40/39743323.pdf> (Page consultée le 25 septembre 2009).
- Oilgae (2009). Harvesting of micro algae, [En ligne]. <http://www.oilgae.com/algae/har/mia/mia.html> (Page consultée le 20 octobre 2009).

- Oilgae (2010). Virginia Tech researcher grows algae using glycérol, [En ligne]. <http://www.oilgae.com/blog/labels/Algae-Cultivation.html> (Page consultée le 20 février 2010).
- Pandey, A., Soccol, C.R., Nigam, P. et Soccol, V.T. (2000). Biotechnological Potential of Agro-Industrial Residues. I. Sugarcane Bagasse. *Bioresource technology*, vol. 74, n° 1, p. 69.
- Pienkos, P.T. et Darzins, A. (2009). The promise and challenges of microalgal-derived biofuels. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 3, n° 4, p. 431-440.
- Pimentel, D. et SpringerLink (2008). *Biofuels, solar and wind as renewable energy systems*. New York, Springer, <http://www.springerlink.com.ezproxy.usherbrooke.ca/content/k34130/> (Page consultée le 23 octobre 2009).
- Prix du baril (2010). Le cours officiel du baril de pétrole, [En ligne]. <http://prixdubaril.com/> (Page consultée le 22 février 2010).
- Purevision (2009). Biomass fractionation, [En ligne]. <http://www.purevisiontechnology.com/biomass-fractionation.html> (Page consultée le 6 décembre 2009).
- Qiang, H., Sommerfield, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M., Darzins, Al. (2008). Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production : perspectives and advances. *The plant journal*, vol.54, p. 621-639.
- Renaud, R. (2007). Nouvelle chaire de recherche industrielle en éthanol cellulosique. In Liaison [En ligne]. [http://www.usherbrooke.ca/liaison\\_vol41/n19/a\\_ethanol.html](http://www.usherbrooke.ca/liaison_vol41/n19/a_ethanol.html) (Page consultée le 20 septembre 2009).
- Richmond, A., Becker, E.W. (1986). *Technological aspects of mass cultivation, a general outline*. CRC handbook of microalgal mass culture, p. 199-243.
- Rosenberg, J.N., Oyler, G.A., Wilkinson, L., Betenbaugh, M.J. (2008). A green light for engineered algae : redirecting metabolism to fuel a biotechnology révolution. *Biotechnology*, vol. 19, p.430-436.
- Rousseau, F. (2009). Solazyme signe avec l'US Navy pour la fourniture d'algo-carburant. In les énergies de la mer [En ligne]. <http://energiesdelamer.blogspot.com/2009/09/solazyme-signé-avec-lus-navy-pour-la.html> (Page consultée le 29 octobre 2009).
- Saha, B.C., Iten, L.B., Cotta, M.A., Wu, Y.V. (2005). Dilute acid pretreatment, enzymatic saccharification and fermentation of wheat straw to ethanol. *Process biochemistry*, vol. 40, p. 3693-3700.

- Samejima, H. et Myers, J. (1958). On the heterotrophic growth of *Chlorella pyrenoidosa*, [En ligne]. <http://mic.sgmjournals.org/cgi/content/abstract/18/1/107> (Page consultée le 25 septembre 2009).
- Schenk, P.M., Thomas-Hall, S.R., Stephens, E., Marx, U.C., Mussgnug, J.H., Posten, C., Kruse, O., Hankamer, B. (2008). Second génération biofuels : High-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenergy ressource*, vol.1, p. 20-43.
- Semaska, D. (2008). Les algues de Solazyme font des vagues, [En ligne]. [http://www.eco-life.fr/print\\_article.php?id\\_article=2136](http://www.eco-life.fr/print_article.php?id_article=2136) (Page consultée le 21 octobre 2009).
- Shelef, G., Sukenik, A., Green, M. (1984). Microalgae harvesting and processing : A littérature review. In National Renewable Energy Laboratory (NREL), [En ligne]. <http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/2396.pdf> (Page consultée le 24 octobre 2009).
- Sinaptec (2009). Fluide et cavitation, [En ligne]. <http://www.sinaptec.fr/?Fluide-et-cavitation> (Page consultée le 7 octobre 2009).
- Solazyme (2008). Technology, [En ligne]. <http://www.solazyme.com/content/technology> (Page consultée le 15 octobre 2009).
- Solix (2009). Solix's product, [En ligne]. <http://www.solixbiofuels.com/content/products> (Page consultée le 22 octobre 2009).
- Statistiques Canada (2009). Grandes cultures et cultures spéciales, [En ligne]. <http://www40.statcan.gc.ca/102/cst01/prim11a-fra.htm> (Page consultée le 2 novembre 2009).
- Stevenson, R.J., Bothwell, M.L., Lowe, R.L. (1996). Algal ecology, [En ligne]. [http://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=gl7hw2WLA1cC&oi=fnd&pg=PA299&dq=heterotrophic+metabolism+microalgae&ots=6Ou7EFLepF&sig=Wjt0nXaRgfSXf-hfOoH\\_0TLmfQ#v=onepage&q=heterotrophic%20metabolism%20microalgae&f=false](http://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=gl7hw2WLA1cC&oi=fnd&pg=PA299&dq=heterotrophic+metabolism+microalgae&ots=6Ou7EFLepF&sig=Wjt0nXaRgfSXf-hfOoH_0TLmfQ#v=onepage&q=heterotrophic%20metabolism%20microalgae&f=false) (Page consultée le 13 octobre 2009).
- Sukumaran, R.K., Singhanian, R.R., Mathew, G.M. et Pandey, A. (2009). Cellulase production using biomass feed stock and its application in lignocellulose saccharification for bio-ethanol production. *Renewable Energy*, vol. 34, n° 2, p. 421-424.
- Tampier, Martin (2009). A sober look at biofuels from algae, *In biodiesel magazine*, [En ligne]. [http://www.biodieselmagazine.com/article.jsp?article\\_id=3313](http://www.biodieselmagazine.com/article.jsp?article_id=3313) (Page consultée le 19 mars 2010).
- Tramoy, P. (2008). Review on the biofuel market, [En ligne]. <http://www.lifescience-online.com/articles.html?portalPage=Lifescience+Today.Articles&a=1016> (Page consultée le 21 septembre 2009).

- University of Georgia (2008). New UGA technology dramatically increases éthanol yield from grasses and yard waste, [En ligne]. [http://www.uga.edu/news/artman/publish/printer\\_080728\\_biomass.shtml](http://www.uga.edu/news/artman/publish/printer_080728_biomass.shtml) (Page consultée le 25 octobre 2009).
- United States Department of Agriculture (USDA) (2009a). World and U.S. wheat production, exports, and ending stocks, [En ligne]. <http://www.ers.usda.gov/Data/Wheat/YBtable04.asp> (Page consultée le 3 octobre 2009).
- United States Department of Agriculture (USDA) (2009b). Corn overview, [En ligne]. <http://www.ers.usda.gov/briefing/Corn/> (Page consultée le 9 octobre 2009)
- United States Department of Agriculture (USDA) (2006). The economic feasibility of éthanol production from sugar in the united states, [En ligne]. <http://www.usda.gov/oce/reports/energy/EthanolSugarFeasibilityReport3.pdf> (Page consultée le 9 octobre 2009).
- Vazhappilly, R. et Chen, F. (1998). Eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid production potential of microalgae and their heterotrophic growth. *Jaocs*, vol. 75, n°3, p.393-397.
- Viel, G. (22 décembre 2009). *Première section chap. 4*. Courrier électronique à Isabelle Cantin, adresse du destinataire : [isabelle.cantin@usherbrooke.ca](mailto:isabelle.cantin@usherbrooke.ca)
- Voith, M. (2009). Solazyme nets big bucks from investors, [En ligne]. <http://www.icis.com/Logon/Logon.aspx?RequestedUrl=/Articles/2009/06/15/9230292/Solazyme-nets-big-bucks-from-investors.html&ArticleSource=5> (Page consultée le 21 octobre 2009).
- Wageningen University (2009). Heterotrophic organisms, [En ligne]. [http://www.algae.wur.nl/UK/technologies/production/heterotrophic\\_organisms/](http://www.algae.wur.nl/UK/technologies/production/heterotrophic_organisms/) (Page consultée le 16 octobre 2009).
- Wen, Z-H., Chen, F. (2003). Heterotrophic production of eicosapentaenoic acid by microalgae. *Biotechnology advances*, vol.21, p. 273-294.
- Werner, D. (1977). *The biology of diatoms*. Oxford, Blackwell Scientific, 498 p. 13. (Collection Botanical monographs).
- Wikipédia (2009a). Cyanobacteria, [En ligne]. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cyanobacteria> (Page consultée le 10 octobre 2009).
- Wikipédia (2009b). Bacillariophyta, [En ligne]. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Bacillariophyta> (Page consultée le 23 septembre 2009).
- Wikipédia (2009c). Canne à sucre, [En ligne]. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Canne\\_à\\_sucre](http://fr.wikipedia.org/wiki/Canne_à_sucre) (Page consultée le 16 octobre 2009).

- Wolfgang, E.B. (1994). *Microalgae : biotechnology and microbiology*, [En ligne]. [http://books.google.fr/books?id=KAKx4I7NWEYC&printsec=frontcover&source=gbs\\_v2\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false](http://books.google.fr/books?id=KAKx4I7NWEYC&printsec=frontcover&source=gbs_v2_summary_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false) (Page consultée le 20 octobre 2009).
- Wu, Z. et Shi, X. (2007). Optimization for high-density cultivation of heterotrophic *Chlorella* based on a hybrid neural network model. *Letters in applied microbiology*, vol. 44, n° 1, p. 13-18.
- Xiong, W., Li, X., Xiang, J. et Wu, Q. (2008). High-density fermentation of microalga *Chlorella protothecoides* in bioreactor for microbio-diesel production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 78, n° 1, p. 29-36.
- Xu, H., Miao, X. et Wu, Q. (2006). High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. *Journal of Biotechnology*, vol. 126, n° 4, p. 499-507.

**ANNEXE 1**  
**BIBLIOGRAPHIE**

- Arifeen, N., Wang, R., Kookos, I., Webb, C. et Koutinas, A. (2007). Optimization and Cost Estimation of Novel Wheat Biorefining for Continuous Production of Fermentation Feedstock. *Biotechnology progress*, vol. 23, n° 4, p. 872-880.
- Balat, M. (2009). Bioethanol as a Vehicular Fuel: A Critical Review. *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 31, n° 13-16, p. 1242-1255.
- Banowetz, G., Boateng, A., Steiner, J., Griffith, S., Sethi, V. et El-Nashaar, H. (2008). Assessment of straw biomass feedstock resources in the Pacific Northwest. *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, n° 7, p. 629-634.
- Berndes, G., Hoogwijk, M. et van den Broek, R. (2003). The Contribution of Biomass in the Future Global Energy Supply: a Review of 17 Studies. *Biomass and Bioenergy*, vol. 25, n° 1, p. 1.
- Carolan, M.S. (2009). The Cost and Benefits of Biofuels: A Review of Recent Peer-Reviewed Research and a Sociological Look Ahead. *Environmental Practice*, vol. 11, n° 1, p. 17.
- Casler, M.D., Mitchell, R., Richardson, J. et Zalesny, R.S. (2009). Biofuels, bioenergy, and bioproducts from sustainable agricultural and forest crops. Papers presented at the Short Rotation Crops International Research Conference, Bloomington, Minnesota, USA, 18-22 August 2008. *BioEnergy Research*, vol. 2, n° 3, p. 77-173.
- Chi, Z., Pyle, D., Wen, Z., Frear, C. et Chen, S. (2007). A laboratory study of producing docosaheptaenoic acid from biodiesel-waste glycerol by microalgal fermentation. *Process Biochemistry*, vol. 42, n° 11, p. 1537-1545.
- Da Silva, T.L., Santos, C.A. et Reis, A. (2009). Multi-parameter flow cytometry as a tool to monitor heterotrophic microalgal batch fermentations for oil production towards biodiesel. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, vol. 14, n° 3, p. 330-337.
- Dadi, A.P., Varanasi, S. et Schall, C.A. (2006). Enhancement of cellulose saccharification kinetics using an ionic liquid pretreatment step. *Biotechnology and bioengineering*, vol. 95, n° 5, p. 904-910.
- Davis, W. (2009). *Overcoming competitive disadvantage: Future commercial viability of microalgae based biodiesel*. M.S., Oklahoma State University, United States -- Oklahoma, 119 p.
- Dodic, S., Popov, S., Dodic, J., Rankovic, J., Zavargo, Z. et Mucibabic, R.J. (2009). Bioethanol production from thick juice as intermediate of sugar beet processing. *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, n° 5, p. 822-827.
- Ehimen, E., Sun, Z. et Carrington, C. (2010). Variables affecting the in situ transesterification of microalgae lipids. *Fuel*, vol. 89, n° 3, p. 677-684.

- Farrell, A.E., Plevin, R.J., Turner, B.T., Jones, A.D., O'Hare, M. et Kammen, D.M. (2006). Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals. *Science (Washington)*, vol. 311, n° 5760, p. 506-508.
- Felix, E. et Tilley, D.R. (2009). Integrated energy, environmental and financial analysis of ethanol production from cellulosic switchgrass. *Energy (Oxford)*, vol. 34, n° 4, p. 410-436.
- Ferrentino, J. (2007). *Microalgal oil extraction and in situ transesterification*. M.S., University of New Hampshire, United States -- New Hampshire, 93 p.
- Fogg, G.E. (1953). *The metabolism of algae*. London, Methuen, 149 p. (Collection Methuen's monographs on biological subjects).
- Gao, C., Zhai, Y., Ding, Y. et Wu, Q. (2010). Application of sweet sorghum for biodiesel production by heterotrophic microalga *Chlorella protothecoides*. *Applied Energy*, vol. 87, n° 3, p. 756-761.
- Gayral, P. (1975). *Les algues : morphologie, cytologie, reproduction, écologie*. Paris, Doin, 166 p. (75-521736).
- Haq, Z. et Easterly, J.L. (2006). Agricultural residue availability in the United States. *Applied biochemistry and biotechnology, 2006 Spring*, vol. 129-132, p. 3-21.
- Hatano, K., Kikuchi, S., Nakamura, Y., Sakamoto, H., Takigami, M. et Kojima, Y. (2009). Novel strategy using an adsorbent-column chromatography for effective ethanol production from sugarcane or sugar beet molasses. *Bioresource technology*, vol. 100, n° 20, p. 4697-4703.
- Heinimoe, J. et Junginger, M. (2009). Production and trading of biomass for energy - An overview of the global status. *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, n° 9, p. 1310-1320.
- Hess, J.R., Wright, C.T. et Kenney, K.L. (2007). Cellulosic biomass feedstocks and logistics for ethanol production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 1, n° 3, p. 181-190.
- Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M. et Darzins, A. (2008). Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *The Plant Journal*, vol. 54, n° 4, p. 621.
- Huang, G., Chen, F., Wei, D., Zhang, X. et Chen, G. (2010). Biodiesel production by microalgal biotechnology. *Applied Energy*, vol. 87, n° 1, p. 38-46.
- Huang, H., Ramaswamy, S., Al-Dajani, W., Tschirner, U. et Cairncross, R. (2009). Effect of biomass species and plant size on cellulosic ethanol: A comparative process and economic analysis. *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, n° 2, p. 234-246.

- Keshwani, D.R. et Cheng, J.J. (2009). Switchgrass for bioethanol and other value-added applications: A review. *Bioresource technology*, vol. 100, n° 4, p. 1515-1523.
- Khatiwada, D. et Silveira, S. (2009). Net energy balance of molasses based ethanol: The case of Nepal. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 9, p. 2515-2524.
- Kim, S. et Dale, B. (2004). Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass and Bioenergy*, vol. 26, n° 4, p. 361-375.
- Lal, R. (2006). Soil and environmental implications of using crop residues as biofuel feedstock. *International Sugar Journal*, vol. 108, n° 1287, p. 161-167.
- Lavigne, A. et Powers, S.E. (2007). Evaluating Fuel Ethanol Feedstocks from Energy Policy Perspectives: A Comparative Energy Assessment of Corn and Corn Stover. *Energy Policy*, vol. 35, n° 11, p. 5918.
- Lehr, F. et Posten, C. (2009). Closed photo-bioreactors as tools for biofuel production. *Current opinion in biotechnology*, vol. 20, n° 3, p. 280-285.
- Li, Y. et Keener, H. (2009). County-Level Analysis of Crop Residues Availability for Fuel Ethanol Production in Ohio. *Transactions of the ASAE*, vol. 52, n° 1, p. 313-318.
- Li, Y., Horsman, M., Wu, N., Lan, C.Q. et Dubois-Calero, N. (2008). Biofuels from Microalgae. *Biotechnology progress*, vol. 24, n° 4, p. 815-820.
- Lu, Y., Warner, R., Sedlak, M., Ho, N. et Mosier, N.S. (2009). Comparison of glucose/xylose cofermentation of poplar hydrolysates processed by different pretreatment technologies. *Biotechnology progress*, vol. 25, n° 2, p. 349-356.
- Luo, L., Van der Voet, E. et Huppés, G. (2009). An energy analysis of ethanol from cellulosic feedstock-Corn stover. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 8, p. 2003-2011.
- Lynd, L.R., Larson, E., Greene, N., Laser, M., Sheehan, J., Dale, B.E., McLaughlin, S. et Wang, M. (2009). The role of biomass in America's energy future: framing the analysis. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 3, n° 2, p. 113-123.
- Miao, X. et Wu, Q. (2006). Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. *Bioresource technology*, vol. 97, n° 6, p. 841-846.
- Nguyen, T.L.T. et Gheewala, S.H. (2008). Life Cycle Assessment of Fuel Ethanol from Cane Molasses in Thailand. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 13, n° 4, p. 301.
- Persson, T., Garcia, A.G.y., Paz, J., Jones, J. et Hoogenboom, G. (2009). Maize ethanol feedstock production and net energy value as affected by climate variability and crop management practices. *Agricultural Systems*, vol. 100, n° 1-3, p. 11-21.

- Pimentel, D. et Patzek, T. (2007). Ethanol Production: Energy and Economic Issues Related to U.S. and Brazilian Sugarcane. *Natural Resources Research*, vol. 16, n° 3, p. 235-242.
- Prochnow, A., Heiermann, M., Ploechl, M., Amon, T. et Hobbs, P. (2009). Bioenergy from permanent grassland - A review: 2. Combustion. *Bioresource technology*, vol. 100, n° 21, p. 4945-4954.
- Round, F.E. (1965). *The biology of the algae*. London, E. Arnold, 269 p.
- Sokhansanj, S., Mani, S., Turhollow, A., Kumar, A., Bransby, D., Lynd, L. et Laser, M. (2009). Large-scale production, harvest and logistics of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) - current technology and envisioning a mature technology. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 3, n° 2, p. 124-141.
- Trainor, F.R. (1978). *Introductory phycology*. New York; Toronto, Wiley, 525 p. (77-26663).
- Wei, A., Zhang, X., Wei, D., Chen, G., Wu, Q. et Shang-Tian Yang (2009). Effects of cassava starch hydrolysate on cell growth and lipid accumulation of the heterotrophic microalgae *Chlorella protothecoides*. *Journal of industrial microbiology & biotechnology*, vol. 36, n° 11, p. 1383-1389.
- Werner, D. (1977). *The biology of diatoms*. Oxford, Blackwell Scientific, 498 p. 13. (Collection Botanical monographs).
- Wilkerson, E.G., Sokhansanj, S. et Perlack, R.D. (2008). Modeling the Availability of Agricultural Residues Suitable for Wet or Dry Harvest Techniques. *In* Anonyme,
- Wyman, C. (2007). What is (and is not) vital to advancing cellulosic ethanol. *Trends in biotechnology*, vol. 25, n° 4, p. 153-157.
- Xiong, W., Gao, C., Yan, D., Wu, C. et Wu, Q. (2010). Double CO<sub>2</sub> fixation in photosynthesis-fermentation model enhances algal lipid synthesis for biodiesel production. *Bioresource technology*, vol. 101, n° 7, p. 2287-2293.
- Zhu, S., Wu, Y., Chen, Q., Yu, Z., Wang, C., Jin, S. et Ding, Y. (2006). Dissolution of Cellulose with Ionic Liquids and its Application: A Mini-Review. *Green Chemistry*, vol. 8, n° 4, p. 325.