

UTILISATION DES MICROALGUES COMME SOURCE D'ÉNERGIE DURABLE

par

François Doré-Deschênes

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

Longueuil, Québec, Canada, juin 2009

IDENTIFICATION SIGNALÉTIQUE

UTILISATION DES MICROALGUES COMME SOURCE D'ÉNERGIE DURABLE

François Doré-Deschênes

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

Sous la direction de monsieur Guy Viel, directeur général du CRBM

Université de Sherbrooke

juin 2009

Mots clés : algocarburants, alternatives énergétiques, applicabilité, biomasse, bioréacteurs, développement durable, GES, microalgues, pétrole.

Le pétrole représente la principale source d'énergie fossile dans le monde. L'exploitation des sources fossiles est de plus en plus associée à des problèmes environnementaux, géopolitiques et économiques. Le développement des agrocarburants a provoqué une explosion du prix des aliments ainsi que plusieurs problèmes environnementaux et humains. Des installations de productions de microalgues peuvent dépasser les taux de productivité des meilleures cultures agricoles conventionnelles par plus de dix fois. Le concept des algocarburants peut représenter une des meilleures options énergétiques pour l'avenir. Exploitable en zones incultes, les technologies algales peuvent permettre de réduire les émissions de GES et d'épurer les eaux usées. De plus, des quantités massives de protéines, et autres substances utiles, pourraient aussi être générées. L'applicabilité du concept dépend de multiples facteurs et elle est analysée à partir des principaux pôles du développement durable. Ce concept prometteur reste confronté aux carburants fossiles ainsi qu'à plusieurs défis scientifiques, économiques et politiques. À moyen terme, l'essor du concept algal pourrait dépendre d'une amélioration substantielle de la productivité des procédés, d'une juste évaluation comparative des externalités et des conséquences découlant de l'exploitation des sources fossiles d'énergie ainsi que d'un soutien suffisant de la population.

SOMMAIRE

Les sociétés industrielles dépendent d'approvisionnements abondants et constants en ressources énergétiques pour fonctionner et progresser. Les sources fossiles d'énergie comblent la plus grande part des besoins énergétiques mondiaux. Le pétrole est la source d'énergie fossile la plus utilisée. Il est essentiel au secteur stratégique des transports.

L'exploitation des combustibles fossiles provoque des effets globaux substantiels. Ils sont la source d'émissions de divers polluants comme les GES liés aux changements climatiques. Ils sont aussi la cause de plusieurs impacts économiques et géopolitiques négatifs. L'instabilité des cours pétroliers, les changements climatiques et la dépendance excessive du secteur névralgique des transports au pétrole, ont stimulé la production de biocarburants de sources agroalimentaires comme le maïs et le soya. Cette demande en biocarburants d'origines agricoles a provoqué une augmentation significative du prix des produits alimentaires de base avec de graves conséquences humaines. De plus, l'accroissement de la production agricole produit, entre autres, des problèmes de déforestation, d'érosion, de contamination et de surconsommation d'eau.

Le concept de produire industriellement des biocarburants à base de microalgues se développe depuis plusieurs années. Il pourrait bien représenter une solution durable importante aux problèmes exposés précédemment. Cet essai a comme objectif de présenter, d'expliquer et d'évaluer l'applicabilité du concept algal pour peut-être aussi contribuer au soutien des travaux en ce sens.

Les microalgues sont des microorganismes très anciens. Ils ont transformé et oxygéné l'atmosphère terrestre primitive et ils participent encore au maintien de son équilibre chimique. Il existerait au moins 100 000 espèces de microalgues, dont une cinquantaine seulement sont bien connues parmi les 40 000 déjà étudiées. Il reste donc encore un très grand potentiel à explorer. Ces microorganismes primitifs capturent, concentrent et fixent efficacement l'énergie diffuse de la lumière ou de sources organiques dans la biomasse algale. Cette biomasse peut alors générer divers biocarburants. De plus, les microalgues peuvent aussi produire des substances nutraceutiques rentables, de grandes quantités de protéines et des fertilisants. Les procédés de production de biomasse algale sont variés.

Certains procédés peuvent permettre d'absorber le CO₂ atmosphérique et les émissions de GES de divers procédés comme celles qui sont issues des centrales au charbon. Leur grande capacité d'épuration d'effluents industriels, municipaux ou agricoles, peut aussi être avantageusement exploitée.

Les microalgues présentent un potentiel de productivité de biomasse pouvant dépasser dix fois les meilleures cultures agricoles conventionnelles. La production industrielle de microalgues se présente donc, de plus en plus, comme une solution durable intéressante pour faire face aux problématiques énergétiques, environnementales et alimentaires actuelles. Des facteurs de production, comme : le climat, la localisation, les souches de microalgues, la disponibilité des ressources de base et le marché des produits à valeur ajoutée, peuvent grandement influencer la productivité. Ainsi, ces facteurs influencent le niveau d'applicabilité des projets basés sur le concept algal.

Les modes et les procédés de production ont évolué au cours des années. Dans le cadre de cet essai, une sélection a été effectuée parmi les activités de recherche passées et en cours afin de choisir les plus représentatives de l'historique et du développement des principales technologies. Ainsi, il est ressorti que le mode autotrophe, le plus répandu et développé. Avec l'énergie solaire, il permet de convertir le CO₂ en biomasse algale polyvalente. Les procédés autotrophes les plus étudiés sont constitués de divers types de bassins et de photobioréacteurs (PBR). Par ailleurs, les procédés hétérotrophes utilisent des bioréacteurs fermés alimentés d'effluents riches en hydrates de carbone. Indépendants des conditions climatiques. Les procédés hétérotrophes représentent donc un potentiel d'exploitation intéressant pour les zones nordiques. L'application de ce concept en régions froides présente des défis particuliers. Ainsi, plusieurs aspects entourant la concrétisation du concept algal en zones nordiques sont étudiés dans cet essai. En outre, on présente aussi une technologie canadienne qui est actuellement développée pour opérer efficacement tous les mois dans les conditions climatiques locales.

L'analyse de l'applicabilité des variantes du concept est effectuée selon les pôles du développement durable. L'étude des facteurs technologiques et scientifiques démontre l'importance qu'ont sur la productivité en bassins les effets de l'ensoleillement, du climat, et de la disponibilité des nutriments incluant celle du CO₂ en particulier.

L'analyse fait aussi ressortir l'importance des choix technologiques, en comparant les rendements de plusieurs initiatives. De plus, la sélection de l'espèce de microalgue se révèle être un facteur de productivité fondamental, car les caractéristiques de ces organismes sont très variées. Les principales approches technologiques de production (mode autotrophe en bassins, en PBR, mode hétérotrophe) sont étudiées et comparées. Le potentiel de productivité des bioréacteurs hétérotrophes, qui dépendent encore de sources agroalimentaires, apparaît supérieur à celui des technologies autotrophes. Toutefois, les bassins sont beaucoup plus simples et abordables que les autres approches mais ils doivent être très grands pour devenir rentables et leur productivité est sensible à l'ensoleillement, à la température et à l'apparition d'espèces indésirables. Les PBR sont plus productifs mais plus dispendieux, fragiles et complexes. Ils seraient préférables aux bassins en zones nordiques ou comme incubateurs de cultures. L'analyse des aspects économiques fait ressortir que le concept serait rentable avec un prix du baril de pétrole supérieur à 80 \$ et que sa généralisation pourrait avoir des effets bénéfiques à long terme. Cette technologie répond aux critères du développement durable. Mais l'usage possible d'OGM et de pesticides suscite des inquiétudes. Les effets sociaux seraient particulièrement positifs dans les pays émergents situés en zones tropicales particulièrement propices à l'algoculture.

En conclusion, depuis des années à travers le monde, ce concept est l'objet d'études qui confirment son grand potentiel. Les températures moyennes élevées, la luminosité intense et la main d'œuvre compétitive de plusieurs zones chaudes ou tropicales les rendent les plus favorables au concept. Les technologies hybrides comportant des éléments issus des bassins et des PBR pourraient permettre d'atteindre des niveaux suffisants de productivité dans une grande diversité de contextes et de latitudes. Par ailleurs, la nécessité d'optimiser la productivité des microorganismes est soulignée, car elle apparaît nécessaire à l'atteinte de niveaux de productions rentables. Durant la période de transition qui s'est amorcée, les partisans de cette nouvelle voie devront affronter la forte compétition offerte par les carburants fossiles encore très abondants et par des substituts pétroliers issus, entre autres, de différentes sources agricoles. Une comptabilité renouvelée qui inclurait l'évaluation des externalités de tous les projets énergétiques et la diffusion régulière d'informations sur les enjeux et les avantages des nouvelles technologies vertes pourraient stimuler l'essor du concept algal.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur d'essai, Monsieur Guy Viel, Directeur général du Centre de recherche sur les biotechnologies marines. Dès le départ, j'ai été heureux de constater que nous partageons un réel intérêt pour le sujet et il a perçu avec justesse l'ampleur du projet. Ainsi, il a su m'aider à cibler plusieurs aspects importants à développer. Il m'a guidé tout en me réservant un niveau optimal de liberté par une gestion souple mais attentive des échéances. Ses suggestions et rétroactions ont permis la couverture d'éléments fondamentaux et ses commentaires encourageants furent particulièrement appréciés lors des périodes de rédaction les plus laborieuses.

Un merci tout spécial est adressé aux administrateurs du programme. Le souci et l'intérêt soutenus manifestés pour l'aboutissement de ce projet furent stimulants. L'écoute, l'ouverture et l'attention reçues furent indispensables et très appréciées.

Enfin, je remercie tout particulièrement ma famille et mes amis pour leur support. Ils ont été une grande source d'inspiration et de ressourcement.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1 MISE EN CONTEXTE	4
1.1 Besoins énergétiques et pétrole	4
1.2 Principales alternatives énergétiques au pétrole et contraintes.....	6
1.2.1 Le charbon	6
1.2.2 Le gaz naturel	7
1.2.3 L'électricité	7
1.2.4 Les biocarburants conventionnels.....	8
1.3 Potentiel des microalgues.....	10
1.3.1 Aspects environnementaux.....	10
1.3.2 Aspects économiques	11
1.3.3 Aspects sociaux	12
2 BASES ET POTENTIEL DU CONCEPT D'ALGOCARBURANTS	13
2.1 Les microalgues.....	13
2.1.1 Caractéristiques de base des microalgues	13
2.1.2 Espèces et diversité	14
2.2 Capture et concentration d'énergie.....	18
2.2.1 Mode autotrophe.....	18
2.2.2 Mode hétérotrophe.....	18
2.3 Principales voies énergétiques pour la biomasse algale	19
2.3.1 Biocarburants liquides.....	20
2.3.2 Méthanisation.....	21
2.3.3 Technologies thermochimiques	21
2.3.4 Filière de l'hydrogène.....	23

3	PRODUCTION INDUSTRIELLE DE MICROALGUES	25
3.1	Facteurs de production	25
3.1.1	Procédés de production	26
3.1.2	Ressources et potentiel de coproductions	26
3.1.3	Biologie et physiologie des microalgues	27
3.1.4	Facteurs environnementaux.....	28
3.1.5	Facteurs d'échelles	28
3.2	Principaux projets	29
3.2.1	Résumé historique	29
3.2.2	Principales technologies en développement.....	34
3.3	Contextes nordiques	45
3.3.1	Projets compatibles aux zones froides.....	46
3.3.2	Initiatives de R-D.....	50
4	ÉVALUATION DU CONCEPT.....	53
4.1	Aspects scientifiques et technologiques	53
4.1.1	Ressources de base pour la production algale	53
4.1.2	Productivité des systèmes autotrophes	57
4.1.3	Productivité des systèmes hétérotrophes	61
4.1.4	Rendements des principaux procédés.....	62
4.2	Analyse des aspects économiques.....	69
4.2.1	Marché de l'énergie.....	70
4.2.2	Comptabilité analytique.....	72
4.3	Analyse des aspects environnementaux et sociaux	77
4.3.1	Aspects environnementaux.....	77
4.3.2	Aspects sociaux	79
	CONCLUSION.....	81
	RÉFÉRENCES	86
	ANNEXE 1 BIBLIOGRAPHIE	100

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Portions relatives des principales sources énergétiques.....	4
Figure 1.2	Courbe de Hubbert pour le pétrole.....	5
Figure 1.3	Centrale au charbon à cogénération du MIT.....	11
Figure 2.1	Diatomées (bacillariophycées) - <i>Emilianahuxleyi</i>	15
Figure 2.2	Algues vertes (chlorophycées) - <i>Micrasterias</i>	15
Figure 2.3	Cyanobactéries (cyanophycées) - <i>Glaucocystis</i>	16
Figure 2.4	Algues dorées (chrysophycées) - <i>Uroglenopsis</i>	17
Figure 2.5	Principales options de transformation de la biomasse algale.....	19
Figure 2.6	Voies de conversion thermiques.....	22
Figure 3.1	Représentation du programme ASP.....	31
Figure 3.2	Première technologie de Green Fuel.....	39
Figure 3.3	Procédé Alduo de Cellana.....	42
Figure 3.4	Diagramme du dispositif de production et du cycle du concept SRCA.....	47
Figure 4.1	Valeurs moyennes annuelles PAR dans le monde.....	55
Figure 4.2	Conditions climatiques optimales dans le monde.....	55
Tableau 3.1	Synthèse des initiatives significatives sélectionnées.....	35
Tableau 3.2	Étapes du programme SRCA.....	49
Tableau 4.1	Exemples de rendement de quelques espèces performantes.....	54
Tableau 4.2	Comparaison des principales technologies autotrophes.....	64
Tableau 4.3	Comparaison des rendements des principaux projets.....	66
Tableau 4.4	Quelques estimations du prix de revient d'algocarburants.....	74

LISTE DES ACRONYMES DES SYMBOLES ET DES SIGLES

AIE / IEA	Agence internationale de l'énergie / International Energy Agency
ARC	Alberta Research Council
ASP	Aquatic Species Program
ASPO	Association pour l'étude du pic pétrolier et gazier
BBL	Un baril (157 litres)
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CRBM	Centre de recherche sur les biotechnologies marines - Rimouski
CRIQ	Centre de recherche industrielle du Québec
DHA	Acide docosahexaénoïque
DOE	Department of Energy - États-Unis
EIA	Energy Information Administration - États-Unis
FIT	Forum international des transports
GES	Gaz à effet de serre
GNL	Gaz naturel liquéfié
ITC	Manitoba Industrial Technology Centre
JGI	Joint Genome Institute du DOE - États-Unis
JGP	Joint Genome Project, initiative du JGI
NRC	National Research Council - États-Unis
NREL	National Renewable Energy Laboratory - États-Unis
NPK	Le groupe « azote, phosphore et potassium »
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économique
OECD	Organisation for economic cooperation and development
OGM	Organismes génétiquement modifiés
PAR	Portion photosynthétiquement active des radiations solaires
PBR	Photobioréacteurs
SODIM	Société de développement de l'industrie maricole
SRC	Saskatchewan Research Council
SRCA / CARS	Système de recyclage du carbone par les algues / Carbon Algae Recycling System
\$	Dollars U.S. (sauf pour le projet SRCA / CARS)

INTRODUCTION

Les sociétés industrielles dépendent de sources stables et abordables d'énergie pour se maintenir et se développer. Le domaine de l'énergie est stratégique mais cette industrie représente la source unique des plus grands impacts globaux (GES, pollutions, conflits, instabilités économiques). Les sources fossiles d'énergie, comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel, constituent la base d'une grande part de l'économie. Les sources d'origines fossiles comblent 81 % des besoins énergétiques mondiaux. À lui seul, le pétrole répond à 35 % de la demande énergétique mondiale (OECD-IEA, 2007).

Les fluctuations rapides de prix du pétrole et des ressources de base ainsi que les changements climatiques de plus en plus associés aux émissions de gaz à effet serre (GES) ont stimulé le développement de sources d'énergies alternatives et renouvelables comme la biomasse, le solaire et l'éolien. L'importance du pétrole, particulièrement pour le secteur névralgique des transports, a contribué à promouvoir la production de biocarburants largement subventionnés, basés sur le maïs et d'autres productions agroalimentaires. Cette tendance a provoqué une augmentation marquée du prix des aliments avec des conséquences dramatiques pour les populations de plusieurs pays. La surproduction agricole qui s'est développée a eu de sérieuses conséquences environnementales comme la déforestation, l'émission de GES, l'appauvrissement des aquifères et la pollution par les engrais et les pesticides.

Chaque crise énergétique stimule la recherche de sources alternatives d'énergie. Cette période ne fait pas exception. Il y a eu depuis quelques années, une multiplication de projets de recherche sur les énergies alternatives dont le concept de produire des biocarburants à partir de la culture intensive de microalgues. La recherche de solutions permettant une transition plus harmonieuse des sources énergétiques fossiles vers des sources durables prend une importance critique pour maintenir des conditions environnementales, économiques et sociales acceptables pour l'avenir (Farrell and Brandt, 2006).

Ce concept particulier évolue depuis plusieurs décennies. Il permet de produire à partir du soleil, de GES, d'eaux usées et de terres impropres aux cultures agricoles, une biomasse algale, laquelle peut être riche en lipides et en hydrates de carbone recherchés.

Le concept d'exploiter l'énergie des microalgues reste encore marginalisé par la grande disponibilité des formes fossiles d'énergie et de l'intérêt massif porté aux sources de biomasses conventionnelles, agricoles ou forestières. Cette approche en évolution rapide est l'objet d'un intérêt global croissant manifesté par le grand nombre de publications émanant d'institutions de recherche reconnues. Plusieurs de ces documents ont servi à la présente étude.

Cet essai vise principalement à présenter, à vulgariser et à évaluer l'applicabilité du concept de biocarburants par microalgues ou « algocarburants », afin de le faire connaître, de mieux le comprendre et de, peut-être indirectement, contribuer au soutien de la recherche et du développement dans le domaine des sources d'énergies durables prometteuses.

On cherche à préciser le potentiel des microalgues comme source d'énergie durable exploitable en zones climatiques variées en regard des principaux aspects du marché de l'énergie et des autres alternatives en développement. Un recensement des progrès passés et en cours de développement est effectué afin de déterminer les plus significatives concrétisations du concept. Les technologies de production les plus prometteuses sont identifiées et analysées. Le travail vise particulièrement à estimer le potentiel et le niveau d'applicabilité du concept d'algocarburants, et de ses variantes, le plus significativement possible en regards des principaux pôles du développement durable.

Les développements du concept d'algocarburants sont rapides, multiples et globaux. Ainsi l'Internet s'est avéré un outil important de recherche et de validation. Cette technologie a ouvert la possibilité d'utiliser plusieurs moteurs de recherche et elle a aussi permis l'accès à une multitude de sites spécialisés de par le monde. La consultation des plus récentes comme des plus anciennes publications fut rendue possible. Plusieurs ont été produites par les pionniers de la spécialité.

La quantité d'informations traitant des fondements et des initiatives de recherche et développement (R-D) du concept est substantielle. Une sélection a permis de dégager les sources d'informations les plus significatives, prometteuses et les mieux documentées qui ont ensuite servi de base à l'étude et à l'analyse des thématiques du concept.

Le traitement des thèmes est organisé selon une approche qui aborde les aspects généraux et progresse vers des éléments particuliers et des analyses plus détaillées. Pour débiter, une mise en contexte traite des besoins énergétiques mondiaux. On y décrit le rôle prépondérant joué par le pétrole. Les principales alternatives développées pour remplacer l'or noir sont aussi évaluées. La mise en contexte est complétée par une présentation du potentiel énergétique des microalgues à tous les niveaux du développement durable. Au deuxième chapitre, les bases et le potentiel du concept d'algocarburants sont abordés par une description de la diversité et des principales caractéristiques des microalgues. Les principaux modes de capture et de concentration d'énergie utilisés par les microalgues sont par la suite présentés et expliqués. Plus loin, sont décrites les principales voies de transformation disponibles pour traiter l'énergie de la biomasse algale. Le chapitre trois traite de la production industrielle de microalgues. Les principaux facteurs qui peuvent influencer les rendements de production de biomasse algale sont expliqués. Par la suite, les projets les plus significatifs et les plus prometteurs sont présentés. La dernière partie du chapitre trois est consacrée aux meilleures initiatives visant utiliser les microalgues en zones nordiques. Le dernier chapitre est appliqué à l'évaluation générale du concept. L'analyse des principaux aspects, technoscientifiques, économiques, environnementaux et sociaux, permet de préciser le niveau d'applicabilité du concept et d'en dégager plusieurs conclusions. Les caractéristiques techniques et le rendement énergétique des principales technologies sont comparés. Le marché de l'énergie ainsi que les coûts et les revenus potentiels sont aussi analysés. Par la suite, les implications potentielles de l'industrialisation du concept sont approfondies pour les dimensions environnementales et sociales.

Dans la conclusion, un retour est effectué sur les principaux objectifs du travail ainsi que sur l'essentiel des résultats et des éléments étudiés. Puis, regard est jeté sur les prochains défis et les perspectives d'avenir.

1 MISE EN CONTEXTE

La raréfaction des matières premières est un problème mondial majeur particulièrement critique au niveau des ressources énergétiques. L'estimation des réserves accessibles de pétrole est difficile parce qu'elle est influencée par divers facteurs technologiques, politiques et économiques. Ce chapitre vise à présenter les principaux paramètres établissant le besoin d'une nouvelle option énergétique durable comme celle qui pourrait naître de la culture industrielle de microalgues.

1.1 Besoins énergétiques et pétrole

Les énergies fossiles constituent la principale source d'énergie de notre civilisation. Depuis plus d'un siècle, une de ces sources d'énergie, le pétrole, est devenu une base majeure de l'économie. Cette substance polyvalente de haute densité énergétique fournit à elle seule plus du tiers des besoins en énergie du monde comme le démontre la figure 1.1 (OECD-IEA, 2007). Au niveau mondial, 95 % des transports dépendent du pétrole et ce secteur névralgique consomme plus de 60 % de la production (OCDE-FIT, 2008).

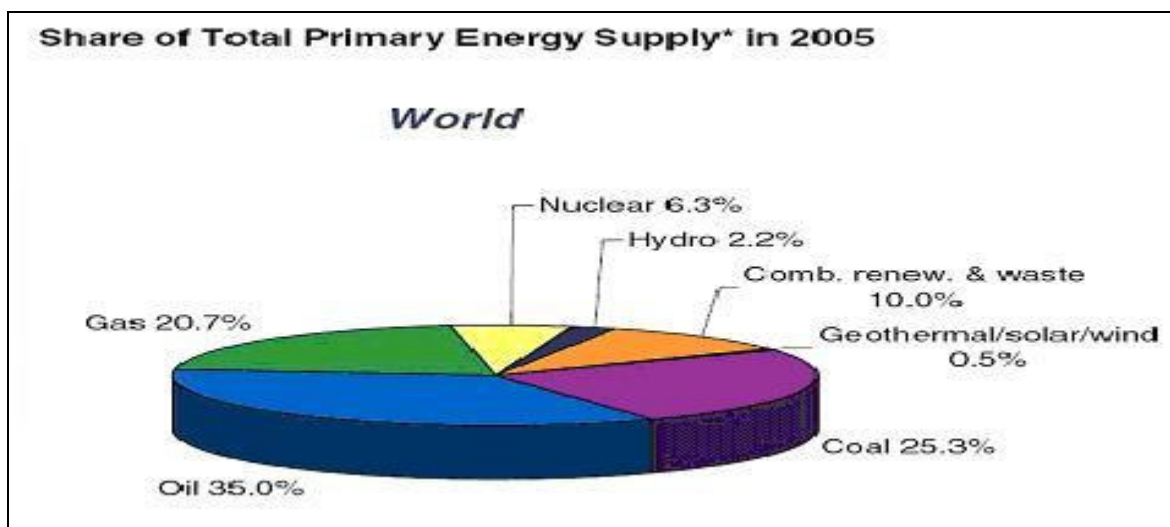


Figure 1.1 Portions relatives des principales sources énergétiques (OECD-IEA, 2007).

Le concept de pic pétrolier élaboré par le géologue King Hubert est discuté depuis 1957. Hubert a établi les principes permettant d'évaluer les réserves des ressources naturelles.

La courbe caractéristique, ou « courbe de Hubbert » (voir la figure 1.2), trace un « pic de production » qui décrit la production de pétrole (ou de toute autre ressource non renouvelable), en fonction du temps. Le sommet ultime ou pic de production correspond à la période d'épuisement d'environ la moitié des réserves d'une ressource, ensuite la courbe redescend. Ce concept serait applicable à l'exploitation de toutes les ressources primaires.

Plusieurs variables peuvent modifier les évaluations du positionnement de la période d'amorce du pic pétrolier comme : la découverte de nouveaux gisements, l'avènement de nouvelles technologies d'extraction ou de sérieuses diminutions de la demande mondiale provoquées par des récessions économiques par exemple.

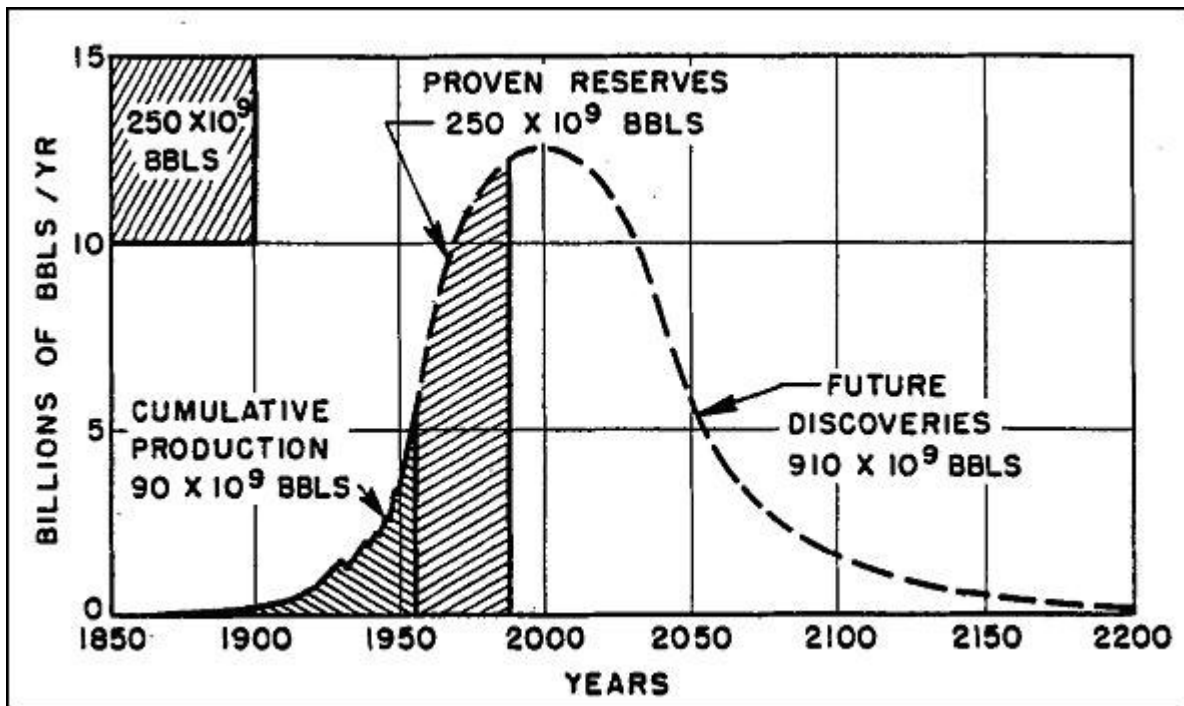


Figure 1.2 Courbe de Hubbert pour le pétrole. (Première représentation pour la production mondiale de pétrole) (Hubbert, 1956).

Évaluer la disponibilité d'une ressource aussi stratégique que le pétrole est complexe mais les prédictions les plus pessimistes considèrent que le pic est déjà atteint (ASPO International, 2008). Les plus optimistes situent toutefois cette période pour peu après 2030 (DOE / EIA, 2008). Les instabilités économiques et politiques ressenties lors des dernières crises pétrolières ont fait ressortir l'importance stratégique acquise par le pétrole.

La conscientisation de cette dangereuse dépendance énergétique au pétrole a fait réaliser l'urgence de préparer des solutions énergétiques alternatives durables. Ainsi, les efforts se concentrent actuellement sur la recherche d'alternatives aux ressources non renouvelables qui sont en phase de raréfaction rapide et dont l'exploitation et les usages sont les plus problématiques et polluants.

Le secteur des transports ne profite pas d'autant de substituts potentiels que les secteurs industriels ou de la production électrique. Ces derniers peuvent être plus polyvalents en utilisant le charbon, le gaz, le nucléaire, la puissance hydraulique, éolienne ou solaire. Ainsi, le secteur des transports dépend plus que tout autres secteurs des nouvelles sources d'énergie incluant les nouvelles technologies électriques plus performantes, plus fiables et plus économiques qui se profilent.

1.2 Principales alternatives énergétiques au pétrole et contraintes

Les principales alternatives au pétrole pour les transports sont liées à l'électricité, au gaz ou aux biocarburants. Mondialement, 40 % de l'électricité est produite avec du charbon, 20 % avec le gaz et 16 % avec le nucléaire. Le charbon, le gaz et le nucléaire sont des sources polluantes, non renouvelables et la forte croissance des économies d'Asie risque de déjouer les estimations les plus élaborées concernant les réserves énergétiques (EIA, 2008).

1.2.1 Le charbon

La demande pour le charbon s'est accélérée. Le charbon représente la source d'énergie connaissant la plus forte croissance. Depuis 30 ans, elle a augmenté deux fois plus rapidement que celle du pétrole mais les réserves mondiales de charbon restent massives. La répartition géographique des dépôts de charbon est mondiale et la ressource est bien distribuée. Selon le World Energy Council, à partir des tendances observées, les réserves connues sont estimées suffisantes pour encore au moins 143 ans (OIAF-EIA-DOE, 2008). La compagnie BP (British Petroleum) estime les réserves de charbon à 910 milliards de tonnes. Elle évalue ces réserves suffisantes pour encore 155 années contre 45 ans pour le pétrole conventionnel et 60 ans pour le gaz.

Mais, les sources de pétrole et de gaz sont souvent situées en zones géopolitiquement sensibles. En Amérique du Nord, surtout aux États-Unis, 44 % de la production d'électricité est issue de centrales au charbon, (Racle, 2007). Toutefois, en plus de générer des quantités massives de CO₂ la combustion du charbon produit des particules fines toxiques, du SO₂ et aussi des NOx sources des pluies acides. Le charbon contient souvent du soufre et des métaux lourds (Olivier, 2002).

L'importance du charbon pour combler les besoins de production d'électricité et l'ampleur des réserves mondiales conduisent à des recherches intensives pour développer des technologies dites de « charbon propre » et de carburants liquides de synthèse. Ces concepts impliquent la mise au point de systèmes de captage, de stockage et possiblement de recyclage du CO₂ (DIDDF, 2006). Le CO₂ capté peut être utilisé pour stimuler la production de biomasse et l'exploitation de cette biomasse peut conduire à la production de biodiesel (NREL, 1998).

1.2.2 Le gaz naturel

Le gaz naturel est moins polluant que le charbon et plusieurs modes de transport efficaces sont possibles comme par gazoducs pour le transport continental ou par méthaniers pour l'exportation outremer de GNL. La Russie, l'Iran et le Qatar détiennent ensemble près de 65 % des réserves mondiales connues de gaz naturel et ces zones sont considérées comme géopolitiquement sensibles. Les réserves de gaz naturel seraient suffisantes pour au moins 500 ans au rythme actuel de la consommation. Mais, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) prévoit que cette consommation va augmenter de 138 % d'ici 2050, surtout pour la production d'électricité (Racle, 2007).

1.2.3 L'électricité

La filière électrique peut bénéficier d'une grande variété de sources énergétiques possibles : fossiles, hydraulique, photovoltaïque, l'éolien, biomasses, solaire thermique et géothermie (en développement), marées et nucléaire. Des combinaisons de ces sources constitueront probablement des solutions d'avenir pour la majorité des besoins mondiaux.

L'énergie électrique des batteries est convertie en travail mécanique avec une efficacité intéressante s'établissant aux environs de 90 %. Mais, les processus de conversion de diverses sources d'énergie en électricité ainsi que les cycles de charge et de décharge des batteries s'effectuent au prix d'une diminution sensible de l'efficacité. Ces pertes font baisser l'efficacité à un niveau se situant entre 70 et 84 % (U.S. Climate Change Technology Program, 2003).

Il reste encore des perfectionnements à apporter aux systèmes de batteries pour en diminuer les coûts et en augmenter la capacité et la vitesse de recharge. Aussi, les systèmes hybrides pourraient être favorisés par la flexibilité et l'autonomie qu'ils permettent (Hendrickson and Ross, 2005). Pour les transports routiers, l'usage de véhicules hybrides ou électriques va se généraliser graduellement et ceci pourrait aider à modérer la demande en carburants (Langlois, 2008). L'énergie électrique va probablement se développer surtout dans les marchés jouissant d'une bonne disponibilité et de prix relativement compétitifs comme au Québec par exemple. Toutefois, les transports maritimes et aériens, tout particulièrement, pourraient rester encore longtemps dépendant des carburants.

Le nucléaire est principalement une source d'électricité non renouvelable. Son exploitation génère des déchets radioactifs nocifs dont certains sont très persistants. Cette voie politiquement délicate ne génère toutefois pas de rejets massifs de GES et pourrait évoluer. En considérant les technologies courantes et les stocks connus d'uranium, les réserves relativement accessibles sont estimées suffisantes pour environ 30 ans en estimant que le pic de production de l'uranium sera atteint aux environs de 2015 (OIAF-EIA-DOE, 2008).

1.2.4 Les biocarburants conventionnels

Les biocarburants issus des produits de l'agriculture suscitent de grandes attentes. Mais plusieurs facteurs les empêchent de répondre significativement aux besoins énergétiques du secteur stratégique des transports. Selon la demande actuelle, il serait impossible de subvenir aux besoins en carburants avec des sources agricoles sans provoquer d'importantes répercussions environnementales et sociales. Selon le National Research Council au États-Unis (NRC), la production de biocarburants en Amérique du Nord et en Europe sera bientôt limitée par les besoins massifs et excessifs en terres agricoles.

Le remplacement de seulement 5 % des besoins en essences nécessiterait environ 20 % des terres cultivables (NRC, 2007). De plus, les rendements actuels des cultures conventionnelles ne permettent pas de produire assez de biocarburants pour remplacer significativement les carburants fossiles (Fulton, 2004). Il faut noter que ces estimations sont basées sur des technologies et des niveaux de consommation en évolution. De plus, les perfectionnements des véhicules hybrides pourraient permettre une réduction significative de la demande de carburants dans plusieurs pays.

En 2006, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) estimait qu'au rythme actuel, d'ici 2030, les biocarburants ne représenteraient pas plus que de 4 à 7 % des carburants utilisés pour les transports routiers. La poursuite d'une certaine autonomie énergétique par l'usage de biocarburants de sources alimentaires est encore théorique parce que la variabilité des prix agricoles menace déjà la sécurité des approvisionnements de plusieurs régions. Ce marché reste toujours sujet aux variations climatiques.

L'impact environnemental des biocarburants conventionnels n'est pas aussi positif qu'escompté. Par exemple, en général avec l'éthanol, de 60 à 80 % de l'énergie de carburant obtenu provient de sources fossiles, car les étapes de production sont très énergivores (OCDE, 2007). Il est possible d'atteindre un taux de 50 % avec le biodiesel issu de graisses animales et végétales. La canne à sucre pourrait, sous certaines conditions, représenter la meilleure culture. À une productivité exceptionnelle, il est possible d'associer la valorisation énergétique efficace des résidus de cannes (bagasse) pour alimenter les usines et en particulier pour récupérer par distillation l'éthanol en solution des fermenteurs. Le rapport énergétique des sources fossiles utilisées sur le rendement énergétique du biocarburant produit atteint 10 %. Toutefois, la culture de la canne à sucre est limitée aux zones tropicales et provoque régulièrement la destruction de forêts. Le Brésil, l'Inde et la Chine en sont les plus grands producteurs (Wikipedia, 2009a). La dégradation des terres, la pollution et les déboisements effectués afin d'accroître les capacités de production se sont généralisés avec des impacts particulièrement sévères signalés en Asie du Sud-Est (OCDE, 2007).

La production de biocarburants conventionnels provoque aussi de sérieux impacts sur le plan socio-économique parce que l'augmentation de la demande mondiale de produits agricoles utilisés pour générer des biocarburants a beaucoup fait augmenter le prix des aliments.

1.3 Potentiel des microalgues

Les problèmes grandissants d'approvisionnements et de pollutions engendrés par l'usage des sources fossiles d'énergie ont stimulé la recherche de solutions alternatives comme les biocarburants de sources agroalimentaires. À leur tour, ces derniers ont causé d'autres problèmes tout en ne répondant qu'à une fraction de la demande massive de carburants dans le monde. Il est possible qu'une conversion graduelle des sources fossiles d'énergie vers des sources plus naturelles comme la biomasse d'algues microscopiques, ou microalgues, représente une avenue raisonnable compte tenu des enjeux globaux.

Depuis plusieurs années, de nombreuses espèces de microalgues sont étudiées et testées dans le monde. Certaines présentent des rendements en biomasse prometteurs avec des teneurs particulièrement élevées en lipides. De plus, leurs rendements énergétiques à l'hectare sont plus de dix fois supérieurs à ceux des meilleures cultures terrestres.

1.3.1 Aspects environnementaux

En général, la plus grande part du concept d'algocarburants repose sur la reproduction en mode accéléré du processus photosynthétique opéré par les microalgues dans les mers. Les technologies qui exploitent ce concept ne nécessitent donc pas d'irrigation, ni de grandes quantités d'eau potable, de pesticides ou d'immenses surfaces de terres cultivables. De plus, ces technologies peuvent être appliquées à l'épuration d'eaux usées et à la captation du CO₂ de centrales au charbon ou d'autres procédés. L'application industrielle de ce concept permettrait aussi l'atténuation de la déforestation et des menaces à la biodiversité qui en découlent, car il peut être appliqué en territoires incultes ou désertiques.

Toutefois, plusieurs recherches sont en cours pour augmenter le rendement des microalgues par l'utilisation de modifications génétiques. Ces manipulations suscitent certaines inquiétudes concernant les dangers potentiels que représenteraient des microalgues génétiquement modifiées relâchées en milieux naturels. Par ailleurs, les quantités importantes de CO₂ produites mondialement pour la production industrielle et électrique peuvent être éventuellement diminuées par des technologies de captation et de conversion associées à la production de biomasse algale.



Figure 1.3 Centrale au charbon à cogénération du MIT. (Le CO_2 qui est capté est conduit aux bioréacteurs à microalgues développés par Green Fuel, visibles en bas à gauche) (Daniélo, 2005).

Le concept d'utiliser de façon industrielle des microalgues pour capter le CO_2 et les oxydes d'azote est activement étudié et expérimenté aux États-Unis et ailleurs dans le monde. (Van Harmelen and al., 2006). La figure 1.3 illustre un des projets majeurs.

1.3.2 Aspects économiques

Ces dernières années, la production de biocarburants (bioéthanol et biodiesel) de sources agroalimentaires a provoqué une augmentation substantielle du prix des aliments dans le monde. À titre d'exemple, en 2006, le prix du maïs a doublé (Smith, 2007). L'exploitation des microalgues peut représenter un grand potentiel de développement économique, car une nouvelle industrie durable pourrait émerger et permettre d'atteindre une meilleure autonomie énergétique, particulièrement dans les pays situés en zones tropicales (ABO, 2008). Cette approche permettrait aussi de préserver le patrimoine forestier et agricole de plusieurs régions du monde en limitant le déboisement et l'appauvrissement des sols surexploités. L'établissement de bourses du carbone pourrait permettre d'échanger avec profits les crédits de carbone générés par les procédés basés sur le concept algal.

Le développement de concepts performants durables et exportables pour produire de la biomasse en grandes quantités favoriserait l'autonomie alimentaire et énergétique de plusieurs pays en développement.

1.3.3 Aspects sociaux

Les produits agricoles subventionnés et souvent excédentaires des pays industrialisés ont remplacé et affaibli les productions locales des pays en développement durant plusieurs années. La demande en carburants considérés verts a fait diverger ces produits vers la production de biocarburants. Ceci a provoqué des déficits alimentaires très rapides causant de sérieuses conséquences dont une augmentation de la malnutrition, de la pauvreté et des désordres sociaux (Mitchell, 2008).

Les microalgues peuvent devenir une source idéale de biomasse convertissable en biocarburants et en protéines économiques. Leur production pourrait éventuellement favoriser la stabilité géopolitique et le développement social de plusieurs régions défavorisées.

2 BASES ET POTENTIEL DU CONCEPT D'ALGOCARBURANTS

Ce concept consiste à produire des biocarburants à partir de la biomasse de microalgues cultivées à des échelles industrielles. Ce concept dépend des caractéristiques uniques de ces micro-organismes. D'une grande diversité, les microalgues se multiplient rapidement en captant et en concentrant l'énergie diffuse de sources lumineuses ou chimiques, pour la convertir en biomasse, une forme polyvalente d'énergie.

2.1 Les microalgues

Les microalgues constituent la base du concept. Très anciennes, elles furent la cause d'un des plus grands changements climatiques de l'histoire de la terre. Leur métabolisme, basé sur la photosynthèse, ajouta des quantités massives d'oxygène à l'atmosphère terrestre primitif toxique, alors saturé en CO₂ et autres GES. Ce changement a permis le développement de formes de vie plus énergiques et évoluées, qui ironiquement, pourraient bien maintenant devoir recourir à leurs services pour corriger la problématique environnementale des GES. À part leur biochimie, la caractéristique première des microalgues est leur petite taille. Les quelques exemples suivants en donnent un aperçu :

- Diatomées classées microplancton de 50 à 500 µm;
- Petites diatomées et de nombreuses chrysophycées classées nanoplancton se situent aux environs de 50 µm;
- Des chrysophycées de petites tailles allant de 0,5 à 50 µm sont classées comme ultra plancton (Coste, 2008).

2.1.1 Caractéristiques de base des microalgues

La majorité des microalgues sont dites photo-autotrophes ou autotrophes. Elles tirent leur énergie de la lumière par photosynthèse et leur principale source nutritive est le CO₂ en solution dans l'eau. Leur relative simplicité et la petitesse de leur taille permettent d'effectuer une photosynthèse très efficace. Elles convertissent ainsi l'énergie lumineuse en lipides et en hydrates de carbone, des formes plus condensées et stables d'énergie.

De plus, leur condition aquatique leur donne un accès optimal à l'eau et en particulier aux nutriments comme le CO₂ dissout. Par exemple, ces petites plantes peuvent être de dix à trente fois plus productives en huiles par unité de surface de production en comparaison avec les cultures oléagineuses terrestres conventionnelles (NREL, 1998).

Certaines espèces peuvent aussi être chémo-hétérotrophes ou hétérotrophes. Ainsi, au besoin, elles sont capables de puiser de l'énergie et des nutriments directement des matières organiques présentes dans le milieu aquatique (Chevalier et al., 2002). Par exemple, l'espèce *Agmenellum quadruplicatum* devient hétérotrophe en conditions de faible luminosité (Van Baalen and al., 1970). On note que l'espèce hétérotrophe *Cryptocodinium cohnii* est exploitée pour produire de l'huile DHA, l'acide gras oméga-3 dont l'importance est de plus en plus reconnue pour le maintien d'une bonne santé (Martek, 2008).

2.1.2 Espèces et diversité

Les microalgues sont très diversifiées et environ 30 000 espèces ont déjà été analysées. Ce nombre représente moins de 10 % du total existant estimé. En 2000, près d'une cinquantaine seulement avaient été étudiées en détails (Cavalla, 2000). Les scientifiques ont analysé les microalgues pour les distinguer et les diviser en plusieurs classes selon des critères généraux comme la pigmentation, la structure biologique et le métabolisme. Les espèces sont ainsi classées en 11 divisions et en 29 classes.

Les quatre classes les plus communes au niveau de l'abondance relative sont les diatomées (*bacillariophycées*), les algues vertes (*chlorophycées*), les cyanobactéries ou algues bleues (*cyanophycées*) et les algues dorées (*chrysophycées*) (Wikipedia, 2008) :

- Les diatomées (*bacillariophycées*)

Les diatomées dominent le domaine du phytoplancton des océans et elles sont aussi présentes en eaux douces ou saumâtres, dans les sols humides ou sous les feuilles humides. Plus de 100 000 espèces de diatomées sont connues. Elles forment des colonies qui apparaissent généralement brunes ou jaunes. Elles sont caractérisées par leurs armures de silice (figure 2.1) qui présentent des structures géométriques complexes et extrêmement variées. Les enveloppes de silice des diatomées sont très résistantes et persistantes.

Ces petites structures peuvent s'accumuler pour former des dépôts de diatomite ou des formations de silex qui forment les strates foncées dans les falaises de craie normandes.

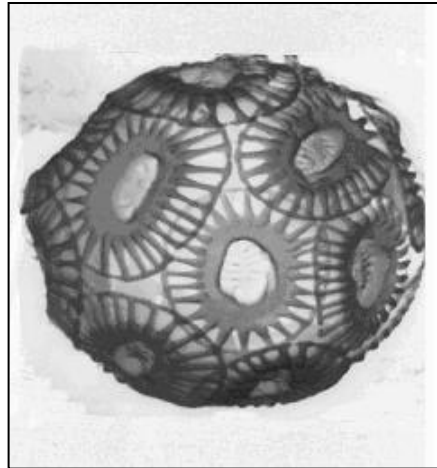


Figure 2.1 Diatomées (bacillariophycées) - *Emilianahuxleyi* (Benemann, 2008).

Elles ont fait l'objet de recherches intensives aux NREL (National Renewable Energy Laboratory) des États-Unis dans le cadre du programme de recherche de l'ASP parce qu'elles produisent des huiles et des protéines intéressantes (NREL, 1998).

- Les algues vertes (*chlorophycées*)

Les *chlorophycées* (figure 2.2) sont très abondantes en eaux douces. Elles peuvent se développer en mode unicellulaire ou en colonies qui peuvent devenir très denses. Elles accumulent l'énergie qu'elles capturent, principalement par photosynthèse, sous la forme d'hydrates de carbone et d'huiles. Elles peuvent tolérer plusieurs types de conditions. Elles se sont d'ailleurs adaptées à des milieux étonnement variés.



Figure 2.2 Algues vertes (chlorophycées) - *Microcystis*, (Coste 2008).

Ainsi, certaines espèces sont aussi capables de vivre sur le sol ou simplement sur des surfaces humides exposées à la lumière. Elles ont fait l'objet de recherches intensives dans le cadre du programme énergétique ASP des États-Unis (NREL, 1998). Plusieurs souches sont prometteuses pour la production de biocarburants (Lindblad, 2006).

- Les cyanobactéries ou algues bleues (*cyanophycées*)

Cette famille très ancienne de microalgues compte environ 2 000 espèces dans divers habitats. De structure semblable à celle des bactéries, ces organismes ne sont liés à aucun autre groupe d'algues et peuvent, en outre, absorber et fixer l'azote directement à partir de l'atmosphère. Des espèces de cyanobactéries peuvent être aussi rouges, jaunes ou brunes. Mais leur couleur caractéristique (figure 2.3) signale trop souvent des eaux polluées. Mise à part des traces de NPK, elles ne nécessitent essentiellement que de quatre sources vitales : eau, lumière, azote et CO₂. On peut en trouver dans tous les habitats, aquatiques ou terrestres, rassemblant ces sources vitales. Les spirulines (*Spirulina sp.*) sont parmi les plus produites dans le monde essentiellement pour la consommation humaine (CRBM, 2006).



Figure 2.3 Cyanobactéries (cyanophycées) - Glaucozystis (Koning, 1994).

- Les algues dorées (*chrysophycées*)

Les *chrysophycées* se retrouvent surtout en eaux douces et on en compte environ 1 000 espèces. Elles ressemblent aux diatomées mais elles peuvent arborer plus de couleurs que ces dernières : du jaune au brun en passant par l'orange (figure 2.4). Chez plusieurs espèces d'algues dorées l'enveloppe est principalement composée de silice et en plus faibles proportions de cellulose (NREL, 1998). La sélection des souches, les plus productives et adaptées à chaque application, est critique pour assurer le succès d'un projet de culture.

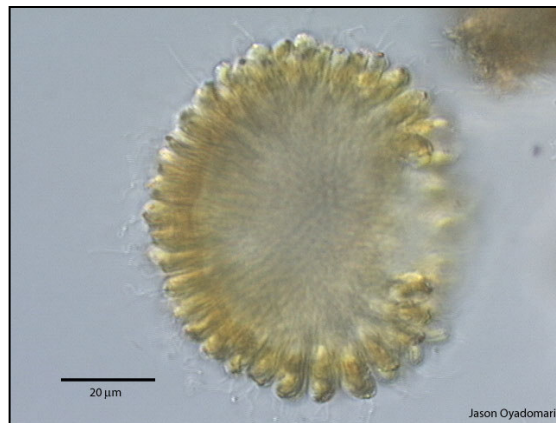


Figure 2.4 Algues dorées (chrysophycées) - Uroglenopsis (Oyadomari, 2005).

Une grande part des efforts de recherche est consacrée à la quête des meilleures souches. Le choix d'une espèce de microalgue dépend ultimement des organismes disponibles aptes à synthétiser les produits visés et à atteindre des rendements nécessaires pour répondre aux contraintes économiques et techniques. Aussi, ce choix doit tenir tout particulièrement compte des conditions climatiques prévalentes, surtout des températures moyennes et minimales ainsi que de la disponibilité des nutriments nécessaires (NREL, 1998). Par exemple, une productivité de 100 tonnes de biomasse algale par hectare par année est considérée possible dans les zones chaudes rencontrées au sud des 35° de latitude nord.

Par ailleurs, on considère de plus en plus que la biofloculation peut grandement faciliter la « récolte » des microalgues. Elle peut permettre de réaliser des économies se situant aux environs de 15 % au niveau des étapes d'extraction. Une captation de 95 % de la biomasse en suspension serait ainsi rendue possible en 24 heures (Van Harmelen and al., 2006).

2.2 Capture et concentration d'énergie

Le concept algal repose sur le principe de capter et de concentrer des formes renouvelables diffuses et irrégulières d'énergie comme le rayonnement solaire ou l'énergie chimique de certains rejets en les convertissant en biomasse algale, une forme stable et concentrable d'énergie. De la biomasse algale, il est possible d'extraire des biocarburants, une forme concentrée, stable et polyvalente d'énergie. La compatibilité des biocarburants avec les infrastructures pétrolières actuelles de traitement et de distribution permet déjà de grandes économies. Deux modes de production sont principalement développés pour générer de la biomasse algale : le mode autotrophes et le mode hétérotrophe (Chevalier et al., 2002; CRBM, 2006).

2.2.1 Mode autotrophe

Ce mode plus commun est basé sur des organismes qui captent l'énergie solaire et du CO₂ pour les convertir en biomasse par photosynthèse. Il est le plus souvent appliqué en mode ouvert dans des bassins extérieurs. Des développements sont aussi entrepris pour réaliser des applications en mode fermé avec des photobioréacteurs (PBR) plus efficaces.

2.2.2 Mode hétérotrophe

Le mode hétérotrophe est basé sur des organismes qui peuvent fonctionner sans lumière en utilisant, pour se développer, l'énergie chimique et le carbone issus d'autres matières organiques. Plusieurs espèces produisent des lipides et d'autres composés recherchés. La production est effectuée en mode fermé dans des bioréacteurs semblables à des fermenteurs. Les niveaux élevés de productivité enregistrés sont prometteurs pour la production de biocarburants (Xu and al., 2006). Cette approche, relativement coûteuse, dépend de nutriments agroalimentaires; ce qui en limite l'application à la production de substances à hautes valeurs ajoutées comme certains suppléments alimentaires ou produits pharmaceutiques spécifiques (Martek, 2008; Xiong and al., 2008). L'exploitation des substances à valeur ajoutée pourrait éventuellement aider au financement de la production de biocarburants (CRBM, 2006).

2.3 Principales voies énergétiques pour la biomasse algale

L'énergie contenue dans la biomasse issue de la culture de masse des microalgues peut être extraite selon divers modes : la méthanisation, la distillation d'alcools, la combustion et l'extraction des lipides.

Le choix peut dépendre de plusieurs facteurs techniques (nature des intrants, produits ou usages visés, complexité, facteurs d'efficacité) ainsi que des facteurs financiers, environnementaux ou sociaux. Les filières actuellement les mieux développées et les plus considérées sont présentées dans la figure 2.5 par un schéma qui illustre les principaux modes de transformation d'une biomasse ainsi que les produits issus de leur application.

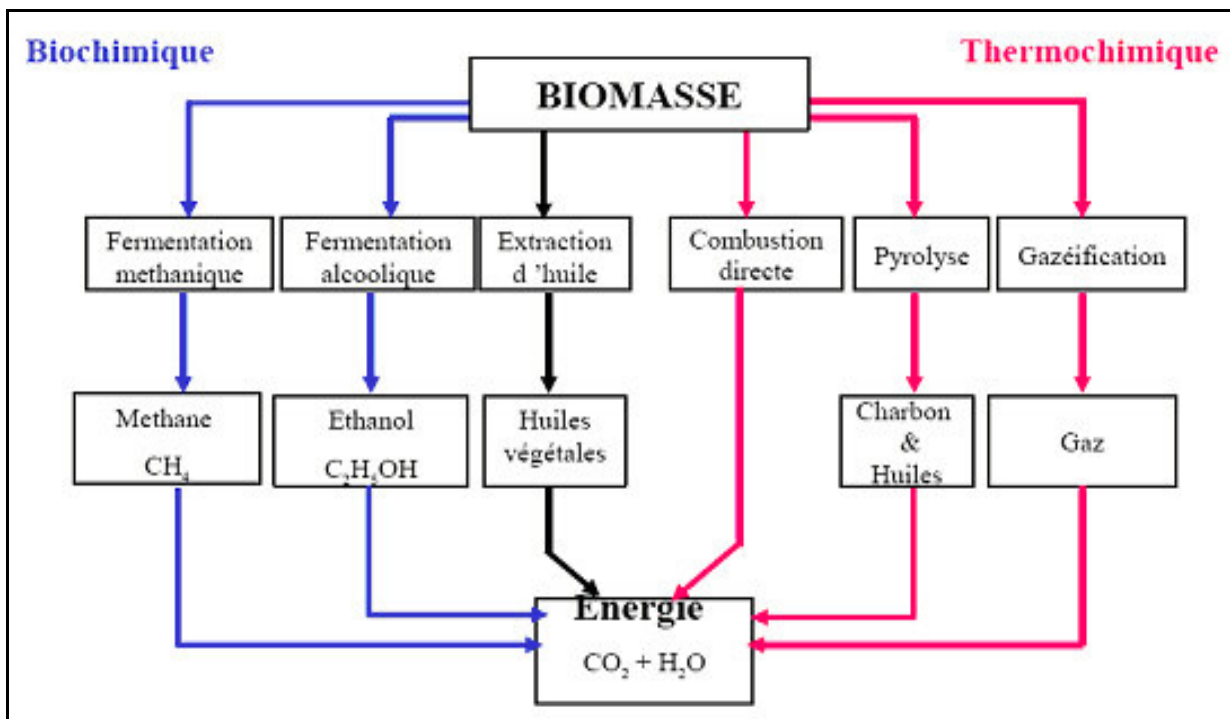


Figure 2.5 Principales options de transformation de la biomasse algale (Blin, 2007).

Les technologies les plus courantes sont représentées au centre de la figure. En général, le taux moyen d'humidité des intrants est déterminant dans le choix de la filière de conversion énergétique. La biomasse issue des algues est très humide et coûteuse à assécher. Les techniques thermochimiques peuvent traiter une telle biomasse mais au prix d'une baisse du rendement, car l'évaporation de l'eau absorbe beaucoup d'énergie.

À part d'éventuels composés nutraceutiques ou pharmaceutiques, la portion lipidique transformable en biodiesel reste la fraction la plus profitable de toute la biomasse. Toutefois, selon les circonstances, la fraction restante peut être valorisée ou traitée pour produire divers biocarburants de synthèse. Les principales technologies sont ici présentées et analysées.

2.3.1 Biocarburants liquides

Les biocarburants liquides sont particulièrement recherchés par le secteur des transports parce que ces substituts ne nécessitent que des modifications mineures aux infrastructures de raffinages, de transport, de distribution et d'utilisation. Il s'agit de combustibles liquides issus de la transformation de matières non fossiles d'origines végétales ou animales.

Les biocarburants sont utilisés depuis le début de l'automobile. Par exemple, la Ford « Model T », produite de 1903 à 1926, roulait à l'éthanol et d'autres moteurs de machines fixes utilisaient de l'huile d'arachides. D'ailleurs, à l'origine, le grand ingénieur allemand Rudolf Diesel conçut son moteur particulièrement efficace et robuste, pour fonctionner à l'huile végétale.

Pour les biocarburants liquides, il existe deux principales filières : le biodiesel obtenu à partir des huiles ou lipides extraites de biomasses végétales ou animales et les distillats, comme le bioéthanol en particulier, obtenus par la distillation de solutions de biomasses traitées par fermentation.

Les huiles biocarburants obtenues à partir de la fraction oléagineuse de la biomasse sont utilisables avec un minimum de traitement dans les moteurs diesels classiques. L'ester méthylique d'huiles végétales, obtenu après la réaction d'estérification des lipides avec l'alcool méthylique, est mieux adapté aux nouveaux moteurs diesels des voitures. Il peut être utilisé comme additif au diesel dans des proportions modestes de 5 à 30 % pour former un biodiesel composé plus fluide et mieux adapté aux zones tempérées ou froides. Cette voie fut privilégiée par le programme ASP du NREL des États-Unis. On y menait des recherches pour déterminer les espèces de microalgues les plus productives en lipides et les meilleurs moyens d'optimiser les rendements de production.

L'extraction des microalgues de l'eau reste un défi technique et économique (NREL, 1998). L'approche de production de bioéthanol permet d'éviter de devoir assécher la biomasse qui sert alors de base pour composer un substrat à fermenter dans des cuves adaptées. Les biocarburants légers (éthanol et méthanol) issus de la fermentation des hydrates de carbones en alcools, par l'action de micro-organismes, sont alors recueillis par distillation. Ces alcools peuvent être utilisés purs pour alimenter des moteurs de véhicules « Flex » (compatibles avec l'essence et l'alcool). Grâce à cette filière le Brésil a d'ailleurs atteint une autonomie énergétique enviable. En combinaison avec de l'isobutène, ces alcools peuvent aussi servir à produire des éthers : le ETBE (éthyltertiobutyl-éther) et le MTBE (méthyl-tertiobutyl-éther) qui sont utilisés comme additifs dans l'essence (Thermia, 2008).

2.3.2 Méthanisation

La méthanisation est effectuée dans des cuves spéciales en conditions anaérobies. Cette approche étudiée depuis longtemps permet aussi d'éviter de devoir assécher la biomasse (Golueke and Oswald, 1959). Ceci est un avantage parce que le séchage de la biomasse demande beaucoup d'énergie. La méthanisation est particulièrement utilisée pour traiter les boues issues de l'épuration des eaux usées (Chevalier et al., 2002). En général, il est plus simple et énergétiquement favorable de traiter par fermentation les matières organiques très humides. La principale filière de cette voie est la bio-méthanisation qui est effectuée en mode anaérobie. La méthanisation serait particulièrement efficace et permettrait de recueillir jusqu'à 75 % de l'énergie thermique disponible dans la biomasse (Van Harmelen and al., 2006). Par contre, la fermentation visant la production d'alcools, reste l'approche préférée pour générer des biocarburants liquides (APERe, 2008).

2.3.3 Technologies thermochimiques

Les technologies thermochimiques de conversion de la biomasse sont en principe relativement plus simples que les précédentes. La figure 2.6, qui suit, présente les principales voies thermochimiques et les particularités qui les caractérisent. Elles se distinguent principalement par la quantité relative d'oxygène qu'elles utilisent, le mode de chauffage de la charge ainsi que par la composition chimique de leurs rejets.

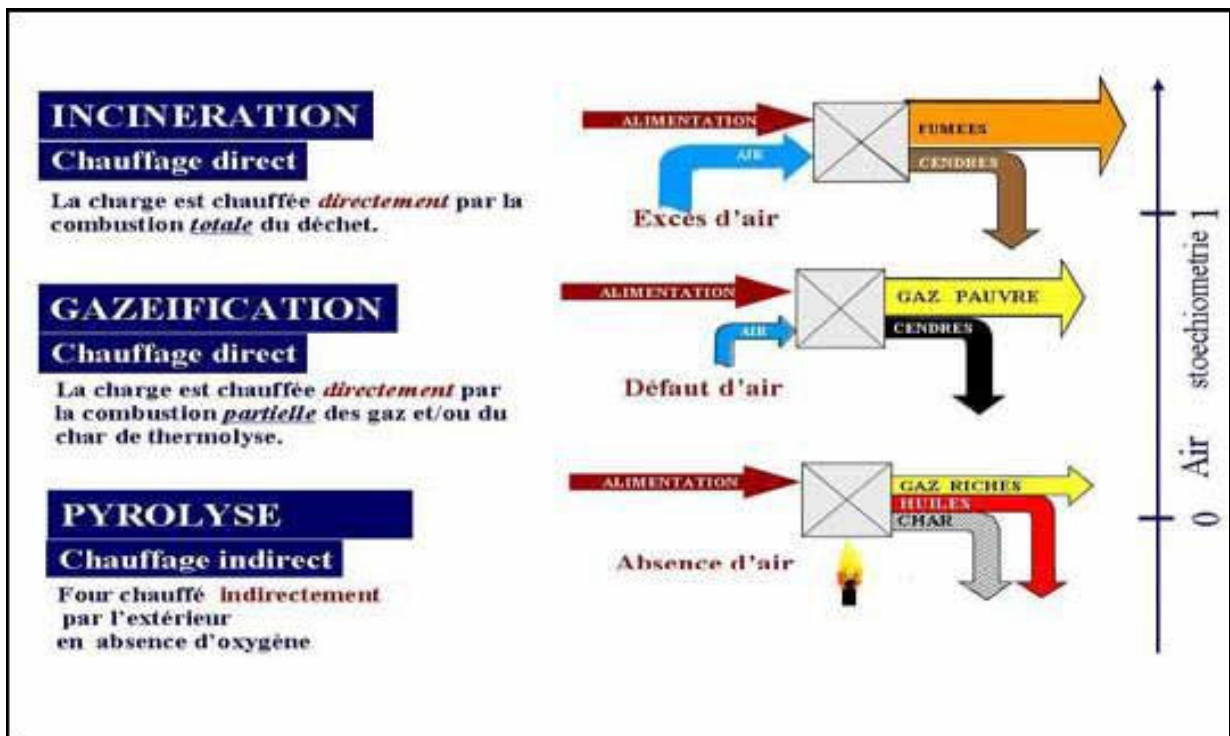


Figure 2.6 Voies de conversion thermique (Fontana, 2007).

L'approche par combustion directe est la technique la plus simple de conversion énergétique. Elle consiste à incinérer le plus efficacement possible la totalité de la biomasse après en avoir retiré une quantité suffisante d'humidité et en fournissant à la charge tout l'oxygène nécessaire à sa combustion, plus un certain excédant. La chaleur récupérée peut produire de la vapeur pour activer des turbines et générer de l'électricité ou servir dans d'autres procédés. L'extraction de l'eau est une étape importante, car l'évaporation de l'eau résiduelle absorbe beaucoup d'énergie durant la combustion. La simplicité de cette approche peut parfois compenser la baisse de rendement causée par l'humidité résiduelle de la biomasse destinée à être brûlée. Le séchage solaire est une option à considérer selon les conditions climatiques moyennes prévalentes.

La combustion directe est le mode de conversion énergétique le plus répandu. Il est particulièrement utilisé pour la valorisation énergétique de déchets domestiques et industriels. Son utilisation est aussi considérée pour alimenter des centrales électriques ou de cogénération (Kadam, 2001). Le charbon bon marché reste le principal combustible des centrales électriques ce qui entrave le développement de cette voie pour la biomasse algale.

De plus, la combustion directe représente une avenue qui ne permet pas d'exploiter tous les sous-produits potentiellement plus rentables de la biomasse algale. Des changements de politiques, de stratégies énergétiques et d'organisation du marché du carbone pourraient favorablement modifier le contexte (Dimitrov, 2007).

La gazéification et la pyrolyse sont exécutées en conditions de défaut d'oxygène. Un manque partiel d'oxygène caractérise la gazéification. Toutefois, la pyrolyse se distingue par une absence totale d'oxygène associée à l'addition d'une source indirecte de chaleur. La gazéification est plus souvent utilisée comme prétraitement pour d'autres procédés industriels comme la pyrolyse. Elle produit un gaz de faible valeur calorifique contaminé par les particules de fumées. Ces techniques peuvent être complémentaires : le coke partiel produit par la pyrolyse peut, lui aussi, être gazéifié pour produire du gaz de synthèse. Ces technologies particulièrement utilisées dans la valorisation des déchets sont complexes et dispendieuses mais plusieurs projets sont financièrement rentables (Fontana, 2007).

2.3.4 Filière de l'hydrogène

La généralisation de la filière de l'hydrogène reste à long terme un objectif intéressant, car l'hydrogène est un vecteur polyvalent d'énergie sans carbone. Des recherches sont en cours pour produire de l'hydrogène ou d'autres combustibles comme le méthanol directement à partir de cultures algales actives. Ces approches représentent un réel potentiel de progrès, parce que certaines de ces techniques permettraient aussi de produire des biocarburants, dont l'hydrogène, sans détruire les microorganismes (Lindblad, 2005). Une extraction non destructrice de biocarburants directement des microalgues permettrait l'économie des coûts de production de nouvelles cultures et les complications issues de l'extraction de la biomasse en solution et de son traitement pour en extraire l'énergie.

Toutefois, la densité énergétique de l'hydrogène est beaucoup plus faible que celle du biodiesel par exemple. À 250 atmosphères de pression un litre d'hydrogène contient 7 % de l'énergie d'un litre de biodiesel. Pour une même autonomie ceci nécessiterait l'usage de réservoirs d'hydrogène 14 fois plus gros que pour le biodiesel. Aussi, les nouveaux moteurs diesels rivalisent ou dépassent déjà l'efficacité des piles à hydrogène actuelles.

De plus, les infrastructures énergétiques liées aux transports sont principalement adaptées aux carburants liquides. La rentabilité globale de la voie de l'hydrogène reste à être démontrée (Briggs, 2004).

Par exemple, le DOE (U.S. Department of Energy) a déterminé que le biohydrogène devrait se vendre au moins 2,60 \$ / kg pour atteindre la viabilité économique (l'énergie d'un kilo d'hydrogènes équivaut approximativement à l'énergie d'un gallon d'essence). Ce prix nécessiterait l'atteinte d'une efficacité de conversion de l'énergie solaire en hydrogène de 10 %, alors que les taux actuels d'efficacité de conversion, qui se situent aux environs de 1 %, obligerait un producteur éventuel à devoir demander un prix de 13,53 \$ / kg pour être rentable.

Des recherches prometteuses sont menées sur certaines souches mutantes de microalgues qui seraient capables d'atteindre des niveaux d'efficacité de conversion lumineuse supérieurs à 20 % (Wikipedia, 2009b).

3 PRODUCTION INDUSTRIELLE DE MICROALGUES

Depuis une cinquantaine d'années, plusieurs méthodes de production de microalgues ont été étudiées et testées. Plusieurs d'entre elles sont présentement encore perfectionnées et développées un peu partout dans le monde, surtout pour produire des nutraceutiques comme la spiruline et des huiles riches en oméga-3.

La production de quantités suffisantes de biocarburants compétitifs avec les carburants fossiles dépend de la mise à l'échelle industrielle des meilleures variantes de techniques reconnues et du développement de méthodes de production plus performantes.

Dans le passé, le concept d'utiliser des microalgues comme source de biocarburants fut l'objet de nombreuses initiatives de recherche et de développement. Plusieurs sont ressorties depuis les dernières années avec la dernière crise pétrolière et les soucis environnementaux liés aux GES.

Une masse considérable d'informations circule sur le concept des algocarburants et une sélection s'est imposée. Le tri et la sélection des initiatives les plus significatives, les mieux documentées et publiées ont été effectués. Une attention particulière vise le traitement des recherches et des technologies algales, en relation ou compatibles, avec les conditions rencontrées en zones nordiques.

3.1 Facteurs de production

Plusieurs facteurs fondamentaux influencent et définissent les procédés et les choix technologiques présentés dans les prochaines sections. Les recherches issues de multiples programmes ont permis de déterminer et de documenter les principaux facteurs de production dont dépend le succès de la production intensive de microalgues dans un but énergétique : procédés, ressources, coproduits possibles, environnement et échelles de production.

3.1.1 Procédés de production

Les procédés se divisent en deux principales classes : la production basée sur l'énergie solaire (mode autotrophe avec la photosynthèse) et la production basée sur l'énergie issue de sources organiques de carbone (mode hétérotrophe).

Plusieurs approches autotrophes se pratiquent intégralement ou partiellement en bassins en conditions ouvertes soumises aux conditions climatiques et requièrent souvent de grandes superficies de captation. L'énergie solaire est diffuse et son intensité est directement liée à la localisation géographique. Les approches de production autotrophe sont aussi appliquées en photobioréacteurs (PBR).

Le mode hétérotrophe sans illumination est dépendant de la disponibilité de sources peu dispendieuses, fiables, abondantes et riches en nutriments organiques. Indépendants des conditions extérieures, les procédés hétérotrophes nécessitent des bioréacteurs.

3.1.2 Ressources et potentiel de coproductions

Le niveau de disponibilité des ressources demeure un facteur critique pour le passage du stade expérimental à l'échelle industrielle et pour assurer la rentabilité d'un procédé de production de microalgues

Les principales ressources nécessaires aux procédés autotrophes de production, sont l'espace, le climat, l'eau et le CO₂. En pratique, il est nécessaire de trouver un territoire plat abordable en zones relativement chaudes avec une disponibilité adéquate en eau et en nutriments incluant des sources de CO₂ relativement accessibles. Par exemple, des sources d'eaux usées en zones ou près de zones désertiques avec des industries voisines. (Van Harmelen and al., 2006). Pour opérer en mode hétérotrophe, des effluents abordables, fiables et riches en carbone organique suffisent (Chevalier et al., 2002).

Par ailleurs, les projets de production d'algocarburants peuvent être plus résilients et rentables s'ils incluent dans leurs procédés, des coproductions ou des traitements complémentaires dont la rentabilité est reconnue : nutraceutiques, épuration d'eaux usées.

Les microalgues manifestent un fort potentiel pour l'épuration d'effluents. Leur métabolisme rapide et efficace permet une extraction et une concentration significative des composés azotés et du phosphore dans l'eau. Le poids sec de la biomasse obtenue est beaucoup plus riche en azote (10 %) et en phosphore (1 %) qu'avec les plantes vasculaires. La production d'engrais est donc un débouché possible (Benemann and al., 2002).

La rentabilité d'un concept est consolidée par l'intégration de coproduits à forte valeur ajoutée pour lesquels un marché existe déjà. De plus, il serait aussi préférable de cibler des coproduits en demande ou avec un fort potentiel et d'exploiter leurs caractéristiques exclusives (CRBM, 2006).

3.1.3 Biologie et physiologie des microalgues

La recherche de souches idéales est à la base du succès du concept. Une souche idéale dominerait le milieu de culture avec une productivité près du maximum théorique en synthétisant un maximum de lipides. Elle pourrait être aussi de nature autofloculante afin d'en faciliter la récolte. Les recherches en ce sens se poursuivent.

Ainsi, les divers projets de production intègrent des programmes de collecte, de caractérisation et de sélection d'espèces prometteuses de microalgues. Plusieurs approches cherchent aussi à optimiser des caractéristiques (productivité, taux et types de lipides) et à modérer les effets de facteurs négatifs (comme la photo inhibition, la photosaturation et la sensibilité à certains facteurs environnementaux) par des techniques de sélections dirigées et de manipulations génétiques.

Moins de 10 % des espèces de microalgues ont été étudiées et cette immense diversité méconnue représente un fort potentiel pour de nouvelles découvertes. On recherche les espèces les plus performantes et les mieux adaptées aux conditions de culture de divers milieux. La biodiversité des microalgues photosynthétiques est immense et son ampleur est estimée à plus de 100 000 espèces (Sheehan and al., 1998). Ce facteur implique aussi les possibles problèmes de contamination de cultures sélectionnées par des espèces locales possiblement plus agressives, moins productives ou prédatrices ainsi que les contraintes associées à la gestion des risques environnementaux potentiels (NREL, 1998).

Il est constaté dans plusieurs recherches que l'augmentation de la teneur en lipides des microalgues pouvait être induite par divers stress comme la réduction en nutriments mais aussi que ces stress sont accompagnés par une diminution du taux de division cellulaire. En fait, la moyenne de rendement de la production de lipides diminue lors des périodes de restriction nutritive ce qui annulerait les gains atteints (NREL, 1998). Il est observé que les microalgues autotrophes haussent graduellement leur productivité à mesure que l'intensité lumineuse est augmentée mais qu'elle décroît à partir d'un certain seuil. Une saturation lumineuse se produit dans les sites récepteurs. Les seuils de saturation varient selon les espèces et différentes techniques cherchent à mieux distribuer l'intensité lumineuse pour augmenter la productivité des procédés (Kok and Businger, 1956; CRBM, 2006).

3.1.4 Facteurs environnementaux

La lumière disponible est le facteur fondamental. Il est directement lié à la latitude. La température serait le second facteur physique le plus important mais reste le principal modulateur pour une même disponibilité lumineuse. Le mélange du milieu de culture est nécessaire pour permettre une bonne exposition des cellules à la lumière et de bien répartir la chaleur et les nutriments (Edward, 2008). La température influence directement les processus physiologiques et elle agit directement sur le degré de solubilité des gaz dans l'eau (CRBM, 2006). De plus, les fluctuations de ces facteurs peuvent agir directement sur les rendements (NREL, 1998).

3.1.5 Facteurs d'échelles

La transposition de la production en laboratoire à une production de masse engendre souvent de multiples problèmes comme des niveaux trop élevés de turbulences, des problèmes de contaminations et de contrôle des paramètres biologiques, les variations de température ou de pression, la sédimentation et la dégradation des matériaux. Les rendements obtenus en laboratoire restent un défi à reproduire et à conserver à des échelles supérieures parce que les conditions idéales sont difficiles à maintenir homogènes dans de grands volumes de culture (Barbosa, 2003).

3.2 Principaux projets

L'historique du concept d'utiliser les microalgues comme source d'énergie remonte étonnement à au moins cinq décennies mais on assiste depuis trois ans à une augmentation étonnante du nombre de projets visant la production d'énergie avec la biomasse algale. De 2006 à 2008, les investissements dans le domaine ont explosé. Des initiatives majeures ont eu lieu partout dans le monde. Aux États-Unis et au Japon notamment, plusieurs centaines de millions de dollars furent consacrées à l'étude et au développement de divers types d'approches de production.

3.2.1 Résumé historique

Le développement de la production de biocarburants par la culture de microalgues remonte au début des années 50 avec la publication de l'ouvrage *Algal culture from laboratory to pilot plant* par J.-S. Burlew. Cet ouvrage est un classique du domaine qui a servi de base à plusieurs autres recherches (Burlew, 1953).

Une sommité du domaine, le docteur John R. Benemann retrace en 1951 les premières cultures de masse expérimentales de microalgues effectuées dans un but énergétique. Ces essais menés sur les toits du MIT étaient effectués dans des bassins en forme de piste de course sous des pellicules de plastique (Benemann-NREL-AFOSR, 2008).

On doit noter les travaux de Meyer et Graham, du département de zoologie et de botanique de l'Université du Texas, sur les rendements des cultures de masse d'algues microscopiques autotrophes. On retrouve l'essentiel de ces travaux dans la publication *On the mass culture of algae. ii. yield as a function of cell concentration under continuous sunlight irradiance* (Meyer and Graham, 1958). Il faut aussi mentionner les travaux du Dr Bessel Kok sur l'étude détaillée de la biophysique de la photosynthèse. Il est l'auteur de plusieurs études qui ont permis d'optimiser les procédés, en particulier : *Kinetics of Photosynthesis and Photo-inhibition* et *Absorption Changes induced by the Photochemical Reaction of Photosynthesis* (Kok, 1956; *id.* 1957). Par ailleurs, les chercheurs Denzel L. Dyer et D.-E. Richardson de la compagnie aérospatiale Martin du Colorado furent parmi les premiers à étudier les technologies et les matériaux applicables à la culture des microalgues.

La teneur de leurs travaux qui sont résumés dans le document *Materials of Construction in Algal Culture* démontre l'intérêt grandissant que suscitait déjà cette voie (Dyer, 1961).

Enfin, il faut tout particulièrement souligner les travaux de Golueke et Oswald qui en 1959, publiaient les résultats de leurs recherches sur la méthanisation de biomasse algale dans *Biological Conversion of Light Energy to the Chemical Energy of Methane*. Leurs travaux ont démontré qu'il était possible de convertir l'énergie de la lumière (solaire ou autre) en énergie chimique, du méthane dans ce cas-ci, avec un système en boucle fermée. Le système consistait en une section de captation de la lumière avec des microalgues, une seconde section dite d'activation avec des bactéries en condition d'oxygénation et finalement une section de digestion anaérobie des microalgues et des bactéries pour la méthanisation. Les nutriments de base (NPK) étaient circulés et recyclés. Ces chercheurs obtenaient un taux de production de 667 litres de biogaz à 71 % de méthane par kg de matière sèche digestible introduite. Ainsi, ils ont évalué à 3 % le taux global maximal de rendement obtenu lors de la conversion de l'énergie lumineuse en méthane. Ils postulaient déjà que ce taux de conversion s'améliorerait substantiellement avec le perfectionnement des méthodes de culture comme semble le démontrer les récents développements (Golueke and Oswald, 1959).

Ainsi, au début des années 60, ils décrivaient déjà un concept d'envergure, innovateur et remarquable de production d'énergie durable. Ils proposaient un système de production de biocarburant en boucle basé sur la culture de masse de microalgues dans des dizaines d'étangs géants de 40 hectares. Le procédé prévu incluait des étapes de floculation et de concentration suivies d'un procédé de méthanisation (Benemann and al., 2002).

Dans ce concept, le biogaz alimentait une génératrice électrique et les gaz d'échappement ainsi que les résidus de la digestion anaérobie servaient à produire d'autres microalgues et à stimuler leur croissance. L'eau d'appoint provenait d'eaux usées riches en azote et en phosphore (Benemann and al., 2002).

La figure 3.1 qui suit, présente un exemple de ce à quoi pourrait ressembler l'application spectaculaire de l'ambitieux concept, avec bassins géants, proposé par Golueke et Oswald.



Figure 3.1 Représentation du programme ASP. (Basée sur le concept de Golueke et Oswald) (Benemann, 2008).

À partir de la fin des années 70, la plus grande part des efforts de recherche sur la production de carburants issus de sources aquatiques fut effectuée par le biais du « Aquatic Species Program » (ASP) des États-Unis. De 1978 à 1996, le DOE (Department of Energy) des États-Unis a subventionné le développement de la recherche d'alternatives au pétrole pour les transports à partir des microalgues. Ce projet de plus de 25 millions de dollars échelonné sur 18 ans a couvert en détails les éléments fondamentaux du concept de produire des biocarburants à partir de la biomasse de microalgues. De plus, les rapports des recherches effectuées dans ce programme furent efficacement et largement publiés. Le principal objectif de ce programme était d'explorer la faisabilité technique et économique du concept de produire du biodiesel à partir de microalgues. Ce programme visait aussi à déterminer les meilleures espèces ainsi que les technologies les plus efficaces sur la base d'analyses techno-économiques de divers concepts de production. Dans les années 80, plusieurs études et analyses furent effectuées dans le cadre de ce programme. Elles étaient basées sur des hypothèses favorisant une haute productivité comme notamment des conditions climatiques idéales et une alimentation auxiliaire en CO_2 . Dans le contexte de l'époque, il fut déterminé que les systèmes en étangs ouverts extérieurs étaient les plus économiques.

En 1988, dans le cadre de l'ASP, un projet pilote fut constitué sous la responsabilité de J.-C. Weissman de la compagnie Microbial Products. Les objectifs de ce projet étaient de confirmer la productivité d'espèces prometteuses, de tester les principaux paramètres dont le taux de conversion du CO₂ en biomasse et d'effectuer des essais de production en eaux salines et à l'air libre. Les travaux furent réalisés à Roswell au Nouveau-Mexique de 1988 à 1990. Les installations comprenaient deux étangs extérieurs de 100 m² du type piste de course (*race way*) équipés avec des agitateurs à palettes.

Cette conception de bassin est devenue classique parce qu'elle est simple, efficace et peu coûteuse. Les opérations de Roswell ont permis de déterminer que les espèces autochtones qui envahissaient les bassins de façon naturelle produisaient aussi les meilleurs rendements et que la température était le facteur le plus limitatif. Les rendements annuels moyens calculés en grammes (biomasse sèche) produits par mètre carré s'établirent à 10 grammes par jour (Weissman and Tillett, 1992).

Malgré la confirmation du grand potentiel du concept microalgues-biodiesel étudié, le programme ASP dû s'arrêter en 1996. Il fut victime de coupures de fonds et de la difficile compétition d'un pétrole encore relativement trop bon marché. En plus des restrictions budgétaires, d'autres facteurs administratifs favorisaient alors la réattribution des subventions vers les recherches sur le bioéthanol, alors considérées comme une filière dont la rentabilité était jugée plus facile et techniquement plus rapide à développer.

Le rapport issu de ce projet est devenu une référence du domaine. C'est probablement le document qui traite des algocarburants le plus complet et le mieux diffusé à ce jour. De plus, ce rapport rassemble les résultats détaillés de recherches parmi les plus pertinentes et il inclut des analyses fouillées des aspects les plus importants du concept.

L'instabilité des prix pétroliers et la poursuite d'une autonomie énergétique stratégique ont récemment contribué à relancer les recherches du NREL par des programmes de coopération. Ainsi, en 2007 et 2008, il y a eu le démarrage de plusieurs projets de recherche : le premier sur les biocarburants avec Chevron et la U.S. Air Force, le second en recherches génétiques. Ce dernier est d'envergure et il est sous la responsabilité du « NREL Laboratory Directed Research and Development Program » (NREL, 2008).

Le programme RITE « Research for Innovative Technology of the Earth program » du Japon débuté en 1990 était planifié sur une période de 10 ans pour effectuer des activités de R-D en captation de CO₂ et en production d'énergie algale. Ce programme était doté d'un budget se situant aux environs des 180 millions de dollars afin de financer la participation de près de 24 compagnies privées, des institutions de recherche et des universités. Ce programme aurait été, à ce jour, le plus coûteux dans le domaine. De plus, son budget atteindrait un total de 250 millions de dollars en y incluant les investissements dans des recherches connexes effectuées par les compagnies d'électricité. Ce programme incluait tout particulièrement la coproduction de produits plus rentables comme certains antibiotiques, des produits chimiques spécialisés et de la nourriture pour animaux afin d'augmenter la rentabilité de leurs concepts (NREL, 1998).

Le Japon est limité par le manque de grands espaces plats et abordables. Ainsi, les japonais ont mis l'accent sur le développement de bioréacteurs, en incluant aussi, quelques essais en étangs extérieurs. L'essentiel des travaux de recherches furent conduits sur la concentration de l'énergie solaire avec des systèmes fermés de photobioréacteurs potentiellement plus performants par unité de surface. Ces réacteurs permettaient un meilleur contrôle des conditions (lumière, nutriments, CO₂, température, pH, O₂...) en y incluant, notamment, des systèmes d'illumination par fibres optiques afin d'optimiser l'éclairage au sein du volume de culture. Mais les infrastructures de captation de la lumière solaire se sont révélées trop dispendieuses et encombrantes. De plus, les systèmes de distribution de la lumière par fibres optiques étaient trop complexes et les gains de performances obtenus étaient insuffisants pour assurer une production économique d'énergie algale (Benemann and al., 2002).

Les points majeurs issus des recherches du programme RITE furent le perfectionnement et la détermination des limitations du concept de produire des biocarburants économiques en bioréacteurs, le développement de coproduits d'intérêt (antibiotiques, protéines, additifs pour le béton, papier), le développement de la génétique des microalgues et la confirmation de l'essentiel des résultats d'autres travaux de recherches menés dans le monde. Les essais effectués en étangs extérieurs par Mitsubishi et les principaux producteurs d'électricité nippons ont fait ressortir l'important potentiel que peuvent représenter les souches locales de diatomées et d'algues vertes : la supériorité de leur adaptation et de leur résistance aux conditions locales pourrait compenser leur faible productivité (NREL, 1998).

3.2.2 Principales technologies en développement

De nombreuses initiatives technologiques sont en cours à travers le monde pour produire des biocarburants à partir des microalgues. Une sélection parmi les plus représentatives et les plus prometteuses permet de cerner l'essentiel des divers modes d'application du concept. En 2008, aux États-Unis seulement, les investissements dans le développement de ce concept ont atteint un record annuel historique de 84 millions de dollars, dont 50 millions en début d'année uniquement pour la compagnie Sapphire Energy (Fehrenbacher, 2008).

Cette section présente les technologies généralement applicables en zones tempérées chaudes ou tropicales plus propices à l'atteinte de la rentabilité financière. Toutefois, les entreprises se situent à différentes étapes de développement et aucune d'entre-elles ne produit encore de biocarburants à l'échelle industrielle.

Le tableau 3.1 résume l'essentiel des initiatives les plus significatives qui sont subséquemment présentées et étudiées.

Tableau 3.1 Synthèse des initiatives significatives sélectionnées

Projets (année de fondation, origine)	Technologies	Particularités
Sapphire Energy (2008) États-Unis (Huang, 2008).	Bassins extérieurs	<ul style="list-style-type: none"> • La mieux financée dans le monde • Utilisation d'OGM
Petro Sun (2001) États-Unis	Bassins extérieurs	<ul style="list-style-type: none"> • Plus vastes projets du type bassins en construction • Compagnie pétrolière en conversion • Projet en Chine
Carbon Trust (2001) Angleterre	Bassins extérieurs	<ul style="list-style-type: none"> • La plus grande initiative publique (Jha, 2008).
Green Fuel (2001) États-Unis et Espagne	Photobioréacteurs	<ul style="list-style-type: none"> • Plus soutenue et sérieuse initiative avec photobioréacteurs (Riesing, 2007).
Solix (2006) États-Unis	Photobioréacteurs	<ul style="list-style-type: none"> • Photobioréacteurs fermés horizontaux (Solix, 2007 ; Willson, 2008). • OGM (?)
Cellana (2008) Internationale	Hybride (PBR + bassins)	<ul style="list-style-type: none"> • Plus sérieux projet hybride, (Huntley et Redalje, 2006) • Mode séquentiel (HR Biopetroleum, 2008).
Solazyme (2003) États-Unis	Bioréacteurs et microalgues hétérotrophes	<ul style="list-style-type: none"> • OGM (Solazyme, 2008) • Serait première pour un diesel 100% à base de microalgues ASTM (Chambers, 2008b) et la plus avancée pour produire des biocarburants d'avions à grande échelle. (Schwartz, 2008).
Amyris (2003) États-Unis / Crystalsev Brésil (1999), entente (2008)	Bioréacteurs et levures ou microalgues hétérotrophes	<ul style="list-style-type: none"> • Première initiative pour produire du biodiesel à base de canne à sucre (Amyris, 2008 ; Davis, 2008) • OGM

- Sapphire Energy (culture en bassins)

La compagnie Sapphire Energy de San Diego en Californie fut fondée en 2007. Malgré son jeune âge, elle est devenue la bioentreprise privée du secteur la mieux financée au monde. Elle compte parmi ses investisseurs Bill Gates (Cascade Fund), Arch Venture Partners et des organismes internationaux dont le Wellcome Trust du Royaume-Unis qui a de plus offert un financement ferme basé sur les résultats et sans limite. En début d'année 2009, elle pouvait compter sur un financement de plus de 100 millions de dollars. Sapphire base sa technique sur l'optimisation de la productivité par le biais de modifications génétiques des microalgues et d'autres techniques gardées secrètes. Cette technologie a été développée en coopération avec le Scripps Research Institute, l'Université de la Californie à San Diego, l'Université de Tulsa et le « Energy Department's Joint Genome Project » (JGP) des États-Unis. La culture s'effectuerait dans un réseau d'étangs géants ou « fermes », s'étendant à travers les terres arides du Sud-Ouest des États-Unis avec des algues capables de s'accommoder d'eaux usées et saumâtres, récupérées de municipalités et de grandes exploitations agricoles. Le procédé d'extraction des biocarburants serait différent des technologies concurrentes du secteur, car l'on ne fait pas mention de biodiesel ou d'éthanol. La biomasse obtenue serait simplement concentrée et traitée pour obtenir une mixture dite de « pétrole synthétique vert » qui serait compatible avec les raffineries actuelles. Ce pétrole vert pourrait alors être transformé en divers carburants et d'autres sous-produits « pétroliers ».

Autre point potentiellement distinctif, il semblerait que ces cultures ne soient pas toutes, systématiquement du moins, enrichies de CO₂ issu de sources extérieures. Mais les réactions positives de la compagnie face au plan de séquestration du CO₂ annoncé récemment par la nouvelle administration des États-Unis (Sapphire Energy, 2009) soulèvent un doute. Elle affirme l'avoir testé avec succès. Toutefois, la compagnie reste très discrète sur son procédé de synthèse. Le pétrole vert obtenu aurait été raffiné en carburants (essence, diesel et « fuel » d'avion) qui auraient tous bien passés la certification de l'ASTM (American Society for Testing and Materials) (Huang, 2008).

Sapphire opère encore en mode expérimental mais elle prévoit inaugurer ses premières installations industrielles dans trois ou quatre ans. La prochaine étape serait une usine pilote pouvant générer assez de biomasse pour produire 100 barils de pétrole vert par jour.

Cette initiative est probablement la plus ambitieuse du secteur et son succès va beaucoup dépendre, d'un prix du pétrole brut élevé, de la qualité de sa gestion, du succès rapide de chacune des étapes de développement et d'un financement constant. Des doutes émergent, car certains observateurs notent que depuis septembre dernier la compagnie restait vague sur sa technologie et sur son financement (Morrison, 2008).

- Petro Sun (bassins)

La compagnie Petro Sun basée à Scottsdale en Arizona fut fondée en 2001 par une famille active dans le domaine pétrolier depuis trois générations. Malgré certaines difficultés dans ses opérations, elle a récemment commencé à explorer cette voie plus durable avec la technique de base, connue et bien documentée, de la culture de microalgues en bassins ouverts. En avril 2008, Petro Sun avait déjà aménagé des installations de production sur 440 hectares à Rio Hondo sur la côte du Texas. Elle vise à y générer 50 000 tonnes de biomasse par année pour la production de biodiesel et d'éthanol.

La proximité de la mer de ces installations est un facteur important pour faciliter la compensation du haut taux d'évaporation à cette latitude. Il existe encore peu de détails disponibles sur les souches utilisées ou sur les méthodes de gestion des problèmes d'extraction et de contamination. On mentionne toutefois l'application d'une approche industrielle pragmatique et technologiquement avancée. Plusieurs autres sites de production sont prévus dans des régions climatiquement favorisées : le bassin du Mississippi, l'Amérique du Sud et possiblement en Australie (Cornell, 2008; Petrosun, 2009).

Dernièrement, les résultats préliminaires étaient encourageants et la compagnie concluait une entente de partenariat avec la « Shanghai Jun Ya YanTechnology Development » de Chine pour y établir un projet de production en bassins de plus de 40 millions de dollars. La biomasse produite serait convertie en biocarburants et en nourriture pour animaux (Chambers, 2008a).

- Carbon Trust (bassins)

En octobre 2001, le gouvernement britannique lançait le projet « Carbon Trust ». Ce programme de plus de 50 millions de dollars est devenu la plus grande initiative publique consacrée au développement de cette voie et qui est présentement en cours dans le monde.

Les propos tenus par les responsables de ce projet indiquent que cette initiative vise clairement la substitution d'une proportion substantielle des carburants utilisés en transports par des biocarburants issus des microalgues, et ce, avec des objectifs fermes de réussite comme la concrétisation d'installations fonctionnelles d'ici 2020 (Carbon Trust, 2008).

L'organisme reconnaît qu'une bonne part de l'optimisation potentielle du concept réside dans le très vaste bassin d'espèces encore inexplorées. Ainsi, on recherche les espèces les plus performantes. Le défi est imposant, mais le Carbon Trust prévoit coordonner et diviser la lourde charge de R-D anticipée à travers un réseau d'entreprises et d'institutions. Une approche similaire est prévue pour le développement de technologies de production. Au départ, il est prévu que les premières installations de R-D comprendront des étangs (*race ponds*) ouverts aménagés en zones plus chaudes afin d'optimiser leur productivité et d'accélérer les résultats. À ce jour, on ne confirme pas que les cultures seront indépendantes du CO₂ issu de sources auxiliaires (Jha, 2008).

- Green Fuel Technologies (photobioréacteurs)
Fondée en 2001, la compagnie « Green Fuel Technologies Corporation » de Cambridge, au Massachusetts représente la plus grande initiative au monde basée sur des systèmes de photobioréacteurs (PBR) fermés. Les technologies développées permettent de réduire les émissions de NOx et de CO₂ tout en produisant de la biomasse algale. Les premières versions de leurs bioréacteurs furent du genre « *air-lift* ». Ce type de PBR utilise la force ascendante des gaz de combustion injectés aux niveaux inférieurs pour faire circuler l'eau. Cette méthode permettrait une meilleure absorption des GES par les microalgues qui sont ainsi entraînées dans les canalisations en un cycle fermé optimisé. Cette technologie est singulière : les unités de 100 mètres carrés sont constituées de tubes formant des triangles parallèles dont l'hypoténuse est exposée au soleil. Les GES sont injectés dans le circuit à partir des coins inférieurs. Les microalgues ainsi alimentées sont alors exposées alternativement au flux lumineux solaire pour être soumises à ce qui est décrit comme une « photomodulation » optimale.

Depuis juillet 2004, Green Fuel opère un projet de démonstration et de R-D sur le site de la centrale de cogénération de 20 MW du MIT alimentée au charbon (Riesing, 2007).

En 2004, l'organisme de certification CK Environnement aurait mesuré pendant une semaine les performances du système selon les standards de l'EPA. Les jours ensoleillés, des réductions de plus de 80 % du CO₂ et des NO_x, auraient été observées. Mais, pour le CO₂ la performance aurait baissé à 50 % en conditions de faible ensoleillement (Daniélo, 2005). Selon Green Fuel, la technologie tubulaire (figure 3.2) peut être utilisée sous des latitudes nordiques au prix de baisses sensible des performances. Ce concept expérimental, composé de structures tubulaires triangulaires extérieures, a évolué vers une technologie plus raffinée « à matrice 3 D » ou *3D Matrix System* opérée sous serres. On est resté très discret sur elle.



Figure 3.2 Première technologie de Green Fuel. (Les tubes font trois mètres de hauteur) (Cnet, 2009).

En 2007, une unité de test a été construite et opérée à la centrale Redhawk de cogénération au gaz naturel du « Arizona Public Service ». Les tests menés durant plusieurs mois auraient démontré des performances de productivité moyennes de 98 g de biomasse sèche par m² par jour, soit des niveaux près de 10 fois supérieurs aux taux de productivité des bassins extérieurs. Mais des difficultés majeures auraient été rencontrées au niveau de la récolte et de l'alimentation en CO₂. L'estimation des coûts a démontré que les frais encourus pour l'extraction de la biomasse à partir de cette approche dépassaient les seuils estimés maximums pour espérer atteindre la rentabilité (Pulz, 2007; Kho, 2008). Plusieurs restructurations ont eu lieu dans la compagnie à la suite des problèmes issus des tests menés aux États-Unis. Depuis environ un an, la compagnie Green Fuel s'est tournée vers une nouvelle localisation pour établir son tout dernier type de photobioréacteur qui est configuré à partir d'éléments empruntés aux techniques précédentes déjà testées.

Par conséquent, à la fin de 2008, Green Fuel annonçait un partenariat avec Aurantia SA pour établir, à Holcim en Espagne, un projet de 92 millions de dollars qui devrait être achevé d'ici 2011. Cette fois, Green Fuel mise sur une nouvelle génération de PBR comprenant des « photobioréacteurs verticaux à films minces couverts » protégés sous des serres. Un projet pilote de 100 mètres carrés est déjà en opération sur le site (Green Fuel, 2008).

Éventuellement, les 50 000 tonnes de CO₂, produites annuellement par l'usine voisine de ciment, seront progressivement injectées dans ces nouvelles installations qui devraient couvrir 100 hectares. Green Fuel estime pouvoir atteindre une production annuelle de 25 000 tonnes de biomasse pouvant fournir 350 000 litres de lipides. Ceci représente un rendement en biomasse se situant aux environs de 25 kg par m² par année (Kho, 2008). Les marges plus élevées obtenables avec les produits nutraceutiques ont dernièrement mené la nouvelle direction de la compagnie à confirmer que le biodiesel ne serait plus la seule production visée par Green Fuel (La Monica, 2008).

- Solix (photobioréacteurs)

Solix fut fondée en 2006 par l'Université du Colorado afin de continuer ses recherches déjà entreprises sur les biocarburants avec la coopération et le financement de Valero Energy, le plus gros raffineur de pétrole des États-Unis et la « Southern Ute Alternative Energy ». En 2008, d'autres investisseurs ont financé la compagnie pour plus de 15 millions de dollars. Cette année, Solix Biofuels et Southern Ute Alternative Energy vont construire au Colorado une usine pilote de quatre hectares destinée à produire de la nourriture pour animaux et du biodiesel (Fehrenbacher, 2008).

Solix se prépare pour la production industrielle en perfectionnant une technologie de photobioréacteurs optimisés. Les photobioréacteurs fermés en question ont la particularité d'être orientés horizontalement et d'être composés de panneaux translucides couvrant de grandes surfaces afin de maximiser l'absorption de la lumière par les microalgues.

De plus, l'entreprise mentionne aussi qu'elle travaille à améliorer des souches de microalgues mais elle ne désire pas encore entrer dans les détails de son approche. Solix affirme que la technologie qu'elle a développée au cours des dernières années permet d'ajuster automatiquement le procédé aux variations de luminosité et de température.

La compagnie mentionne aussi qu'elle a développé une méthode optimisant le mélange du CO₂ avec l'eau. Le CO₂ injecté dans le procédé serait capté et acheminé par pipeline à partir d'industries voisines.

Forte d'une équipe de scientifiques et de gestionnaires d'expérience, Solix semble très optimiste car elle prévoit pouvoir atteindre un rendement annuel de près de 60 500 litres de lipides par hectare. Des revenus annuels de plus de 150 millions de dollars sont projetés d'ici 2012 (Solix, 2007; Willson, 2008).

- Cellana (hybride PBR et bassins)

En 2008, la multinationale pétrolière Shell et HR Biopetroleum Inc. de Hawaii, développeur d'une technique de production axénique de masse (ou stricte monoculture), ont formé la compagnie Cellana. Ils visent établir un projet de production de biocarburants à partir d'une espèce sélectionnée microalgues sur la plus grande île de l'archipel (Schallenberg, 2008).

Ainsi, HR Biopetroleum, fondée en 2004, développe avec Shell un concept hybride original intégrant une phase initiale opérée en PBR avec une seconde phase opérée en étangs ouverts relativement peu coûteux. Ce concept hybride vise à combiner les points forts de la culture en bassins ouverts et ceux de la culture en photobioréacteurs (Huntley et Redalje, 2006). Ce procédé est encore en phase expérimentale mais Cellana prévoit aboutir à des rendements annuels de l'ordre de 56 000 litres de lipides par hectare. Les revenus éventuels pourraient aussi être enrichis par la génération d'autres sous-produits rentables.

Le facteur clé de cette approche est de limiter la durée d'exposition des cultures de la souche sélectionnée aux contaminants biologiques extérieurs. Ces derniers font rapidement tomber la productivité. La compagnie développe son procédé « Alduo » (figure 3.3) dans une usine pilote renfermant 600 000 litres en capacité de culture.

Le procédé est organisé pour fonctionner en mode semi-continu. Cette approche permet d'utiliser séquentiellement une série de bassins de croissance sur des cycles s'étalant de deux à trois jours. Des soins méticuleux doivent être apportés au nettoyage des surfaces en contact avec les milieux de culture. Ces derniers peuvent ainsi être appliqués entre les cycles de production sans devoir interrompre le procédé dans son ensemble.

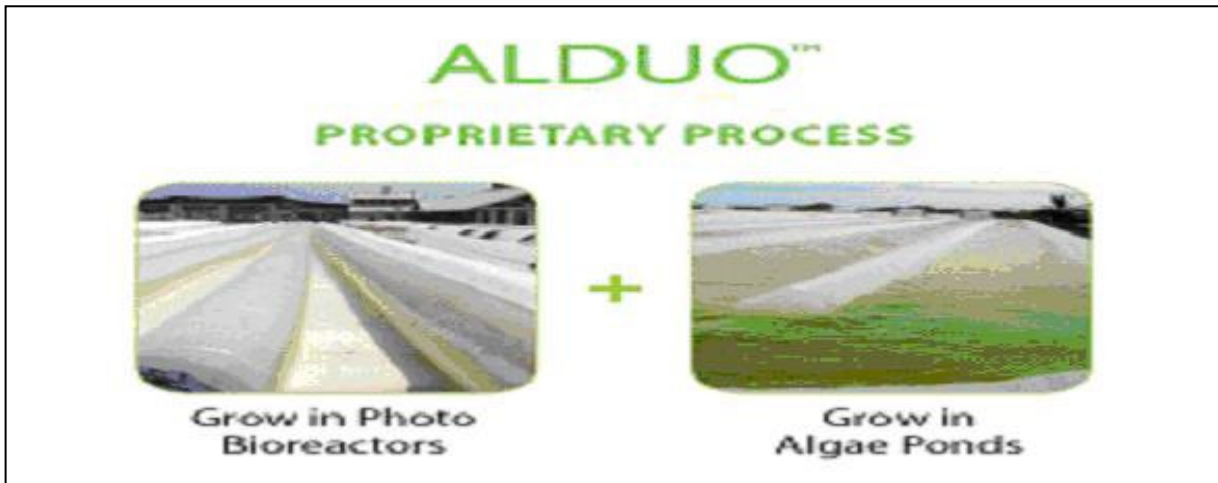


Figure 3.3 Procédé Alduo de Cellana (HR Biopetroleum, 2008).

La première étape est effectuée avec des photobioréacteurs composés de tubes translucides connectés en série où le pH, la température, le CO₂ et les autres nutriments sont ajustés automatiquement. Quand la densité de microalgues en photobioréacteurs devient optimale, ils sont vidés dans des étangs extérieurs préalablement nettoyés et partiellement remplis d'eau pauvre en nutriments. Sous l'effet de l'ensoleillement direct, les organismes s'y multiplient rapidement. Ils terminent cette phase de croissance rapide en épuisant rapidement la charge résiduelle de nutriments. Le stress induit par ces nouvelles conditions stimule la production des lipides. Cette méthode permet de protéger la monoculture optimale composée de microalgues efficaces et en santé. Ces dernières sont capables de coloniser massivement les bassins extérieurs en diminuant les risques de contaminations invasives. Après environ 24 heures, les bassins sont vidés et nettoyés. La biomasse est alors concentrée par gravité puis « égouttée ». Elle est ensuite asséchée par centrifugation puis déshydratée avant l'application d'une méthode brevetée de récupération des lipides (HR Biopetroleum, 2008).

On utilise des algues locales marines non modifiées sanctionnées par les autorités locales concernées (Department of Agriculture). Une nouvelle usine pilote sera construite sur la côte de Kona de la grande île d'Hawaï. C'est une région où d'autres entreprises cultivent déjà des microalgues pour fabriquer des produits pharmaceutiques et de nutrition. Des recherches sont effectuées en coopération avec les universités Hawaï, Southern Mississippi et Dalhousie de Nouvelle-Écosse afin de trouver des espèces locales qui pourraient produire le plus de lipides (Ebert, 2008).

- Solazyme (bioréacteurs hétérotrophes)

Ce nom est trompeur, car Solazyme serait la première entreprise du secteur à exploiter un procédé hétérotrophe indépendant du soleil particulièrement efficace. Ce procédé adaptable à toutes les zones climatiques peut produire des biocarburants à une échelle industrielle à partir de matières riches en hydrates de carbone. La compagnie fondée en 2003 est basée en Californie. Elle serait la première entreprise à avoir produit un diesel composé à 100 % de substances issues de microalgues et qui respecte les strictes normes de l'ASTM (American Society for Testing and Materials) (Chambers, 2008b). La compagnie serait aussi la plus avancée pour produire des biocarburants d'aviation à grande échelle (Schwartz, 2008). Une sérieuse compétition émerge pour le secteur aérien parce qu'il n'existe pas encore d'alternatives au pétrole pour la propulsion d'aéronefs.

Chevron, le deuxième producteur de pétrole des États-Unis, participe au développement de Solazyme. En 2008, elles ont conclu une entente pour développer et tester un procédé industriel optimisé propre à convertir la biomasse algale en biodiesel. Solazyme exploite à fond des méthodes avancées de sélection et de manipulations génétiques afin d'optimiser la productivité de son procédé (Solazyme, 2008). Ce procédé hétérotrophe ne nécessite pas de lumière et s'opère même à l'obscurité dans des cuves automatisées. On utilise des souches de microalgues particulièrement aptes à convertir les sucres en précieuse biomasse.

Aussi, Solazyme affirme pouvoir éventuellement convertir des hydrates de carbone impropres à la consommation humaine avec un procédé de conversion des matières cellulosiques permettant d'élargir ses sources d'approvisionnement. Ce procédé permettrait une productivité très supérieure à celles des systèmes autotrophes dépendants du soleil. Elle pourrait concurrencer avantageusement la filière éthylique traditionnelle qui utilise des grains et qui comporte une étape particulièrement énergétivore de distillation. Ce procédé ne capture pas de CO₂ atmosphérique, car il dépend de sources végétales de carbone. Solazyme utilise présentement de la canne à sucre dans ses installations (Lepisto, 2008). Cette approche est dépendante des fluctuations des prix des nutriments et non pas de l'énergie solaire gratuite mais coûteuse à capter. On cherche à abaisser les coûts de production pour être compétitif avec le pétrole. Dernièrement Solazyme réussissait à récolter 45 millions de dollars à partir de fonds privés d'investissement et elle s'orientait toujours vers le marché des carburants pour l'aviation (Wang, 2009).

- Amyris / Crystalsev (bioréacteurs hétérotrophes)

Les compagnies Amyris Biotechnologies des États-Unis et Crystalsev du Brésil se sont jointes pour développer, à Campinas au Brésil, la première initiative mondiale de production industrielle de biodiesel à base de canne à sucre. La commercialisation est prévue pour 2010 (Davis, 2008).

Ce procédé breveté ressemble à celui de Solazyme en ce qu'il mise beaucoup sur les techniques avancées de manipulations génétiques de micro-organismes (OGM). On parle même d'une nouvelle biologie synthétique qui permettrait de modifier en quelques jours et sur mesure le code génétique de levures par exemple pour en transformer le métabolisme de base. Les micro-organismes produisent alors des composés isoprénoides polyvalents pouvant servir de base pour la synthèse de médicaments spécifique comme l'artémisinine (antimalaria) ou de biocarburants sur mesure (Amyris, 2008).

- Université Tsukuba au Japon (souches prometteuses)

Actuellement des recherches importantes ont cours à l'Université Tsukuba au Japon. On cherche principalement à mettre au point la culture d'une souche intéressante de *Botryococcus*, une algue verte qui prolifère naturellement dans les marécages et les lacs du pays. Ces travaux ne comportent pas de manipulations génétiques. Le grand potentiel de cette espèce dépendrait de trois qualités notoires particulières :

- Les molécules de l'huile générée comportent de 23 à 40 atomes de carbone sont similaires à celles des huiles lourdes fossiles conventionnelles (les procédés actuels de transformations seraient donc compatibles);
- L'huile produite est rejetée à l'extérieur des cellules, ce qui en facilite beaucoup l'extraction;
- Ces microalgues résistent bien à la technique d'extraction d'huile développée par l'équipe de Tsukuba.

Cette technique a été développée pour préserver les organismes. Elle utilise un solvant adapté formulé à base d'isopentane et recyclable dans un cycle fermé. Le taux de récupération des lipides atteint 60 % et il peut être encore amélioré. La conjugaison des caractéristiques particulières de cette espèce avec cette technologie est prometteuse.

Elle permet de contourner le fait que les souches les plus productives en lipides se reproduisent proportionnellement moins rapidement. De plus, cette approche « non-destructrice » permettrait de réduire les coûts de reconstitution de densités exploitables ou de démarrage de nouvelles colonies.

Un bon équilibre entre le taux de productivité en lipides et le taux de reproduction semble avoir été atteint aux environs d'une proportion de 45 % en huiles par gramme de biomasse séchée. La production rentable de carburant serait probablement atteinte en utilisant des nutriments bon marché comme certains rejets industriels riches en glucose et en matières organiques. Ceci inclurait aussi des partenariats avec des pays plus chauds de la région où on peut trouver une main d'œuvre moins coûteuse et abondante comme en Thaïlande ou en Indonésie (Kodama, 2008).

D'autres chercheurs sont aussi intéressés par cette microalgue. En Australie par exemple, on étudie ses performances de croissance et de teneur en lipides sous différentes combinaisons de salinité, de température et d'illumination (Qin, 2005).

3.3 Contextes nordiques

La température moyenne du site d'exploitation peut grandement influencer le rendement et l'applicabilité même d'un projet de culture (Van Harmelen and al., 2006).

Il apparaît intéressant d'étudier séparément les approches de production limitées aux zones idéales relativement chaudes et les méthodes de production qui sont ou seraient praticables en toutes conditions incluant celles rencontrées dans les régions septentrionales.

Cette section présente les initiatives parmi les plus notables qui sont adaptées ou qui seraient applicables et éventuellement rentables dans les zones nordiques et elle traite aussi des principaux efforts de recherche s'y rapportant.

3.3.1 Projets compatibles aux zones froides

Une part importante de l'économie mondiale se situe en zones nordiques ou tempérées et leurs constituants sont les plus grands consommateurs d'énergie. Le développement de nouveaux concepts de production d'énergie gagne en importance.

Les zones nordiques présentent toutefois des défis importants pour l'application de concepts énergétiques basés sur la production de biomasse algale. Les initiatives les plus pertinentes sont présentées et étudiées.

- Le programme SRCA du Canada (hybride bassins et serres)

Au Canada, la principale initiative de recherches et développement impliquant les microalgues et le domaine de l'énergie est le programme SRCA (Système de recyclage du carbone par les algues) ou en anglais CARS pour « Carbon Algae Recycling System ».

Ce projet de 20 millions de dollars lancé en 2007 est parrainé par « Innoventures Canada » (I-CAN). Cet organisme fédéral parapluie vise à optimiser la R-D au pays en favorisant et en coordonnant les liens entre divers organismes de recherche et d'autres partenaires de financement, de secteurs industriels et spécialisés. Ces partenaires incluent : le gouvernement fédéral, NRCan-RNCanada, TEAM, les gouvernements provinciaux de l'Alberta, du Québec, du Manitoba et de la Saskatchewan, plusieurs organismes de recherche comme le ARC, le CRIQ, l'ITC et le SRC et plusieurs entreprises dont EnCana, EPCOR, Graymont Mining, Imperial, Mosaic Potash, New Brunswick Power, Nexen, Petro Canada, Shell Canada, Suncor et Syncrude ainsi que d'autres organismes et compagnies étrangères : U.S. DOE, IEA, Energy INet, GE-Ecomagination, CO₂ Solutions, 3M, Air Products (Edwards, 2008).

Il faut noter ici que le projet SRCA canadien poursuit principalement le but de faire diminuer les émissions de divers procédés industriels (CO₂ et NO_x en particulier) en les faisant absorber par des cultures de microalgues. L'objectif fondamental du SRCA est de procurer aux industries polluantes du pays un moyen de gestion durable pour traiter et diminuer l'impact de leurs émissions de GES. La biomasse ainsi obtenue serait alors utilisée, entre autres débouchés, pour produire des biocarburants et d'autres composés (I-Can, 2008).

Ce programme développe une approche adaptée au climat canadien qui inclut l'analyse de concepts réalisables et rentables qui ont mené notamment à la conception d'un système hybride de bassins ouverts et de serres. Les travaux de recherche ont débuté selon des paramètres basés sur l'hypothèse de travail d'une usine de charbon typique de 300 MW pour laquelle on vise préliminairement une absorption de 30 % de ses émissions de GES. On cherche à concevoir le système pour qu'il puisse s'intégrer facilement dans tout complexe industriel du pays, fonctionner à l'année et générer des revenus pour les industries participantes.

Comme le démontre la figure 3.4, le cœur du concept est composé d'un système de bassins de culture optimisés. Ces bassins sont conçus pour favoriser une exposition optimale des microalgues au soleil et au CO₂ et ils seraient équipés d'un système de protection constitué de serres alimentées par des capteurs photovoltaïques afin de maintenir un environnement idéal de culture pour les souches sélectionnées de microalgues.

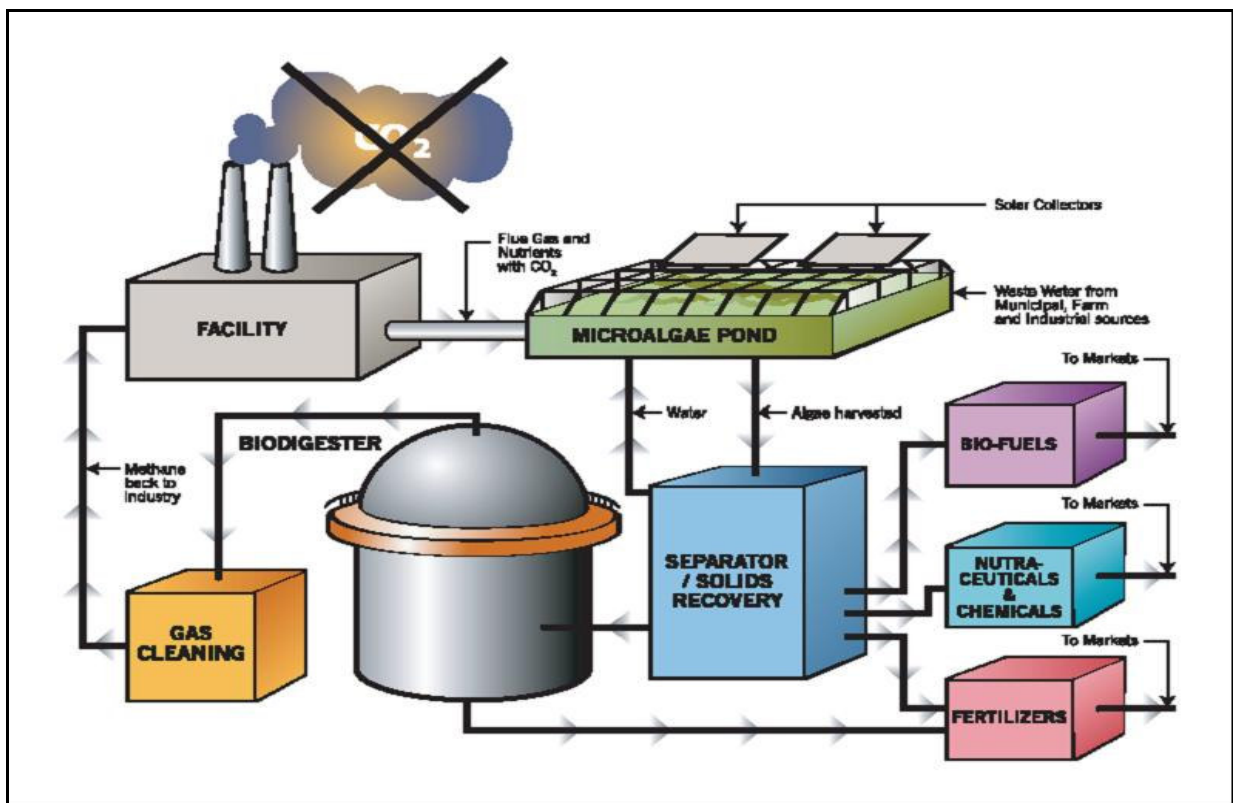


Figure 3.4 Diagramme du dispositif de production et du cycle du concept SRCA (Daigle, 2008).

Une bonne part des nutriments utilisés proviendrait des eaux usées d'industries, de municipalités ou des fermes environnantes.

Les produits issus de la biomasse algale doivent pouvoir compléter la rentabilisation du concept. On compte pouvoir produire des biocarburants (éthanol et biodiesel) et aussi possiblement d'autres substances à valeur ajoutée comme des fertilisants et d'autres sous-produits (I-Can, 2008).

À l'instar d'autres initiatives de ce domaine, le SRCA comporte deux volets : le volet biologique et le volet technique. Le volet biologique se concentre sur la sélection de souches adaptées aux gaz à traiter, à la luminosité et aux températures prévues. Le volet technique travaille au développement du système de production hybride composé d'étangs couverts et de serres. Ce dernier est particulièrement pris en charge par le Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) qui se spécialise dans le développement et l'évaluation de la culture d'espèces d'algues dans diverses conditions ainsi que sur les sous-produits (additifs, pharmaceutiques) que pourraient produire certaines de ces espèces d'algues.

On évalue que ces produits dérivés à haute valeur ajoutée pourraient contribuer à financer une portion considérable des coûts d'exploitation du système. Cet élément est important pour assurer l'équilibre et la pérennité financière de ce type d'entreprise, car les coûts actuels de production sont élevés.

De plus, le CRIQ développe des technologies d'extraction pour récupérer les substances recherchées de la biomasse algale. On travaille en particulier sur l'extraction des huiles par ultrasons, avec des solvants ou des traitements thermiques (Song, 2008).

Le programme se divise en trois étapes qui devraient aboutir en 2012 avec la construction d'une usine pilote de démonstration d'envergure. Le tableau 3.2 qui suit, décrit plus en détails les trois principales étapes du programme.

Tableau 3.2 Étapes du programme SRCA (Daigle, 2008).

Étape I (2007 - 2008)	Étape II (2008 - 2010)	Étape III (2010 - 2012)
Vérifier le concept pour les paramètres du Canada	Construction en laboratoire d'une unité de démonstration fonctionnelle.	R-D effectuée à l'usine pilote.
Choix préliminaire d'une espèce d'algue.	Recherches d'optimisation de production.	Élaborer les paramètres pour agrandir l'usine pilote vers une unité de démonstration d'envergure.
Évaluation économique	Conception d'un projet pilote	
Planification complète de l'étape II	Construction et opération d'une usine pilote de démonstration	Recherche de partenaires et de sources de financement

L'étape I du projet SRCA s'est terminée en 2008 et les résultats semblent prometteurs. Douze souches de microalgues indigènes furent sélectionnées, cultivées et analysées de façon préliminaire pour des températures près de 15° C. Les résultats préliminaires ont fait ressortir ou ont confirmé les faits suivants :

- Les systèmes connus actuels utilisant uniquement des photobioréacteurs ou des étangs ouverts ne peuvent permettre de traiter des volumes assez élevés de CO₂ pour pouvoir atteindre les objectifs de départ du projet;
- Le rendement est très variable selon les conditions de culture;
- L'angle d'incidence moyen de la lumière du soleil au Canada est plutôt bénéfique pour la croissance des microalgues en limitant la photoinhibition et la photosaturation;
- Facteurs chimiques : les NO_x n'affectent pas la croissance, les SO_x modifient le pH de l'eau et les ions métalliques peuvent diminuer la productivité.

De plus, la température moyenne de l'eau et la profondeur des étangs, représenteraient les paramètres physiques parmi les plus importants à contrôler dans les installations (Daigle, 2008). La lumière pénètre typiquement à 10 ou 20 cm et les bassins ont 30 cm de profondeur. Les chercheurs essaient de tripler la profondeur efficace des bassins afin de favoriser l'absorption du CO₂ et la productivité. On évalue aussi l'emploi de systèmes de réflecteurs afin d'optimiser la captation du rayonnement solaire (I-Can, 2008).

- Photobioréacteurs en zones nordiques

Plusieurs initiatives basées sur la technologie des PBR comme celles de Green Fuel ou de Solix, peuvent en principe, plus facilement s'appliquer aux zones nordiques. Toutefois, leur rentabilité serait plus facile à réaliser en zones chaudes parce que la période de démarrage est critique. Par exemple, il y a quelques mois, Green Fuel, basée près de Boston, annonçait la construction en Espagne d'un projet de 92 millions de dollars, car les contraintes d'ensoleillement et de basses températures moyennes de l'eau rencontrées aux États-Unis avaient rendu les procédés autotrophes solaires difficiles à rentabiliser.

Les installations configurées en mode fermé peuvent permettre de conserver des conditions optimales de culture et de mieux protéger les organismes des contaminants et des fluctuations climatiques (CRBM, 2006).

- Bioréacteurs de type fermenteurs

Le procédé employé par Amyris et Crystalsev, représente un exemple éloquent d'une biotechnologie hétérotrophe applicable aux zones froides permettant de transformer des intrants d'hydrates de carbone en carburants. En zones tropicales, les rendements obtenus avec la canne à sucre occultent les avantages de la culture algale. Ces chaudes latitudes sont aussi idéales pour la culture de microalgues et cette technologie aiderait à réduire les pressions grandissantes sur les forêts tropicales.

3.3.2 Initiatives de R-D

- Le CRBM et la SODIM

En 2006, le Centre de recherche sur les biotechnologies marines (CRBM) de Rimouski a effectué pour le compte de la SODIM (Société de développement de l'industrie maricole) une recherche exhaustive intitulée « *Étude d'opportunité des biotechnologies marines sur la production et l'utilisation des microalgues* ». Elle comprenait aussi un volet étoffé sur les nutraceutiques produit par l'Université du Québec à Rimouski (CRBM, 2006). Cet ouvrage du CRBM traite des technologies de pointe pour produire des microalgues en photobioréacteurs, des divers marchés actuels et potentiels pour les microalgues ainsi que des voies d'exploitation de la biomasse algale à privilégier en regard de l'évolution des marchés. On y mentionne aussi que la production de biocarburants est envisageable.

Au niveau des perspectives et des pistes de recherche, les spécialistes mentionnent qu'aux latitudes nordiques du Québec maritime, la production de microalgues en bioréacteurs (modes autotrophe ou hétérotrophe) serait plus rentable qu'en bassins, même couverts. Il en ressort que les technologies disponibles dédiées à la production de biocarburants ou à la réduction des GES pourraient bénéficier des revenus issus de la production de coproduits à haute valeur ajoutée. Toutefois, les recherches semblent indiquer que les productions qui apparaissent les plus pratiques pour les conditions nordiques seraient les cosmétiques et les réactifs biologiques.

- Le « Nordic Energy Research Program »

Ce programme de recherche nordique sur l'énergie est basé en Suède. Il est un projet de coopération de plusieurs pays du nord de l'Europe : Islande, Norvège, Finlande, Danemark, Estonie et Lettonie. Le principal objectif de ce programme est orienté vers l'établissement d'un réseau nordique de recherche et de coopération sur les énergies renouvelables, l'analyse et le développement de technologies applicables au Nord.

Le programme a débuté des travaux d'analyse et de recherche sur le potentiel de la production d'hydrogène avec des souches de l'algue verte *Chlamydomonas* ou de cyanobactéries génétiquement modifiées. Les approches autotrophes et hétérotrophes sont évaluées pour produire et alimenter les microorganismes en énergie (Lindblad, 2006). Les recherches du programme continuent et on prévoit les échelonner jusqu'en 2011 (Norden, 2009).

Des développements intéressants ont eu lieu en 2006 aux Universités de Bielefeld et du Queensland en Australie. Des manipulations génétiques ont permis de multiplier par cinq la production en hydrogène de *Chlamydomonas reinhardtii* avec une efficacité de conversion lumineuse de près de 2 %.

L'évolution rapide de cette voie s'est poursuivie et en 2008 le docteur Anastasios Melis, de l'Université de la Californie à Berkeley, a réussi à modifier une souche de *Chlamydomonas reinhardtii* pour lui faire atteindre une efficacité de conversion lumineuse de 25 % soit très près du maximum théorique qui se situe aux environs de 30 %. De plus, cette souche semble pouvoir aussi produire bien d'autres types de biocarburants (Wikipedia, 2009b).

Des travaux ont aussi été menés pour déterminer les meilleures méthodes de productions applicables en zones nordiques ainsi que les meilleurs coproduits potentiels à favoriser. Ainsi, toutes les variantes du concept algal sont considérées applicables mais seulement sous serres. La production de nutraceutiques connus serait à favoriser avant celle de biocarburants et l'on souligne les besoins de financements supplémentaires pour la recherche dans ce domaine (Berg-Nilsen, 2006 ; CRBM, 2006).

Dans les pays du nord de l'Europe, la production de biocarburants est pratiquement toujours associée à l'hydrogène (Berg-Nilsen, 2006 ; Lindblad, 2006; Norden, 2009). En zones nordiques, la filière du biohydrogène algal comporte des avantages, car plusieurs variantes technologiques peuvent être appliquées sous serres ou reposer sur le mode hétérotrophe qui est indépendant des conditions climatiques. De plus, les dernières percées génétiques capables de décupler la productivité de *Chlamydomonas reinhardtii* permettraient de compenser, en partie, les coûts élevés des installations nordiques.

En conclusion, l'étude des projets de production de biomasse algale pour biocarburants permet de distinguer quatre grandes familles de procédés typiques : bassins (organismes autotrophes), photobioréacteurs (PBR) (organismes autotrophes), bioréacteurs (organismes hétérotrophes) et l'ensemble des systèmes hybrides. Il faut aussi mentionner que les procédés en bassins comptent actuellement pour plus de 98 % de la production industrielle de microalgues qui est principalement destinée au domaine alimentaire (Benemann, 2008). On constate aussi que plusieurs initiatives dépendront de l'exploitation d'OGM pour atteindre la rentabilité, et que, pratiquement tous les projets dépendent de sources externes de CO₂ pour stimuler la croissance des cultures à des niveaux suffisants.

Par ailleurs, l'application du concept en zones froides se révèle être problématique. Divers concepts de systèmes couverts sont étudiés pour compenser les effets climatiques et ils semblent représenter les meilleures options disponibles à ce jour. En général, la rentabilisation du concept pourrait être facilitée en ajoutant aux procédés, la purification d'effluents et la génération de coproduits plus rentables que les biocarburants. Tous les projets évoluent à différents stades de développement. Certains sont très avancés mais aucun ne produit encore de biocarburants à une échelle industrielle.

4 ÉVALUATION DU CONCEPT

L'évaluation critique du concept de production de biocarburant à base de microalgues ou algocarburants suit trois grands axes de développement en partant des bases vers certaines spécificités. Dans un premier temps, elle porte sur les aspects fondamentaux liés à l'applicabilité du concept et elle analyse les principaux aspects scientifiques et technologiques. Elle aborde ensuite les dimensions économiques de rentabilité et de compétitivité. L'étude des aspects environnementaux et sociaux complète l'analyse.

4.1 Aspects scientifiques et technologiques

Le concept d'utiliser la culture de masse de microalgues, pour tirer de la biomasse obtenue des biocarburants ou algocarburants, repose sur plusieurs principes fondamentaux de science et de technologie qui traitent de l'énergie, de sa conservation et de sa transformation. L'analyse se concentre surtout sur les technologies basées sur le mode autotrophe (bassins, photobioréacteurs, hybrides) parce qu'elles sont l'objet d'investissements massifs. Ces dernières permettent de produire des algocarburants en captant des GES et l'énergie gratuite du soleil. L'approche hétérotrophe est aussi traitée, car elle est capable de générer des biocarburants à partir d'effluents riches en carbone.

4.1.1 Ressources de base pour la production algale

Une étape majeure consiste à déterminer les éléments fondamentaux affectant la productivité du concept : les microorganismes, la localisation, le climat, les quantités disponibles d'énergie, les taux de conversion en biomasse ainsi que le potentiel général des microalgues. L'énergie solaire est analysée en détail, car le niveau d'applicabilité des plus grands projets en dépend.

Pour le choix des espèces de microalgues « cultivées » en bassins extérieurs conventionnels, les souches locales finissent souvent par fournir de meilleurs rendements que les espèces introduites qui se révèlent être plus sensibles au climat et aux espèces locales contaminantes (NREL, 1998; Huntley and Redalje, 2004; Benemann, 2008).

Aussi, les microalgues sont susceptibles d'être génétiquement modifiées et elles le sont. Pour plusieurs projets, cette approche représente une solution incontournable. L'avenue des OGM est donc exploitée et elle est considérée avantageuse pour certaines entreprises et organismes. Par exemple, Sapphire et Solazyme développent leur concept de production industrielle sur la base de cette approche. De plus, le Joint Genome Institute (JGI) du Department of Energy (DOE) des États-Unis participe aux recherches génétiques en coopération avec d'autres organismes gouvernementaux et privés (JGI, 2009).

Toutefois, un potentiel considérable d'amélioration des performances réside dans les milliers d'espèces des 90 % qui restent encore à découvrir (Sheehan and al., 1998). Déjà, quelques unes des espèce étudiées paraissent très prometteuses (tableau 4.1).

Ces microorganismes sont la base du concept et le besoin de trouver ou de développer des souches de microalgues plus performantes persiste, car la compétition des carburants d'origines fossiles impose des seuils élevés de productivité.

Tableau 4.1 Exemples de rendement de quelques espèces performantes

Espèces	Rendements moyens grammes / m ² / jour	Teneurs lipidiques %
<i>Botryococcus braunii</i> ⁽¹⁾	30	25 à 75
<i>Haematococcus pluvialis</i> ⁽²⁾	10,2	25
<i>Chlorella</i> ⁽³⁾	20	20 à 30

(1) Christi, 2007

(2) Huntley, 2004

(3) Putts, 2007

Pour l'énergie solaire, la partie utilisable par les plantes représente une fraction de ce qui atteint le sol. Elle est décrite comme étant l'énergie « photosynthétiquement active » des radiations solaires incidentes ou « PAR ». Cette donnée fondamentale est souvent exprimée en watts par mètre carré (W / m²) et elle dépend de la localisation, plus spécifiquement de la latitude comme le démontre la figure 4.1 qui suit.

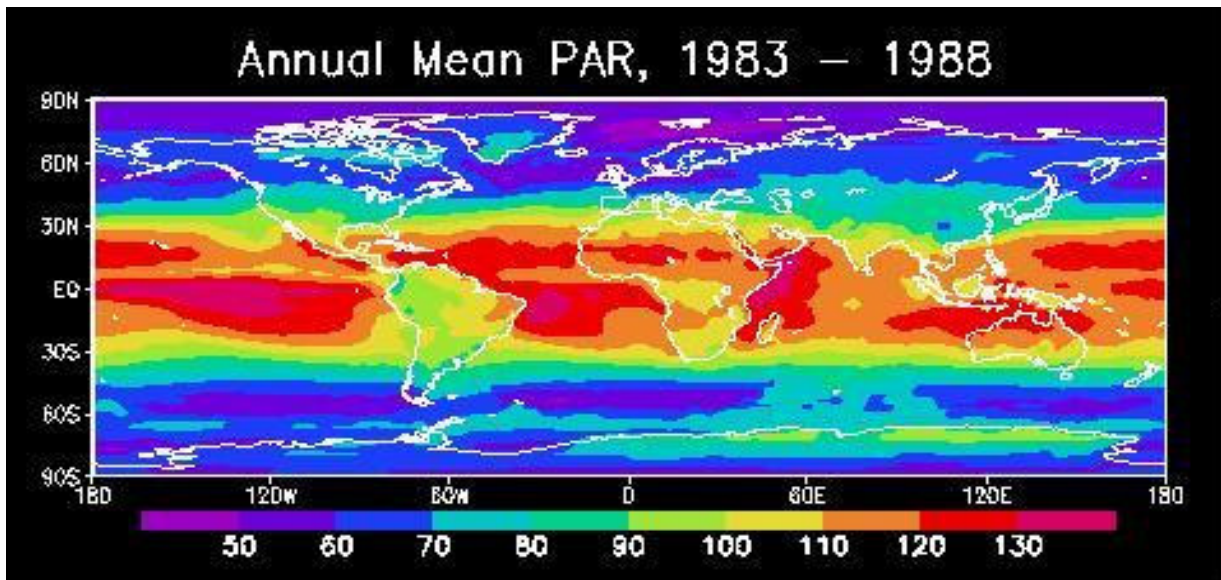


Figure 4.1 Valeurs moyennes annuelles PAR dans le monde (UMD, 1992).

De plus, il est possible d'évaluer à l'échelle globale, les principaux paramètres influençant la productivité des cultures en bassins. Cette dernière est prise comme exemple de référence de base parce qu'elle est la plus répandue et la plus exposée aux éléments.

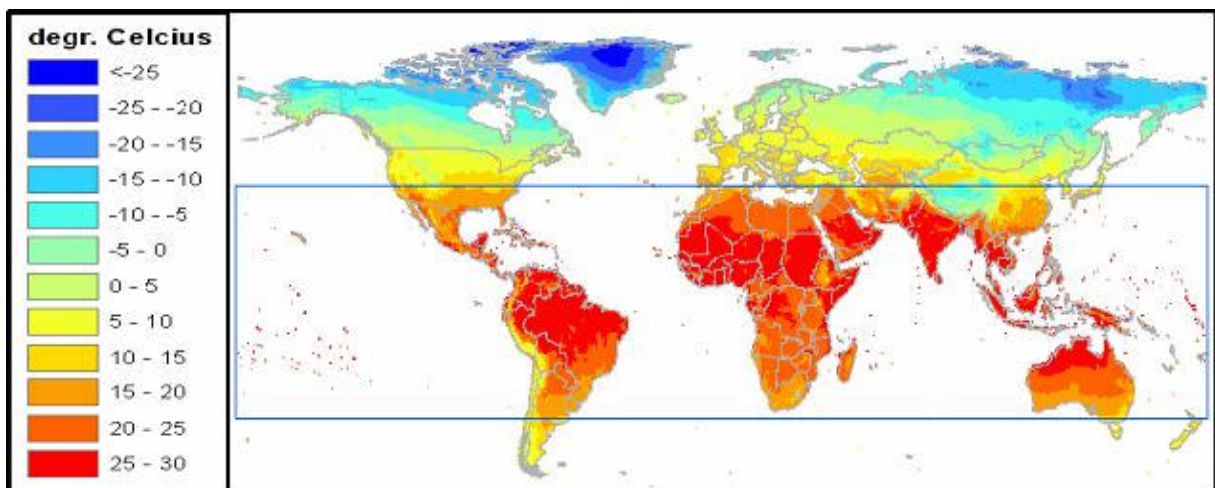


Figure 4.2 Conditions climatiques optimales dans le monde (IPCC, 2008).

La carte de la figure 4.2 illustre bien les zones climatiques dans le monde qui sont les plus favorables à la culture en mode autotrophe. Des régions rencontrant avec des températures moyennes se situant à au moins 15° C (zones rouges et orange foncé).

Ces régions se retrouvent principalement dans la zone, se situant entre les 37° de latitude nord et sud, qui est encadrée par le rectangle bleu dans la figure 4.2. L'étude des figures 4.1 et 4.2 permet de constater la corrélation entre l'influx solaire proportionnel au PAR et les températures moyennes. Ainsi, une rentabilité maximale est possible dans la zone se situant entre les latitudes de 37° nord et sud. Cette région comporte des conditions optimales d'ensoleillement avec des températures moyennes idéales supérieures à 15° C. De plus, les zones plates, qui sont recherchées pour établir des bassins, y sont abondantes (Van Harmelen and al., 2006). On note que la température optimale pour la croissance de la majorité des microalgues se situe entre 20 et 30° C et que des dommages cellulaires sont observés au delà de cette marge. Ces observations limitent le choix de zones idéales pour établir des productions autotrophes, surtout en bassins ouverts (Van Harmelen and al., 2006 ; Christi, 2007).

En plus de l'énergie solaire, les processus autotrophes nécessitent des matières nutritives (NPK) et du CO₂. La croissance rapide des microalgues épuise rapidement le CO₂ dissout dans l'eau et leur état aquatique leur limite la disponibilité du CO₂ atmosphérique moins accessible. Ainsi, la majorité des projets dépendent de sources extérieures de CO₂ pour soutenir et stimuler les hauts niveaux de productivité nécessaires pour atteindre des rendements compétitifs. De ce fait, les procédés autotrophes en PBR sont strictement dépendants de sources auxiliaires de CO₂. Certains vastes projets de cultures en bassins ouverts peuvent ne pas dépendre complètement de sources d'appoint de CO₂ pour être rentables mais il n'est pas démontré que le CO₂ atmosphérique suffirait à long terme. L'évaporation de l'eau des bassins, particulièrement forte en régions chaudes, impose la disponibilité de sources d'eau voisines.

D'autre part, les bioréacteurs qui opèrent en mode hétérotrophe nécessitent des sources de carbone organique qui sont riches, constantes, abondantes et abordables. Ces sources ne seraient préférablement pas directement issues de filières alimentaires. Présentement, d'importants joueurs, comme Amyris / Crystalsev et Solazyme, utilisent encore la canne à sucre comme source d'énergie. Les meilleures sources soutenables de carbone organique seraient issues d'eaux usées municipales, agricoles ou industrielles et de divers résidus organiques qui incluraient éventuellement des matières cellulosiques transformées en sucres par des technologies en cours de développement.

4.1.2 Productivité des systèmes autotrophes

L'évaluation des technologies et de leurs rendements de conversion biosynthétique constitue la base de l'analyse technique du concept. Elle permet d'établir le potentiel de production et l'éventuelle faisabilité technique mais aussi de juger l'applicabilité pratique des variantes énergétiques du concept algal.

Les méthodes d'évaluation de l'énergie incidente et les calculs de la conversion photosynthétique diffèrent souvent et beaucoup d'autres facteurs peuvent influencer le taux de conversion comme les souches utilisées, le mode de production, la photosaturation et la photoinhibition. On remarque des différences substantielles de productivité et plusieurs experts observent qu'il existe un problème majeur au niveau de l'évaluation des rendements annoncés notamment ceux des entreprises en phases de financement. Des méthodes d'évaluation utilisées pour estimer les rendements des technologies les plus communes sont ici présentées.

Le CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) a effectué des calculs de rendements pour la zone intertropicale. Ils obtiennent un rendement théorique moyen en biomasse sèche se situant aux environs de $60 \text{ g} / \text{m}^2 / \text{jour}$. Par ailleurs, on utilise un facteur PAR de 40 %. Du rendement théorique maximum, on retranche 10 % pour les pertes dues à la réflexion de la lumière à la surface de l'eau des bassins, 20 % pour les pertes à la surface des cellules et 30 % pour les demandes physiologiques de base comme la respiration. La production photosynthétique théorique tombe alors à $25 \text{ g} / \text{m}^2 / \text{jour}$ (CIRAD, 2007). Toutefois, l'étude du CIRAD rapporte que des cultures algales intensives en bassins produisent en réalité jusqu'à $11 \text{ g}/\text{m}^2/\text{jour}$ pour un rapport d'utilisation de l'énergie solaire disponible au sol estimé à 7 %. Ce niveau de productivité pourrait permettre de générer annuellement de un à deux litres de biodiesel au m^2 . Par ailleurs, le programme ASP a obtenu, des résultats de l'ordre de 6 à $18 \text{ g} / \text{m}^2 / \text{jour}$ pour une moyenne pondérée de $10 \text{ g} / \text{m}^2 / \text{jour}$ lors d'études effectuées en bassins. Ceci représente un taux de conversion en biomasse, de l'énergie solaire totale incidente, estimé à 2 %. Ces tests furent effectués sous des latitudes supérieures plus tempérées au sud-ouest des États-Unis avec des eaux usées riches en nutriments et sous l'effet inhibiteur des nuits froides des zones désertiques (NREL, 1998).

La globalité du processus de conversion théorique est évaluée par une approche thermodynamique utilisant l'équation 4.1 suivante, tirée de Dimitrov (2006a) :

$$E_{\text{biomasse}} = \text{PAR} \times Q \quad (\text{Équation 4.1})$$

où :

E_{biomasse} = Énergie solaire incidente totalement convertie en biomasse. En joules;

PAR = Portion photosynthétiquement active des radiations solaires incidentes.

En W / m^2 ou en $GJ / m^2 / \text{année}$. Cette donnée dépend beaucoup de la latitude;

Q = Efficacité combinée des processus optiques de captation, de conversion photosynthétique et de traitement de la biomasse. $Q_{\text{theo-max}}$ ou $Q_{\text{réel}}$ (%).

Le Q théorique maximum ou $Q_{\text{theo-max}}$ peut être calculé à partir des bases chimiques de la photosynthèse. Il a été déterminé par divers techniques que huit photons de type PAR étaient nécessaires pour créer une molécule d'hydrates de carbone (CH_2O)_n à partir de molécules de CO_2 et d'eau. Une mole de CH_2O possède un potentiel thermique de 468 kJ et une mole de photons de type PAR représentent une énergie de 217,4 kJ.

Ainsi, en excluant toutes les autres sources de pertes d'énergie lumineuse, le « facteur de conversion en biomasse maximale théorique de l'énergie solaire PAR », symbolisé par $Q_{\text{theo-max}}$, serait alors égal à 27 %, via $468 \text{ kJ} / (8 \times 217,4 \text{ kJ})$ (Dimitrov, 2006a).

Maintenant, l'évaluation du rendement potentiel d'un bassin ouvert classique est typiquement menée selon l'exemple suivant. Modifié de Benemann (2008) :

Le cas typique de bassins opérés au sud de l'Europe ou de l'Amérique du Nord (près du 37° degré de latitude nord) et qui profitent ainsi d'un « rayonnement primaire » de 2 MWhr ($206 \text{ W} / m^2$) ou $7,2 \text{ GJ} / m^2 / \text{année}$ composé de plusieurs fréquences lumineuses.

Notons que cet exemple se base sur l'hypothèse générale que la « portion photosynthétiquement active de la radiation solaire » (PAR) représente 45 % du rayonnement primaire reçu. Ainsi, l'intensité de lumière de type PAR, qui est composée de fréquences idéales à la photosynthèse, serait égale à une énergie incidente de 45 % du total reçu soit $0,45 \times 2 \text{ MWhr}$ donnant $0,9 \text{ MWhr}$ ($103 \text{ W} / m^2$) ou $3,24 \text{ GJ} / m^2 / \text{année}$.

Cette valeur PAR est entamée par $Q_{\text{réel}}$ formé des facteurs atténuateurs Q_x suivants :

- 90 % pour le $Q_{\text{incidente}}$ de portion de la lumière photosynthétiquement active qui atteint le bassin;
- 90 % pour le $Q_{\text{photosynthèse}}$, la portion des photons absorbés par les pigments de chlorophylle;
- 22 % pour le $Q_{\text{efficacité photosynthétique}}$ selon le taux de conversion de la lumière en biomasse maximum alloué par les estimations;
- 25 % pour le $Q_{\text{ps-efficace}}$ après des pertes estimées à 75 % causées par les phénomènes de photoinhibition et de saturation lumineuse. La production de biomasse par unité de surface peut être significativement augmentée en diminuant ce facteur Q particulier;
- 85 % pour le $Q_{\text{fonctions physiologiques de base}}$ fixé après une déduction de 15 % allouée pour la respiration et la croissance.

Ainsi, $E_{\text{biomasse}} = \text{PAR} \times Q_{\text{réel}} = 3,24 \text{ GJ} \times (0,9 \times 0,9 \times 0,22 \times 0,25 \times 0,85) = 0,12 \text{ GJ} / \text{m}^2 / \text{an}$ et l'« Efficacité totale » (taux de conversion en biomasse du rayonnement primaire) serait de 1,7 % ($0,12 \text{ GJ} / 7,2 \text{ GJ}$). Le $Q_{\text{réel}}$ utilisé était de 3,8 % ou ($0,9 \times 0,9 \times 0,22 \times 0,25 \times 0,85$).

Alors, avec un hectare ($10\,000 \text{ m}^2$) on peut obtenir $E_{\text{biomasse}} = 1\,200 \text{ GJ} / \text{ha} / \text{an}$ en énergie sous la forme de biomasse. La capacité énergétique moyenne de la biomasse est évaluée à $20 \text{ GJ} / \text{tonne}$ soit $60 \text{ tonnes} / \text{ha} / \text{an} = 6 \text{ kg} / \text{m}^2 / \text{an}$ de biomasse sèche dont on estime conservativement pouvoir extraire 25 % de lipides pour un rendement de 15 tonnes/ha/an en huiles ou $1,68 \text{ litres} / \text{m}^2 / \text{an}$ (Benemann, 2008).

La saturation lumineuse et la photoinhibition constituent des phénomènes qui affectent très significativement la productivité. La saturation lumineuse tient du fait que les sites de photosynthèse des organismes sont naturellement optimisés pour opérer en conditions normales de faibles intensités lumineuses. L'intensité, dite de saturation, se situe entre 200 et $300 \text{ W} / \text{m}^2$. Au delà de ces niveaux, les sites photosynthétiques n'augmentent plus leur production; ils sont paralysés par les surplus d'électrons générés. La photoinhibition apparaît quand l'intensité lumineuse dépasse trop le niveau optimal. Ces excès peuvent bloquer et endommager les sites de photosynthèse des cellules. Ces seuils critiques apparaissent spécifiques pour chaque espèce de microalgues (NREL, 1998 ; CRBM, 2006).

On remarque que les rendements enregistrés en bassins peuvent être significativement améliorés d'un facteur de deux à trois par le contrôle de la saturation lumineuse et de la photoinhibition. Toutefois, les besoins énergétiques des procédés de traitement de la biomasse (extraction, concentration, séchage, conversion en biocarburants) ne sont que rarement comptabilisés. Par ailleurs, il est encore possible d'améliorer significativement les procédés de traitement.

Les photobioréacteurs tentent d'exploiter au maximum l'énergie incidente en minimisant notamment ces phénomènes de photosaturation et de photoinhibition et en maximisant la bioassimilation du CO₂. Ce mode fermé protège le milieu de culture des contaminants et permet une culture optimisée de souches performantes.

Le cas de la technologie des photobioréacteurs tubulaires de Green Fuel est devenu un exemple typique et représentatif du domaine. Les rendements annoncés par la compagnie, dans sa soumission de brevet, indiquent un rendement estimé à 41,6 litres d'huiles diverses par m² par année. Ces données furent l'objet de plusieurs débats et de révisions critiques (Dimitrov, 2007a et 2007b).

Les évaluations du rendement théorique des photobioréacteurs et l'estimation des facteurs d'atténuation constituant le $Q_{\text{réel}}$ sont particulièrement détaillées afin de mesurer les effets combinés des nombreux facteurs affectant la captation de la lumière solaire au sein des complexes systèmes de PBR. Ainsi, en plus des constituants Q_x déjà présentés pour la culture en bassins, le $Q_{\text{réel}}$ est ici composé de plusieurs autres variables (Q_x). Ils sont attribués aux effets de la transparence des surfaces, des tubes, des réflexions, des ombres etc. L'effet de la réflectivité des bulles de gaz est même pris en compte. L'évaluation des pertes (faibles) encourues lors de la transformation de la biomasse en biocarburants est ici évaluée. Le $Q_{\text{ps-efficace}}$ alloué pour la perte par photosaturation et photoinhibition est ici estimée favorablement à seulement 10 % en raison de l'efficacité attendue des photobioréacteurs. Le $Q_{\text{réel}}$ est estimé à 10 %, ce qui est plus que le double qu'en bassins. Les calculs aboutissent alors à 2,34 litres de lipides / m² / an.

Les grandes lignes des principales techniques autotrophes (et hétérotrophes) sont analysées et comparées dans les tableaux 4.2 et 4.3 des sections suivantes.

4.1.3 Productivité des systèmes hétérotrophes

Les rendements du mode hétérotrophe sont indépendants du rayonnement solaire et ils dépendent des caractéristiques nutritives de leur milieu de culture. L'énergie chimique est répartie dans le volume même du réacteur. Les rendements des systèmes hétérotrophes sont exprimés en grammes par litre de milieu de culture et ils sont calculés sur des périodes variables de croissance (g / litre / temps). Mais les rendements des techniques autotrophes sont exprimés en grammes par mètre carré par période de culture (g / m² / temps). Ainsi, afin de faciliter les comparaisons entre les rendements de ces systèmes, il est possible de faire l'hypothèse qu'une cuve carrée d'un mètre cube est ici utilisée.

Des expériences d'optimisation effectuées avec l'espèce *Chlorella* ont rapporté des rendements maximums de 116,2 g de biomasse sèche par litre par semaine pour environ 50 g en lipides / litre / semaine, représentant ainsi une productivité de 1,02 g / litre / heure (Xiong and al., 2008). Le mode hétérotrophe permet généralement d'atteindre des teneurs élevées en lipides comme dans le présent exemple qui atteint 43 %. Ainsi, avec un m³ ou 1 000 litres de solution de culture on produirait aux environs de 6 042 kg / m³ / an de biomasse sèche contenant 2 920 litres d'huile (ou 2 600 kg selon une densité des lipides de 0,89 kg / litre). Un rendement moyen en lipides de 50 g par litre est possiblement atteint en une semaine, ce qui se compare avantageusement avec les 30 à 50 g / litre, mesurés dans les fermenteurs éthyliques conventionnels. Ces résultats confirment que cette approche est applicable en regard de la disponibilité déjà établie des principaux intrants et de la relative simplicité du procédé (Xiong and al., 2008). Même les résultats les plus modestes de ces tests sont impressionnants alors qu'ils n'atteignent que seulement 6 % des valeurs maximales présentées. Toutefois, les rendements atteints par Solazyme et Amyris / Crystalsev restent à être démontrés et confirmés.

Les calculs généralement associés à ce mode de production s'appliquent surtout à évaluer la capacité maximum théorique des procédés à générer des lipides parce que ce mode est particulièrement productif et que la fraction lipidique de la biomasse sèche est la forme énergétique la plus rentable à extraire.

4.1.4 Rendements des principaux procédés

La variabilité étendue des rendements annoncés, estimés ou prévus, met en relief le besoin d'analyser des résultats fiables et indépendants. L'évaluation de la productivité des principaux procédés permet de juger du niveau potentiel d'applicabilité des technologies et du potentiel de rentabilité des investissements. En particulier, les éléments technologiques les plus importants, sont liés à la production ainsi qu'à l'extraction de la biomasse de l'eau.

- Éléments technologiques de culture

La culture en bassins ouverts est la technique la plus ancienne, la plus simple et la moins dispendieuse. Elle dépend de l'énergie solaire et elle permet, en théorie du moins, d'atteindre plus facilement la rentabilité. Les problèmes possibles à prévoir sont les variations de température et d'ensoleillement, la contamination des cultures par d'autres espèces, l'évaporation rapide de l'eau des bassins et le contrôle des paramètres physicochimiques.

Il faut optimiser l'ensoleillement en dosant la circulation et la profondeur des bassins afin d'exposer les microalgues de manière à diminuer leur photoinhibition et la photosaturation. Idéalement, on recherche de grandes étendues de territoires plats, en zones relativement chaudes et peu dispendieuses situées près de grandes agglomérations comportant idéalement des sources de CO₂ voisines. Le défi de trouver de vastes territoires propices et abordables situés à proximité de grands centres peut représenter un obstacle majeur.

Pour les cultures autotrophes appliquées en bassins ouverts le plus grand problème est l'envahissement des bassins par des espèces peu productives en lipides. Les souches de microalgues à faible taux lipidiques sont problématiques. Elles croissent plus rapidement que les autres par le fait que la production de lipides demande plus d'énergie. Cette demande d'énergie ralentit d'autant la croissance des souches favorisées pour leurs hauts taux lipidiques. Ce fait explique le développement d'approches hybrides (bassins et PBR) où l'essentiel de la croissance et de l'alimentation s'effectue dans la zone protégée du PBR. Il est même question de développer des espèces à hauts rendements lipidiques résistantes à certains pesticides. Ces produits chimiques seraient alors répandus dans les bassins pour conserver le caractère axénique des cultures (Briggs, 2004). La production en photobioréacteurs (PBR) est réalisée avec des dispositifs évolués.

Ces installations de haute technologie permettent d'optimiser la productivité de biomasse algale. Cette approche vise particulièrement à favoriser l'exposition optimale des microalgues à la lumière solaire et à minimiser les pertes causées par les phénomènes de photoinhibition et de photosaturation qui peuvent atteindre 75 %, tout en maximisant l'assimilation du CO₂ et d'autres nutriments (Benemann, 2008). Par ailleurs, cette dépendance à des sources externes de CO₂ peut devenir problématique mais cette approche offre la possibilité de mieux contrôler tous les paramètres du milieu de culture avec une meilleure protection contre les mauvaises conditions climatiques et les sources de contamination.

Toutefois, ces technologies sont sujettes aux problèmes engendrés par les coûts élevés de construction, le réchauffement de l'eau et le besoin de contrôler de nombreux paramètres comme le pH et l'augmentation rapide du taux d'oxygène. De plus, l'entretien des installations menace de devenir un facteur majeur pour les coûts de revient, car les effets de la dégradation et de l'altération des surfaces transparentes sont mal connus. Les phénomènes de salissage, d'abrasion et d'oxydation sont dispendieux à contrôler et ils affectent directement la productivité des projets (Amos, 2004; Chriti, 2008).

Le choix du mode de production est pour tout projet une étape critique qui dépend de nombreux facteurs. L'évaluation reste complexe à plusieurs niveaux et elle est parfois subjective parce que l'exploitation industrielle intensive de cultures de microalgues comme source d'énergie émerge lentement du stade expérimental et qu'elle en est encore à ses débuts pour la production énergétique.

L'analyse du tableau 4.2 qui suit peut expliquer l'intérêt que représentent les approches hybrides (bassins - PBR). L'hybridation de techniques complémentaires peut permettre de maximiser les points forts de leurs éléments constitutants tout en leur permettant de palier mutuellement à leurs faiblesses.

Tableau 4.2 Comparaison des principales technologies autotrophes.

Modifié de Benemann (2008).

Facteurs	Bassins	PBR
Espaces requis	Grands	Selon productivité
Eau d'appoint	Pertes par évaporation	Nécessité de refroidir
Pertes de CO ₂	Selon la température et la technique de diffusion	Selon pH, alcalinité etc.
Nutriments	Flexibilité : eaux usées ou autres	Contrôle critique. Contraintes : propreté des surfaces transparentes intérieures à préserver
Contamination	Risques élevés constants	Problème sporadique
Inhibition par O ₂ produit	Contrôle attentif exigé	Contrôle problématique
Contrôle du procédé	Soucis climatiques	Technologie complexe
Concentrations algales	Dépendantes de la profondeur des bassins	2 à 10 fois supérieures
Productivité en conditions comparables	Selon température	Supérieure en périodes froides ou en mode vertical
Coûts	Bas	10 fois plus élevés
Photoinhibition et photosaturation	Baisse de productivité jusqu'à 75 %	Potentiel de contournement
Point fort	Simplicité	Climats froids
Production industrielle de biocarburants	Potentiel vraisemblable	Trop dispendieux sauf pour la production d'inoculum

Les performances potentielles du mode hétérotrophe sont supérieures mais elles dépendent essentiellement de la disponibilité de sources abordables et constantes d'effluents riches en nutriments comme des hydrates de carbone. Les organismes présents dans chaque litre enrichi de milieu de culture peuvent ainsi profiter d'une beaucoup plus grande quantité d'énergie disponible en comparaison avec les microalgues autotrophes qui doivent attendre de pouvoir capter leur énergie du soleil tout en étant plus exposées aux éléments.

L'approche hétérotrophe représente un potentiel indéniable pour extraire de l'énergie de divers effluents riches en carbone et ceci indépendamment des conditions climatiques et d'ensoleillement.

En général, les performances des meilleures cultures agricoles effectuées en sols fertiles sont beaucoup moins élevées que celles atteintes avec les divers concepts utilisant des microalgues et ceci explique l'intérêt grandissant pour ces technologies et les nouvelles initiatives de plus en plus engagées dans le domaine.

- Récolte et assèchement de la biomasse algale

La séparation des microalgues de l'eau ainsi que l'extraction efficace des composés demeurent des étapes problématiques et il est important de les optimiser. Par exemple, les procédés d'extraction des lipides nécessitent une siccité d'environ 15 % à 20 % pour être efficaces. Il est donc crucial de concentrer le plus possible la biomasse du milieu de culture avant toute autre procédure d'extraction.

La très petite taille des microalgues (10 μm en moyenne) et leur faible concentration (aux environs de 400 mg / L, poids sec) même aux niveaux maximums de densités atteints en bassins, imposent de devoir opérer une difficile concentration de l'ordre de 500 fois pour atteindre une siccité de 20 %. Les premiers 5 % de siccité sont les plus difficiles et coûteux à réaliser (Benemann, 2008). Les méthodes de centrifugation sont très efficaces mais elles sont encore dispendieuses et l'utilisation de manière exclusive de flocculants chimiques (alun, sulfate ferreux, chitine etc.) est prohibitive. Toutefois, une centrifugation appliquée après une première étape de floculation et de décantation permettrait de réduire considérablement les coûts (Sazdanoff, 2006). Le développement de cultures avec des espèces bioflocculantes performantes représente un sérieux objectif à atteindre.

À partir de la biomasse concentrée, il est alors possible d'extraire la fraction lipidique, la plus rentable, avec des solvants ou d'autres techniques et de procéder à la méthanisation directe des résidus ou à l'extraction des protéines ou d'autres composés à valeur ajoutée. Selon les conditions, il est possible que la méthanisation soit préférable parce qu'elle est simple et qu'elle reste la voie la plus énergétiquement efficace. Toutefois, les résidus issus de cette option ne peuvent servir que de fertilisants (Van Harmelen and al., 2006 ; Benemann 2008).

Les rendements de quelques-unes des principales initiatives sont ici résumés. Ils proviennent pour la plupart des entreprises elles mêmes. Elles expriment leurs rendements de façons différentes et certaines conversions sont effectuées pour faciliter les comparaisons. Pour les microalgues, en l'absence de précisions spécifiques, une teneur conservatrice de 25 % (poids) en lipides est postulée selon une estimation basée sur la valeur des rendements moyens conservateurs de plusieurs souches étudiées (Becker 1994; Huntley and Redalje 2004; Dimitrov 2006a et 2006b; Benemann 2008).

Voici dans le tableau 4.3 une analyse comparative du rendement de plusieurs des projets algaux les plus pertinents en incluant aussi les performances des meilleures cultures effectuées en terre :

Tableau 4.3 Comparaison des rendements des principaux projets.

Projets	Technologies	Rendements biomasse sèche (kg / m ² / an) ⁽¹⁾	Rendements carburants huiles (éthanol pour canne à sucre et maïs) (litre / m ² / an)	Commentaires
ASP (NREL, 1998).	Bassins ouverts typiques	3,65 ⁽²⁾	1,025	Tests de Roswell. La température considérée comme plus important facteur
Green Fuel (Kho, J. 2008).	PBR	28,8	4,5	PBR de deuxième génération
Pétrosun (Cornell, 2008)	Bassins ouverts	11,36	3,2	Prévisions de 50 000 tonnes de biomasse par année sur 440 hectares
Solix (Solix, 2007).	Bassins	20	6	Prévisions de 60 500 litres / ha / an
Cellana (Huntley and Redalje, 2006).	Hybride PBR et bassins	20 (estimation)	6	Hawaï

SRCA du Canada (Daigle, 2008)	Bassins hybrides	11 à 44 Prévisions	3 à 12	On prévoit 3,5 barils / tonne = près de 495 kg de lipides / tonne ce qui équivaut à une teneur en lipides de près de 50 %
Mode hétérotrophe ⁽³⁾ (Xiong and al., 2008)	Bioréacteurs	378 à 6 042 Pour 1 m ³	183 à 2 920 Pour 1 m ³	Litres de lipides / m ³ de culture / an. Pour une profondeur de bassin de 33 cm : Tout diviser par trois
Canne à sucre (Brown, 2006)	Cultures en sols	n/a	0,62	Brésil 6 200 litres d'éthanol par hectare
Canola (Id., p. 3)	Cultures en sols	n/a	0,12	1 200 litres par hectare
Jatropha ⁽⁴⁾ (NCAT, 2008).	Cultures en sols	0,35	0,16	Non en compétition avec les cultures alimentaires
Maïs (Greene, 2004)	Cultures en sols	n/a	0,326	3,1 milliards de gallons sur neuf millions d'acres aux États-Unis
Palme (Id., p. 3)	Cultures en sols	n/a	0,6	6 000 litres d'huile par hectare
Soya (Campbell, 2008)	Cultures en sols	n/a	0,045	450 litres d'huile par hectare. En 2001, les fèves de soya étaient la source de 90 % du biodiesel produit aux États-Unis

(1) Considérant une teneur de 25 % en huiles à 0,89 de densité

(2) Pour 10 g / m² / jour, de 3 à 18 g / m² / jour (hiver-été) (Weissman and Tillett, 1992)

(3) Valeurs extrêmes d'essais d'optimisation, par m³. Taux moyens de lipides à près de 50 %

(4) Cette plante est parmi les plus productives en lipides et elle est cultivable en sols non arables. Rendement de 1 590 litres huile / ha / an ou 0,16 litre / m² / an. Ainsi, 0,16 x 0,89 kg / litre = 1 415 kg / 0,4 (teneur lipidique de 40 % au poids). Déduction du total de biomasse égale à 3 537 kg / ha / an ou 0,35 kg / m² / an (NCAT, 2008)

L'évaluation plutôt théorique de l'applicabilité technique des projets est compliquée par la rareté et la disparité des données brutes qui rendent les comparaisons difficiles. Mais, il se dégage que, techniquement, les cultures algales autotrophes pourraient être au moins 10 fois plus productives et les cultures effectuées en mode hétérotrophe seraient de 500 à 1000 fois plus productives que les meilleures cultures conventionnelles effectuées dans des exploitations agricoles en sols fertiles. Toutefois, pratiquement tous les procédés autotrophes dépendent de l'apport de CO₂ extérieur injecté dans l'eau pour atteindre des niveaux suffisants de productivité. Les procédés hétérotrophes actuels dépendraient encore, quant à eux, de sources alimentaires de carbones organiques (amidon, sucres, etc.).

En pratique, l'étude des exploitations actuelles de production industrielles de microalgues alimentaires est très instructive. Plusieurs utilisent les techniques autotrophes simples et robustes de cultures en bassins avec des agitateurs à pales. L'usage d'espèces autoflocculantes ou des étangs de décantation leur permet de maintenir les coûts de production au plus bas niveau. Par exemple, plusieurs projets se sont avérés efficaces et rentables pour produire des nutraceutiques et de la nourriture pour animaux (CRBM, 2006). En général, les principaux paramètres pour produire des biocarburants en bassins extérieurs sont bien compris et malgré le fait que 90 % des nouvelles initiatives se concentrent sur le développement de PBR (Benemann, 2008), pour plusieurs, l'essentiel des développements futurs devraient se concentrer sur la R-D d'espèces plus performantes et l'optimisation de la production en bassins de superficies supérieures à cinq hectares (NREL, 1998 ; Putts, 2007; Benemann, 2008). Les projets de production uniquement basés sur des systèmes fermés de PBR sont complexes, coûteux et d'une efficacité discutable à long terme. Toutefois, ils sont efficaces pour produire des inoculums d'algues destinées à croître en bassins extérieurs ce qui pourrait permettre de combattre les problèmes de contamination des bassins et de rentabiliser le concept avec des systèmes hybrides bassins - PBR tels qu'actuellement testés par Cellana à Hawaï (Huntley and Redalje, 2006 ; Benemann, 2008).

Les technologies hétérotrophes sont les plus productives mais leur production actuelle est principalement basée sur des sources du domaine alimentaire (Martek, 2008). Elles représentent un grand potentiel pour optimiser et diversifier les filières de production d'éthanol en permettant de produire du biodiesel avec leurs effluents.

En conclusion, il ressort que l'essentiel de la productivité des technologies repose sur les conditions liées à la situation géographique et à la biologie des organismes. L'évaluation de la productivité théorique dépend de principes physiques mais aussi du choix des paramètres, des hypothèses de départ et de l'évaluation des facteurs d'atténuation qui peuvent grandement affecter les résultats. Ceci explique, en partie, la difficulté de prévoir les rendements avec précision et la nécessité de valider le rendement des divers concepts avec l'investissement de sommes considérables en R-D et en usines pilotes. Plusieurs constatations expérimentales et théoriques indiquent que l'atteinte d'une productivité maximale en mode autotrophe n'est possible qu'en zones tropicales favorisées par un ensoleillement abondant et des températures moyennes stables et suffisamment élevées. À ce jour, les techniques en bassins ouverts semblent favorisées pour la production autotrophe d'algocarburants mais certains développements démontrent plusieurs avantages à les hybrider avec des PBR d'inoculation afin de combattre les souches contaminantes moins lipidiques et plus agressives. Les rendements autotrophes les plus conservateurs vont de 1 à 3,2 litres de lipides / m² / an. Les procédés hétérotrophes sont applicables en toutes conditions climatiques mais ils dépendent encore de nutriments du secteur alimentaire. Par ailleurs, ils peuvent être, en théorie, jusqu'à 1 000 fois plus performants. Ils pourraient permettre d'optimiser la production de biocarburants. De façon générale, la récolte et la transformation de la biomasse en biocarburants doivent être optimisées.

4.2 Analyse des aspects économiques

L'évaluation des rendements techniquement atteignables ne représente évidemment qu'une part de l'équation visant à déterminer la viabilité d'un concept. Il est aussi nécessaire d'évaluer les aspects économiques, comptables et financiers afin d'en mesurer le degré d'applicabilité. L'étude de la rentabilité reste le facteur déterminant à vérifier pour envisager le développement d'un projet.

Des analyses économiques furent effectuées afin de vérifier si le potentiel de productivité des microalgues permettrait l'émergence d'une industrie rentable. Historiquement, la première analyse techno-économique effectuée en prévision d'une production industrielle fut réalisée en 1960 par Oswald et Golueke pour leur projet de méthanisation de biomasse algale qui anticipait des cultures dans des bassins géants opérés en cycle fermé.

Ils avaient alors estimé que l'électricité produite par leur concept serait compétitive avec celle des centrales nucléaires (Golueke and Oswald, 1959). On note que leurs estimations reposaient sur une productivité de $5 \text{ kg} / \text{m}^2 / \text{année}$, ce qui est de deux à cinq fois inférieur aux niveaux de productivité couramment mesurés. Cette approche reste donc très prometteuse. En outre, les travaux du NREL concluait que la culture en bassins représente probablement l'approche la plus susceptible de permettre une production rentable d'algocarburants.

4.2.1 Marché de l'énergie

La plupart des initiatives engagées en énergies renouvelables sont concentrées dans la production d'énergie électrique alors que les deux tiers de l'énergie consommée mondialement sont constitués de carburants liquides (Hankamer and al., 2007). Ainsi, le développement de biocarburants écologiquement et socialement soutenables devient un objectif important à poursuivre. Le marché de l'énergie s'y intéresse de plus en plus.

Ces dernières années, la hausse rapide du prix du pétrole a relancé les investissements dans les énergies alternatives. Les conditions économiques ont récemment changées, mais durant les périodes de hausses boursières euphoriques, les conditions sont propices à l'éclosion de bulles spéculatives. Dans le domaine des alternatives au pétrole, beaucoup d'argent provient d'investisseurs moyens sans spécialisation technique ou scientifique et ce nouvel engouement pour un concept alternatif prometteur ouvre la voie à des excès de toutes sortes et aux manipulations. Le domaine des algocarburants pourrait ne pas y échapper et il est probable que certaines entreprises de premier plan, se révèlent être des coquilles vides ou des déceptions. En plus des pertes économiques directes qu'elles provoquent, de tels échecs peuvent miner la confiance des investisseurs potentiels et gêner le financement d'initiatives plus sérieuses et prometteuses (Konrad, 2007).

La valeur du prix du pétrole ($\$ / \text{baril}$) sert souvent de référence pour le secteur énergétique. Le point d'équilibre entre les coûts de production encourus et les revenus doit permettre de vendre le biodiesel à un prix près de cette valeur phare. La rentabilité des entreprises de biocarburants dépend en bonne partie des cours mondiaux du pétrole. Les derniers mois ont démontré que les prix pétroliers sont très volatiles.

En cinq ans, le prix du brut est passé de près de 30 \$ à 150 \$ le baril en juillet 2008, pour atteindre 35 \$ / baril en février 2009, puis 58 \$ en mai 2009. Cette situation est typique : le marché énergétique suit les cycles économiques. Mais la population mondiale augmente toujours de près de 1 % par année et les réserves de pétrole sont non renouvelables.

Toutefois, à court terme, pour qu'un projet soit intéressant, la différence entre les cours mondiaux du pétrole et les coûts de production des algocarburants, doit être suffisante pour permettre un rendement financier compétitif, égal ou supérieur, à des investissements qui pourraient être effectués dans le même secteur. Toutefois, d'éventuelles politiques concernant l'environnement, la sécurité des approvisionnements énergétiques ou d'autres stratégies géopolitiques peuvent créer des conditions favorables au développement de la filière « microalgues » et lui permettre de devenir plus compétitive avec les carburants fossiles pendant la délicate phase de transition (Farrell and Brandt, 2006). Par ailleurs, la rentabilité de la production de biocarburants d'origine algale est menacée par des coûts de production encore trop élevés et la forte compétition issue de procédés dits verts utilisant des intrants relativement abordables de sources agricoles, forestières ou cellulosiques.

Les travaux de Farrell et Brandt soulignent que les technologies de production de pétroles synthétiques ont beaucoup évolué et que le potentiel en ressources fossiles variées transformables en pétrole est beaucoup plus grand que ce que laissaient croire les estimations passées (Farrell et Brandt, 2006). En outre, les chercheurs ont souligné les trois éléments suivants :

- Il est urgent d'introduire des facteurs environnementaux dans les équations comptables, les évaluations économiques et de gestion;
- Au niveau des transports en particulier, la compétition des carburants fossiles pourrait persister beaucoup plus longtemps que prévu;
- La production de carburants d'origine fossile abordables pourrait s'accroître.

Au niveau purement économique, la culture terrestre la plus compétitive par rapport à l'exploitation des microalgues est celle de la canne à sucre cultivée en zones tropicales. Les résidus d'extraction, ou bagasse, sont utilisés pour générer toute l'énergie (thermique et électrique) nécessaire à la distillation. D'amples surplus d'électricité sont revendus à l'état.

4.2.2 Comptabilité analytique

Divers facteurs économiques peuvent déterminer la rentabilité d'un projet comme la productivité, les décisions financières d'amortissement, les coûts de construction et d'opération etc. L'évaluation des coûts et des revenus de production est complexe et elle varie selon les concepts. De plus, les prix des énergies conventionnelles, comme le pétrole par exemple, doivent se situer au delà de certains seuils critiques propres à chaque application et les variations du marché de l'énergie peuvent transformer le succès d'un projet en échec.

- Estimations des coûts de production

Des études ont analysé les facteurs affectant la rentabilité de plusieurs projets de production d'algocarburants en estimant leurs coûts et leurs revenus potentiels. Les coûts les plus élevés se situent au niveau des immobilisations. Ces coûts sont financés et les revenus annuels des projets doivent atteindre un seuil acceptable de viabilité. Les périodes d'amortissement sont généralement étalées sur 20 ans à des taux moyens de 14 à 17 %.

En général on estime que les coûts d'immobilisation approchent près de 13 \$ / m² pour les systèmes en bassins pour des niveaux de production supérieurs à 100 t / ha / an. Une production annuelle de 100 tonnes de biomasse par hectare est considérée comme un minimum pour atteindre la rentabilité, ce qui nécessite une augmentation de 50 % des performances moyennes atteintes en bassins (Van Harmelen and al., 2006).

D'autres études estiment que les immobilisations nécessaires atteignent 10 \$ / m² pour des productions en bassins de l'ordre de 100 tonnes / ha / année (Weissman and Goebel, 1987; Benemann, 2008). Ces investissements pourraient s'élever jusqu'à 190 \$ / m² pour certains cas utilisant des PBR tubulaires (données extrapolées pour 288 tonnes / ha / an) (Dimitrov, 2006a). Les données situent ces coûts de 82 \$ à 233 \$ / m² selon les estimations du concept hybride du programme SRCA (Daigle, 2008).

Les coûts des projets avec PBR seraient donc près de 10 fois plus élevés que ceux des projets avec bassins de même capacité : les infrastructures nécessaires au maintien des niveaux de production visés doivent être de très grandes envergures pour être rentables.

Les coûts d'opération des projets de production en bassins seraient de l'ordre de 90 \$ / tonne ou près de 1 \$ / m² / an et près du double pour les PBR. Mais on attribue souvent des coûts négligeables pour les terrains en supposant l'occupation de zones arides, reculées ou contaminées. Des ententes industrielles ou gouvernementales et les coûts de captage et de distribution du CO₂ sont souvent considérés comme faibles ou compensés en fonction d'éventuels revenus issus des crédits de carbone, de l'épuration d'eaux usées ou de la vente de sous-produits (Daigle 2008 ; Van Harmelen and al., 2006).

La récolte des microalgues par biofloculation est probablement la technique la plus économique mais elle n'a pas encore été testée à grande échelle. Les autres techniques par centrifugation ou par flocculants chimiques peuvent coûter plus de 500 \$ / tonne en termes de biomasse sèche (Schulz, 2006). Par ailleurs, le raffinage par transestérification des huiles issues de la biomasse algale en biodiesel est efficace et le procédé est simple et peu coûteux. Ce raffinage peut être considéré comme peu significatif dans les calculs. Il est estimé se situer aux environs de 0,07 \$ par gallon ou près de deux cents par litres.

- Estimations des revenus

Une partie de ces coûts peut être diminuée par la vente des sous-produits de la transformation comme la glycérine (Fortenbery, 2005). Il est aussi possible de rentabiliser certaines variantes du concept de production d'algocarburants en bassins par divers revenus issus de la vente de composés et de sous-produits plus rentables comme certains biopolymères, des revenus issus de l'épuration d'eaux usées ainsi que d'éventuels crédits de carbones. Ces revenus auxiliaires sont souvent évalués en fonction d'un pourcentage se situant par exemple de 0 à 20 % de la valeur nette des revenus issus des huiles (Van Harmelen and al., 2006).

Toutefois, la production de quantités massives de biomasse algale est nécessaire à l'atteinte de seuils rentables et il est possible que les sous-produits protéiniques obtenus viennent à saturer le marché des aliments pour animaux (Dimitrov, 2006).

Les résultats totaux obtenus après avoir comptabilisé les coûts, les revenus et les périodes d'amortissement sont souvent exprimés en terme de prix de baril équivalent de biodiesel. Ceci facilite aussi la comparaison du prix de revient avec celui des cours pétroliers.

Les évaluations du prix des huiles de biomasse algale, en termes de \$ / baril, sont complexes et elles ne sont pas toujours disponibles. On observe que les résultats peuvent beaucoup varier. Certaines évaluations représentatives du prix de revient sont ici comparées. En voici quelques-unes présentées par le tableau 4.4, ci-dessous :

Tableau 4.4 Quelques estimations du prix de revient d'algocarburants.

Prix \$ / baril	Technologies	Commentaires	Références
800	Certains PBR comme Green Fuel	Simulation numérique. Possibilité d'aberrations causées par les coûts élevés des installations. Le programme ASP avait par ailleurs rejeté le concept de PBR à cause des coûts élevés (NREL, 1998; Putt, 2007).	Dimitrov, 2006a.
145	Bassins hybrides	Projet SRCA. Selon une évaluation théorique basée sur des coûts minimes d'immobilisation, un amortissement sur près de sept ans et une teneur optimiste en huiles de 50 %	Daigle, 2008
60 à 100	Bassins	Simulations numériques pour procédés alimentés d'eaux usées	Van Harmelen and al., 2006
80	PBR	Estimations théoriques	Christi, 2007
85	Bassins	Estimation approximative basée sur tests en laboratoire pour Sud des États-Unis. Période d'amortissement non précisée	Putt, 2007
84	Hybrides bassins / PBR	De type Cellana, basés sur des tests effectués en usine pilote	Huntley and Redalje, 2004
39 à 69 ou 57 à 101	Tests en bassins	Teneur de 40 % en huiles Dollars de 1996 (57 \$ à 101 \$ en dollars de 2009 et une inflation annuelle de 3 %)	Benemann and Oswald, 1996

Plusieurs données sont encore basées sur des estimations, des hypothèses, des tests d'envergures variées et autres calculs théoriques. Toutefois, il est possible de recouper les informations de diverses sources. En général, la compétitivité du concept semble possible avec un baril de pétrole dépassant les 80 \$. Toutefois, la purification d'eaux usées associée à la production de biomasse, permettrait une meilleure rentabilité et une base prometteuse de développement (NREL, 1998; Van Harmelen and al., 2006; Carlsson and al., 2007).

Les projets de production, uniquement basés sur des systèmes fermés PBR seraient trop coûteux mais ils pourraient être particulièrement utiles pour produire des inoculums destinés à optimiser les cultures en bassins extérieurs (Benemann, 2008). Par ailleurs, ils pourraient aussi être rentabilisés en partie par l'exploitation de produits à haute valeur ajoutée.

Certaines constatations font apparaître comme vraisemblable que le prix de revient de production des pétroles synthétiques ne dépasseraient pas 50 \$ / baril même en y incluant des coûts de captation et d'enfouissement du CO₂ (Farrell et Brandt, 2006). Ceci pourrait constituer un sérieux frein au développement des technologies vertes alternatives à moins que les coûts environnementaux ne soient aussi pris en considération et comptabilisés.

L'évaluation financière des variantes du concept est imprécise. Plusieurs types d'application sont encore en développement et il n'existe pas d'installations d'envergure opérées depuis assez longtemps pour obtenir des données réalistes à longs termes. Plusieurs entreprises restent discrètes dans leurs communications parce que le domaine est très compétitif et qu'elles dépendent de subventions et d'investissements privés pour survivre. De plus, le marché de l'énergie est de plus en plus volatil et d'autres options énergétiques émergent.

Le développement du concept de la production de biocarburants à base de microalgues peut donner lieu à l'émergence d'une nouvelle industrie et susciter plusieurs autres effets économiques positifs comme par exemple :

- Accroissement de l'autonomie énergétique;
- Stabilisation des prix énergétiques et de l'économie générale;
- Nouveaux investissements et créations de nouveaux emplois en R-D et en production;
- Source abordable de nutriments pour l'alimentation animale et humaine;
- Stabilisation et baisse des prix du secteur alimentaire;
- Nouvelle industrie d'assainissement de l'air et des eaux usées.

L'analyse et l'inclusion des externalités comme les coûts issus des effets environnementaux et sociaux pourraient permettre de démontrer que des projets, précédemment évalués comme peu rentables ou déficitaires, selon la comptabilité conventionnelle, seraient en fait très rentables quand tous les paramètres sont considérés et évalués à plus long terme.

En conclusion, le prix du baril de pétrole est devenu la référence à laquelle, les carburants alternatifs d'origines fossiles ou vertes, doivent se mesurer. La hausse rapide du prix du pétrole des dernières années a relancé les investissements dans les énergies alternatives et peut avoir donné naissance à une bulle spéculative. Mais les projets de solutions alternatives au pétrole doivent aussi s'adapter aux fluctuations parfois rapides des cours pétroliers. Par exemple, la crise économique présentement en cours a fait chuter le prix du baril de pétrole de plus de 100 \$ en quelques mois, ce qui a rendu les alternatives au pétrole beaucoup moins compétitives. Le prix de revient du biodiesel algal tourne aux environs de 80 \$ / baril. Le développement d'algocarburants est aussi menacé par la compétition des nouveaux substituts de pétroles synthétiques dont les coûts de revient pourraient persister à près de 50 \$ / baril (Farrell and Brandt, 2006). En général, la rentabilisation du concept pourrait être facilitée en y greffant la purification d'effluents et des productions plus rentables que les biocarburants.

À moyen terme, l'application industrielle du concept demeure un objectif vraisemblable surtout pour le traitement d'eaux usées, et peut être, pour certaines productions plus rentables comme des nutraceutiques ou des aliments pour animaux. Les procédés actuels sont encore trop coûteux pour produire des biocarburants compétitifs (Benemann, 2008). En général, les techniques de productions et d'extraction devraient être améliorées d'au moins 50 % pour atteindre une productivité annuelle de 100 tonnes (poids sec) de biomasse par hectare (Van Harmelen and al., 2006).

L'établissement du concept énergétique algal permettrait la création d'une nouvelle industrie applicable un peu partout dans le monde. Il est possible que l'augmentation des problèmes climatiques et l'évolution des politiques environnementales permettent bientôt de mieux intégrer les coûts environnementaux réels aux calculs conventionnels de rentabilité, et ce, à l'avantage du développement des algocarburants.

4.3 Analyse des aspects environnementaux et sociaux

La production et l'utilisation de l'énergie sont intimement liées au développement de l'activité humaine et ils produisent des effets environnementaux grandissants. Les développements au niveau du domaine névralgique de l'énergie peuvent produire des effets sur plusieurs plans de l'environnement et des sociétés. L'émergence des technologies de production algales, de masse peut éventuellement produire un changement historique des paradigmes agricoles et énergétiques.

4.3.1 Aspects environnementaux

Il y a des millions d'années les microalgues ont transformé l'atmosphère terrestre primitif pour le rendre viable. Il serait peut être possible d'utiliser à nouveau ce potentiel pour résoudre plusieurs des problèmes énergétiques et alimentaires actuels.

Plusieurs effets environnementaux positifs demeurent les principaux motivateurs pour le développement de cette filière. Ainsi, les procédés autotrophes permettent la réduction des émissions de GES émis par divers procédés industriels ou énergétiques et les variantes de culture en bassin représentent aussi un potentiel de capture du CO₂ atmosphérique. De plus, ces procédés exploitables sur des terres incultes ne nécessitent pas d'eau potable et sont capables d'assainir divers effluents en produisant plusieurs composés rentables. La capacité de produire à la fois des quantités massives de biocarburants et de protéines permettrait de faire baisser le prix des aliments et la pression qu'exercent les industries agroalimentaires et agroénergétiques sur les terres arables et les milieux naturels.

En général, le développement des biocarburants permet de limiter les déversements et la pollution inhérente au transport, à l'entreposage et à l'utilisation des produits pétroliers. De plus, les cultures algales présentent l'avantage d'être applicables en zones désertiques inhabitées et éloignées. Elles représentent donc un risque minime de nuisances pour les populations environnantes.

Toutefois, les principaux avantages associés à des alternatives considérées vertes ou à faibles impacts environnementaux peuvent aussi provoquer des réactions négatives.

Ainsi, les capacités de réductions d'émissions de GES de plusieurs variantes du concept algal risquent de cautionner la consommation massive de charbon et de gaz pour la production d'électricité et de pétrole synthétique. Paradoxalement, ces réactions pourraient nuire au développement des secteurs éoliens et de l'énergie solaire par exemple.

Cette voie reste encore subordonnée à l'utilisation des sources fossiles d'énergie, car il faut reconnaître que pratiquement tous les procédés autotrophes dépendent de source externes de CO₂ afin d'assurer l'atteinte de niveaux suffisants de productivité. Plusieurs compagnies proclament produire des biocarburants neutres sur le plan environnemental mais elles ne font que prolonger d'un cycle l'usage du CO₂ issu des sources fossiles avant de le relâcher dans l'air. Il faudrait que ces procédés puissent devenir assez efficaces pour exploiter le carbone du CO₂ atmosphérique pour vraiment devenir neutre sur le plan du carbone (Briggs, 2004).

Selon les dernières constatations environnementales et économiques, il apparaît raisonnable et prudent d'enrichir l'arsenal des technologies vertes avec les algocarburants. Les techniques de production de pétrole synthétique à base de gaz naturel, de sable bitumineux et de charbon se perfectionnent. Elles pourraient permettre l'émissions de GES, plusieurs siècles après le pic pétrolier et l'épuisement des sources conventionnelles de pétrole. Cette sombre perspective inquiète plusieurs chercheurs. Selon eux, elle renforce l'urgence de développer des technologies vertes afin d'offrir, le plus rapidement possible, des alternatives soutenables aux énergies fossiles conventionnelles et de synthèse (Farrell and Brandt, 2006).

Exploiter de grands bassins en zones chaudes pourrait, selon la pluviométrie locale, nécessiter des quantités massives d'eau pour compenser l'évaporation. L'utilisation d'eaux usées est une solution qui n'est pas toujours applicable parce que le contrôle de la chimie des substances dissoutes reste un défi.

Plusieurs compagnies développent des super microalgues par manipulations génétiques pour optimiser la productivité et leurs revenus (Sapphire Energy, 2008; Amyris, 2008; Solazyme, 2008). Ces OGM pourraient avoir des effets aux ramifications inconnues, potentiellement graves s'ils étaient relâchés en milieux naturels, comme dans la mer.

L'utilisation de fertilisants et de produits sanitaires est proposée afin de stimuler la productivité et de protéger la pureté des cultures. Mais à grande échelle, cela peut représenter des rejets de quantités massives de substances chimiques toxiques dans l'environnement (Briggs, 2004).

Il est aussi possible que le succès d'une telle généralisation du concept ne fasse diminuer les pressions nécessaires au délaissement des sources émettrices de carbone et ralentisse la transition vers d'autres modes écologiques de production d'énergie. Dépenser des milliards à chercher des alternatives basées sur la biomasse, sur le solaire ou l'éolien peut devenir moins intéressant quand, par exemple, des centrales au charbon équipées de systèmes de captation avec PBR peuvent être rendues deux fois moins polluantes en GES. De plus, les réserves connues de charbon et de gaz naturel sont massives et ils demeurent relativement bon marché (Farrell and Brandt, 2006).

4.3.2 Aspects sociaux

L'application massive des technologies algales permettrait d'augmenter sensiblement l'autonomie et la sécurité des secteurs énergétique et alimentaire dans le monde. Le développement du concept peut faire naître une nouvelle industrie créatrice d'emplois qui renforcerait l'économie et l'épanouissement social des communautés des pays producteurs. Par ailleurs, en plus d'ouvrir potentiellement la voie à la décentralisation de la production énergétique et alimentaire dans le monde, l'algoculture pourrait aussi favoriser l'augmentation des niveaux de vie et de démocratie dans plusieurs pays défavorisés.

Le maintien de prix acceptables ainsi que la création d'une certaine autonomie pour les carburants et les aliments de base sont des facteurs de sécurité et de bien-être qui peuvent favoriser la stabilité sociale et l'apaisement de certaines tensions géopolitiques. Les pays tropicaux pourraient profiter du potentiel optimal de productivité de leur territoire pour augmenter leur niveau de vie et les développements sociaux et culturels. Il est plausible que la généralisation de ce concept puisse, plus ou moins directement, aider à normaliser les mouvements migratoires de survie et leurs effets dans les pays d'origines et d'accueils.

Il est possible que nos sociétés modernes soient encore trop éblouies et contrôlées par les valeurs supportées par les marchés financiers, certaines industries et groupes d'intérêts puissants et qu'elles restent plus mieux disposées à favoriser les aspects économiques plutôt qu'environnementaux (Farrell and Brandt, 2006). Toutefois, il semble pointer une sensibilité accrue aux aspects technico-économiques, environnementaux et sociaux touchés par les GES. Cet éveil pourrait suffire à déclencher une transition massive vers de nouveaux concepts verts. La diffusion d'informations traitant des solutions développées et proposées pour faire face aux problèmes environnementaux peut contribuer à stimuler l'application de concepts durables comme celui des algocarburants. La motivation des responsables politiques par la population est indispensable, car le pouvoir reste ultimement sensible aux pressions sociales (Chapman, 2007).

En conclusion, l'application du concept répond au caractère urgent et global d'une transition des carburants fossiles vers des sources plus durables d'énergie. Les effets sociaux potentiels qui découleraient de son application semblent très positifs dans l'ensemble. Le concept des algocarburants reste encore mal reconnu par la population et son développement dépend beaucoup de sa diffusion. Ainsi, le niveau social, la dimension ultime du développement durable, représente probablement la source des impulsions qui peuvent stimuler la concrétisation de cette idée.

CONCLUSION

L'exploitation des ressources énergétiques fossiles est devenue problématique pour le maintien de l'équilibre environnemental mondial. Le pétrole facilement exploitable se raréfie et les effets négatifs des carburants fossiles sur l'environnement, la géopolitique, l'économie et l'équilibre social, sont grandissants. Ainsi, les recherches de solutions alternatives durables efficaces se sont accélérées mais la majorité des solutions s'avèrent limitées sur les plans qualitatifs et quantitatifs. Les filières alternatives agroalimentaires et forestières, par exemple, ne peuvent fournir qu'une fraction de l'insatiable demande en biocarburants sans provoquer des famines, déstabiliser les sols ou menacer la biodiversité.

En regard de cette situation, le concept algal, longtemps maintenu à un niveau théorique par la simplicité et la disponibilité des énergies fossiles, a émergé comme une solution alternative idéale et sans égal. Il a été démontré que le concept algal représente une méthode polyvalente et prometteuse de captation et de concentration d'énergie solaire et d'autres sources diffuses d'énergie. De plus, cette approche ne nécessite pas de terres arables ou de sources d'eau potable et elle peut aider à absorber le CO₂ issu de divers procédés tout en purifiant des eaux usées. La biomasse produite peut, selon les cas, être valorisée ou transformée en biocarburants et générer des protéines et d'autres produits plus rentables comme des nutraceutiques. Ce concept encore mal connu, suscite beaucoup d'intérêts et de questions quant à sa nature, à ses usages et à son niveau d'applicabilité; particulièrement en régions nordiques qui présentent plus de défis.

La description des caractéristiques des microalgues a permis de prendre la mesure du grand potentiel qu'elles offrent comme source énergétique alternative durable. Les niveaux de productivité, des cultures autotrophes de microalgues en biocarburant, sont plus de 10 fois supérieurs à ceux des cultures terrestres les plus performantes et les technologies hétérotrophes ont démontrés des performances de 500 à 1000 fois supérieures.

La grande diversité des microalgues a favorisé le développement de plusieurs grandes approches. L'étude des projets de productions d'algocarburants les plus prometteurs présentés a permis de constater l'existence d'une grande diversité dans les principaux modes d'applications et dans les technologies perfectionnées qui sont développées.

Ainsi, on a pu distinguer quatre grandes familles de technologies de production : avec organismes autotrophes en bassins et en photobioréacteurs (PBR), en bioréacteurs avec des organismes hétérotrophes ainsi que les systèmes hybrides.

Les systèmes hybrides semblent prometteurs et la plus grande part de la R-D concerne le développement de PBR. Mais, les projets de culture en bassins restent les plus près d'atteindre le niveau industriel. Il est apparu que plusieurs projets préparent l'usage d'OGM pour atteindre une rentabilité suffisante. De plus, pratiquement tous les projets semblent dépendre de sources externes auxiliaires de CO₂ pour stimuler la croissance des microalgues. Par ailleurs, l'étude des initiatives de R-D et des projets d'applications du concept en zones nordiques, révèle que ces projets sont peu nombreux et qu'ils rencontrent plusieurs difficultés techniques principalement liées aux températures moyennes relativement basses.

L'application du concept en zones froides reste problématique mais les concepts couverts étudiés évaluent les avantages de générer des coproduits plus rentables que les biocarburants. De plus, certains procédés hétérotrophes semblent présenter de meilleures options à ce jour. Aussi, la production de biohydrogène à partir de nouvelles souches de microalgues OGM très performantes, est particulièrement étudiée.

Un des principaux objectifs du travail est d'estimer le potentiel et l'applicabilité du concept d'algocarburants. Ainsi, au niveau de l'analyse, il ressort que le meilleur potentiel d'utilisation du concept d'algocarburants réside dans les secteurs des transports aériens et maritimes pour lesquels la voie électrique n'est pas encore possible. Dans l'ensemble, certains projets de production se révèlent techniquement avancés et plusieurs sont prometteurs. Toutefois, aucun ne produit encore de biocarburants à une échelle industrielle.

L'évaluation de l'applicabilité du concept fut effectuée par l'analyse des éléments relatifs aux niveaux technoscientifiques, économiques, environnementaux et sociaux. Il en est ressorti que le succès de l'application du concept énergétique algal dépend de plusieurs éléments. Ces éléments sont liés au choix des moyens mis en œuvre pour assurer le succès technique et ils sont aussi liés à plusieurs facteurs extérieurs, comme le climat et l'économie.

Alors, l'atteinte d'un seuil d'applicabilité suffisant ne serait pas encore acquise, car elle dépendrait de la conjonction de plusieurs conditions favorables dont les principales seraient :

- Un prix du baril de pétrole supérieur à 80 \$;
- La culture en zones tropicale ou sous des températures moyennes supérieures à 15° C;
- L'amélioration très significative de la productivité des microalgues (métabolisme plus efficace, taux de lipides supérieurs, résistances à l'oxygène et aux variations de température et un meilleur contrôle des microorganismes contaminants);
- L'utilisation de techniques en bassins optimisées ou avec des systèmes hybrides PBR et bassins. (Ils permettent d'allier les avantages et d'atténuer les faiblesses de chacun);
- Des méthodes de récoltes plus efficaces;
- Une main d'oeuvre compétitive et des sources locales de CO₂ et de nutriments;
- Des microalgues très productives. (Leur principale restriction est le manque d'exposition au CO₂ atmosphérique);
- Le développement de technologies permettant d'utiliser le CO₂ atmosphérique. (Ceci permettrait d'éviter la dépendance actuelle aux sources fossiles de CO₂).

En général, l'applicabilité du concept à l'échelle industrielle doit encore être démontrée. Elle dépend principalement de la découverte ou du développement de souches plus performantes et ce particulièrement pour les régions froides. En général, la rentabilisation des variantes autotrophes ou hétérotrophes du concept pourrait être facilitée en joignant aux procédés la purification d'effluents et la génération de coproduits plus rentable que les biocarburants. Toutefois, malgré de longues années de gestation et d'expérimentation encourageantes, l'application industrielle du concept reste particulièrement menacée par les variations de prix des produits pétroliers et l'avènement de pétroles synthétiques issus de sources fossiles abondantes et abordables comme le charbon et le gaz.

L'analyse des implications environnementales du concept algal a fait ressortir plusieurs points particuliers : il ne nécessite pas d'eau potable ou de terres arables, il peut absorber le CO₂ issu de procédés industriels, il offre la capacité de purifier divers effluents et ce concept présente aussi un moyen indirect polyvalent d'aider à protéger les écosystèmes menacés par la forte demande en terre cultivables, particulièrement celles situées sous les tropiques.

Aussi, plusieurs craintes émanent des dangers potentiels que pourraient représenter les OGM développés pour améliorer la rentabilité du concept. En particulier, le fait de relâcher des super microalgues dans les océans pourrait avoir des conséquences néfastes irréversibles à l'échelle globale. De plus, l'utilisation de quantités massives de fertilisants et d'algicides spécifiques, pour stimuler la productivité et protéger la pureté des cultures, peut représenter des risques substantiels de contamination de l'environnement.

Il est aussi envisageable que le succès éventuel de ce concept fasse ralentir le développement des autres sources durables d'énergie et qu'il serve de caution ou d'excuse pour accroître l'utilisation d'énergies fossiles génératrices de CO₂.

Plusieurs effets sociaux-économiques positifs pourraient découler du développement de projets industriels de culture algale comme : la création d'emplois, l'autonomie énergétique et accessoirement une meilleure sécurité alimentaire. Ces bénéfices peuvent avoir des effets conjugués positifs sur les niveaux de vie et le développement social dans divers pays, particulièrement ceux situés en zones chaudes et idéales pour la culture des microalgues.

Globalement, l'analyse indique que l'application industrielle du concept demeure un objectif vraisemblable à moyen terme en association avec le traitement d'eaux usées et à long terme avec des co-productions plus rentables. En général, la productivité devrait être encore améliorée d'au moins 50 % pour que le concept devienne compétitif avec le présent marché.

Ce travail pourra peut être participer, à sa mesure, à la diffusion et à la vulgarisation du concept des algocarburants en le situant dans la problématique énergétique et le paradigme du développement durable mondial.

Le concept algal répond au caractère urgent et global d'opérer une transition rapide des carburants fossiles vers des sources durables d'énergie. Cette transition s'inscrit au niveau d'une planification stratégique continentale ou globale à long terme mais la sensibilisation des pouvoirs politiques est nécessaire. Pour ce faire, les démarches entreprises au niveau social restent stratégiques pour motiver les gouvernements et les plus grandes entreprises à entreprendre les projets massifs (R-D et infrastructures) nécessaires à l'atténuation des GES tout en répondant à une part significatives des besoins mondiaux en carburants.

Enfin, la comptabilisation globale des avantages environnementaux, géostratégiques, et socio-économiques, pourrait probablement justifier l'application de certaines variantes du concept d'algocarburants malgré les problèmes de compétitivité présentés face au marché actuel. On connaît déjà leurs grandes aptitudes pour l'épuration d'eaux usées et de GES ainsi que leur capacité de pouvoir générer des engrais, des protéines, des nutraceutiques et plusieurs autres substances de valeur. Ultimement, il serait avantageux de développer les technologies algales ne serait-ce que pour explorer l'immense potentiel des milliers d'espèces de microalgues qui restent à découvrir.

RÉFÉRENCES

- ABO (Algal Biomass Organization) (2008). Environment & economic priorities. In Thomas Byrne, Byrne & Company, Ltd (editor). World experts and energy users join forces to harness huge potential of algae to address global energy. *Second annual Algae Biomass Summit*. Seattle, 23-24 octobre 2008 [En ligne]. <http://www.algalbiomass.org/resources/news.html> (Page consultée le 16 novembre 2008).
- Amos, W.-A. (2004). Updated Cost Analysis of Photobiological Hydrogen Production from *Chlamydomonas reinhardtii* Green Algae. Milestone Completion Report, NREL / MP-560-35593, 32 p., In Information Bridge. *DOE Scientific and Technical Information*, [En ligne]. <http://www.osti.gov/bridge/> (Page consultée le 19 mars 2009).
- Amyris (2008). About Amyris. In Amyris. *About*, [En ligne]. http://www.amyrisbiotech.com/index.php?option=com_content&task=section&id=5&Itemid=29 (Page consultée le 25 décembre 2008).
- APERe (Association pour la Promotion des Énergies Renouvelables) (2008). APERe, asbl, In APERe. *Biomasse*, [En ligne]. <http://www.apere.org/fr/er/biomasse.php#2> (Page consultée le 20 novembre 2008).
- ASPO International (Association for the study of peak oil) (2008). About-peak-oil. In ASPO International. *Peakoil.net* [En ligne]. <http://www.peakoil.net/about-peak-oil> (Page consultée le 20 novembre 2008).
- Barbosa, M.-J.-G.-V. (2003). *Microalgal photobioreactor : Scale-up and optimisation*. Thèse de doctorat, Wageningen University, Pays-Bas, 168 p., In Wageningen University Library. *Site de la Bibliothèque de l'Université Wageningen*, [En ligne]. <http://library.wur.nl/wda/dissertations/dis3423.pdf> (Page consultée le 29 octobre 2008).
- Becker, E.-W. (1994). *Microalgae: biotechnology and microbiology*, Ed. Baddiley, J. et al., Cambridge Univ. Press, Cambridge, New York, 293 p., In Google. *Books*, [En ligne]. http://books.google.ca/books?id=KAKx4I7NWEYC&printsec=toc&hl=fr&source=gbs_suummary_s&cad=0#PPA178,M1 (Page consultée le 20 novembre 2008).
- Benemann, J.-R. (2008). Open Ponds and Closed Photobioreactors – Comparative Economics. In Benemann Associates and Manager International Network on Biofixation of CO₂ 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_230p400pm/Benemann_Continental_A_Wed.pdf (Page consultée le 8 février 2009).

- Benemann, J.-R., NREL-AFOSR (2008). Overview : Algal oil to Biofuel. In Benemann Associates (éd.), *Algal oil for Jet Fuel Production*, Arlington, VA, USA, le 19 février 2008, NREL-AFOSR Workshop, [En ligne]. <http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/benemann.pdf> (Page consultée le 22 octobre 2008).
- Benemann, J.-R, Van Olst, J.C., Massingill, M.J., Weissman, J.C., Brune, D.-E. (2002). The Controlled Eutrophication Process and Agricultural Fertilizer Recycling, 6 p., In Site de l'Université du New-Hampshire, [En ligne]. http://www.unh.edu/p2/biodiesel/pdf/algae_salton_sea.pdf (Page consultée le 28 octobre 2008).
- Benemann, J.-R. and Oswald W.J. (1996). *Systems and Economic Analysis Of Microalgae Ponds for Conversion of CO2 to Biomass*, Final Report, Pittsburgh Energy Technology Center, 260 p. In DOE Scientific and Technical Information. *Information Bridge.*, [En ligne]. http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti_id=493389 (Page consultée le 7 février 2008).
- Berg-Nilsen, J. (2006). *Production of Micro algae based products*. In Nordic Innovation Center, Algetech Produkter AS, 28 p., [En ligne]. http://www.nordicinnovation.net/img/production_of_micro_algae-based_products_final_report.pdf (Page consultée le 20 février 2009).
- Blin, J. (2007). La biomasse - Source d'énergie. In Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2E Groupe EIER-ETSHER, CIRAD, [En ligne]. http://www.2ie-edu.org/j-energie/projet_bepita/activites_2ie_projet_bepita.pdf (Page consultée le 25 octobre 2008).
- Briggs, M. (2004). Widescale Biodiesel Production from Algae. In University of New Hampshire, Physics Department, [En ligne]. http://www.unh.edu/p2/biodiesel/research_index.html (Page consultée le 16 novembre 2008).
- Brown, L.-R. (2006). *Plan B 2.0: Rescuing a Planet Under Stress and a Civilization in Trouble*, W. W. Norton & Co., NY , 343 p., In Earth-policy.org. Books_[En ligne]. <http://www.earth-policy.org/Books/PB2/index.htm> (Page consultée le 16 mars 2008).
- Burlew, J.-S. (1953). *Algal Culture: From Laboratory to Pilot Plant*, Carnegie Institution Publication 600, Washington, D. C. 369 p., In Carnegie Institution Publications. *Carnegie Online*, [En ligne]. http://www.ciw.edu/publications_online/algal_culture/ (Page consultée le 4 novembre 2008).

- Campbell, M., N. (2008). Biodiesel: Algae as a Renewable Source for Liquid Fuel. *In* University of Guelph. *Engineering Journal*, (1), 2 - 7. ISSN: 1916-1107, [En ligne]. http://www.soe.uoguelph.ca/webfiles/gej/articles/GEJ_001-002-007_Campbell_Biodiesel_from_Algae.pdf (Page consultée le 28 février 2009).
- Carbon Trust (2008). About (the). *In* Carbon Trust. *About*, [En ligne]. <http://www.carbontrust.co.uk/about> (Page consultée le 28 janvier 2009).
- Carlsson, A.-S., Van Beilen J.-B, Möller, R. and Clayton, D. (2007). Micro and Macro-algae: utility for industrial applications. Realising the Economic Potential of Sustainable Resources – Bioproducts from Non-food Crops. *In* University of York. *EPOBIO : CPL CNAP Press, Berks*. Septembre 2007, [En ligne]. <http://www.epobio.net/pdfs/0709AquaticReport.pdf> (Page consultée le 28 février 2009).
- Cavalla, M. (2000). Les algues - Les microalgues, *In* Mcavalla.free.fr, [En ligne]. http://mcavalla.free.fr/rsr/Algues_operon.pdf (Page consultée le 3 novembre 2008).
- Chambers, N. (2008a). China Shows Green Aspirations With New Algae Biodiesel Facility. *In* Gas2.org. *Biofuel oil, a revolution*. 1^{er} octobre 2008, [En ligne]. <http://gas2.org/2008/10/01/chinese-algae-fuel-facility-to-make-ethanol-and-biodiesel/> (Page consultée le 17 janvier 2009).
- Chambers, N. (2008b). Solazyme-makes-first-algae-diesel-to-meet-strict-us-standard, *In* Gas2.org. *Biofuel. Oil. A revolution*, 2008/06/11, [En ligne]. <http://gas2.org/2008/06/11/solazyme-makes-first-algae-diesel-to-meet-strict-us-standard/> (Page consultée le 17 janvier 2009).
- Chapman, B. (2007). The social implications of decarbonising the New Zealand economy, *In* Victoria University of Wellington, Social Policy. *Journal of New Zealand. Issue 31*. 2009, [En ligne]. <http://www.msd.govt.nz/about-msd-and-our-work/publications-resources/journals-and-magazines/social-policy-journal/spj31/index.html> (Page consultée le 24 février 2009).
- Chevalier, P. et al. (2002). *Technologies d'assainissement et prévention de la pollution*, Sainte-Foy (Québec), Université du Québec - Télé-université, 440 p. (Collection Sciences de l'environnement).
- Christi, Y. (2008). Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *In* Massey University. School of Engineering. *Private Bag 11 222*. Palmerston North. New Zealand, [En ligne]. <http://www.massey.ac.nz/~ychristi/Trends08.pdf> (Page consultée le 7 février 2009).

- CIRAD (2007). Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, *In* CIRAD / Aquatrop, [En ligne]. <http://aquatrop.cirad.fr/> (Page consultée le 9 février 2009).
- Cornell, C. (2008). First Algae Biodiesel Plant Goes Online, *In* Gas2.org [En ligne]. <http://gas2.org/2008/03/29/first-algae-biodiesel-plant-goes-online-april-1-2008/1/comment-page-2/> (Page consultée le 7 décembre 2008).
- Coste, S. (2008). *III. Les algues*, *In* CIRAD. Ecofog, [En ligne]. <http://ecofog.cirad.fr/fr/enseignement/LicenceBGS/supports/Algues.pdf> (Page consultée le 28 octobre 2008).
- CRBM (Centre de recherche sur les biotechnologies marines de Rimouski) (2006). Étude d'opportunité des biotechnologies marines sur la production et l'utilisation des microalgues. Alain Guillou, 292 p., *In* Sodim.org, [En ligne]. http://www.sodim.org/pdf/710,86_Potentiel_microalgues.pdf (Page consultée le 15 mai 2008).
- Daigle, M. (2008). Carbon Algae Recycle System. *In* CRIQ. Innoventures Canada (I-CAN). Présentation BIOP 2008, Montréal, [En ligne]. <http://www.i-can.ca/uploads/files/CARS/Marc%20Daigle%20BIOP%202008.ppt> (Page consultée le 7 décembre 2008).
- Daniélo, O., (2005). Un carburant à base d'huile d'algue. *In* Greenfuelonline, [En ligne]. <http://www.greenfuelonline.com/> (Page consultée le 15 mai 2008).
- Davis, J. (2008). US-Brazilian Companies Team Up for Sugar Cane Biodiesel. *In* Domesticfuel.com, [En ligne]. <http://domesticfuel.com/2008/04/23/> (Page consultée le 17 janvier 2009).
- Dimitrov, K. (2007a). GreenFuel Technologies: A. Case Study for Industrial. Photosynthetic Energy. Capture.,. Brisbane, Australia. *In* Nanostring.net, [En ligne]. www.nanostring.net/Algae/CaseStudy.pdf (Page consultée le 20 octobre 2008).
- Dimitrov, K. (2007b). *GreenFuel Technologies: A Case Study for Industrial, Photosynthetic Energy Capture. Follow-up discussion*. *In* Nanostring.net, [En ligne]. <http://www.nanostring.net/Algae/CaseStudyFollowup.pdf> (Page consultée le 20 octobre 2008).

- Dyer, D.- L. and Richardson, D. E. (1961). Materials of Construction in Algal Culture. Space Biotechnology Section. The Martin Company. Denver. Colorado. 3 p. *In* NIH. *Pubmedcentral*, [En ligne]. <http://www.pubmedcentral.nih.gov/picrender.fcgi?artid=1057824&blobtype=pdf> (Page consultée le 22 octobre 2008).
- Ebert, J. (2008). Shell, Hawaii company team to grow algae for biofuel. *In* BBI International Media. *Biodiesel magazine.*, [En ligne]. <http://www.biodieselmagazine.com>, (Page consultée le 15 octobre 2008).
- Edwards, M. (2008). *Green Algae Strategy, End Biowar I and, Engineer Sustainable Food and Biofuels*. ISBN 978-0-6152-1217-3, Tempe, Arizona, LuLu Press, Rev. 3.7, 252 p. *In* Greenmasterminds.org, [En ligne]. <http://www.greenmasterminds.org> (Page consultée le 18 janvier 2009).
- États-Unis. DOE / EIA (2008). *International Energy Outlook 2008*, Energy Information Administration, Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy, Washington, DC 20585, 260 p. *In* DOE / EIA. *OIAF Index*, [En ligne]. [http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2008\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2008).pdf) (Page consultée le 14 septembre 2008).
- États-Unis. EIA -Energy information administration (2008). Projections by End-Use Sector and Country Grouping. *In* EIA. *Highlights - International Energy Outlook 2008 - Appendix F- Reference Case*, [En ligne]. <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html> (Page consultée le 16 novembre 2008).
- États-Unis. NREL (2008). *Directed Research and Development Program*. *In* NREL Laboratory Science and technology. *Site du NREL* [En ligne]. http://www.nrel.gov/biomass/proj_microalgae.html (Page consultée le 16 janvier 2008).
- États-Unis. NREL (1998). *A Look Back at the U.S.Department of Energy's Aquatic Species Program – Biodiesel from Algae. Close Out Report*, Juillet 1998. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, TP-580-24190, 328 p. *In* NREL. *Site du EERE*, [En ligne]. http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/biodiesel_from_algae.pdf (Page consultée le 3 novembre 2008).
- États-Unis. U.S. Climate Change Technology Program (2003). *Energy storage. Technology Options for the Near and Long Term, 1.3.4*, Novembre 2003, pp. 39-41, *In* U.S Climate Change Technology Program. *Librairie du site climatetechnology.gov*, [En ligne]. <http://www.climatetechnology.gov/library/2005/tech-options/tor2005-134.pdf> (Page consultée le 21 novembre 2008).

- Farrell, A. E. and Brandt, A. R. (2006). Risks of the oil transition. *In* University of California, Berkeley, CA 94720-3050, USA. *Energy and Resources Group*. Octobre 2006. [En ligne]. <http://www.stacks.iop.org/ERL/1/014004> (Page consultée le 19 février 2009).
- Fehrenbacher, K. (2008). Martin Tobias: The Fate of Next-Gen Biofuel Startups. *In* Earth2tech.com, [En ligne]. <http://earth2tech.com/2008/07/11/martin-tobias-the-fate-of-next-gen-biofuel-startups/> (Page consultée le 23 janvier 2009).
- Fontana, A. (2007). Les Techniques thermiques : Pyrolyse –Thermolyse et Gazéification. *In* Université Libre de Bruxelles – Solvay Business School – Centre Emile Bernheim, ULB. *CEB Working Paper N° 07/032*, [En ligne]. http://www.solvaymba.com/EN/Research/Bernheim/Pub_WorkingPapers.php#wp2007 (Page consultée le 11 février 2009).
- Fortenbery, T. R. (2005). Biodiesel Feasibility Study: An Evaluation of Biodiesel Feasibility in Wisconsin. *In* University of Wisconsin-Madison, Department of Agricultural & Applied Economics, [En ligne]. <http://www.aae.wisc.edu/pubs/sps/pdf/stpap481.pdf> (Page consultée le 7 février 2009).
- France. DIDD (Délégation interministérielle au développement durable de France) (2006). *Charbon propre mythe ou réalité ?*, 117 p. *In* Groupe de travail sur le charbon de la DIDD. *Traduction du document « Climate change, energy and sustainable development: How to tame King Coal ? »*, [En ligne]. <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/Charbonpropre22082006.pdf> (Page consultée le 16 novembre 2008).
- Fulton, L. (2004). *Biofuels for transport - An international perspective*, IEA (International Energy Agency), Paris, 216 p. *In* IEA, [En ligne]. <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/biofuels2004.pdf> (Page consultée le 14 septembre 2008).
- Golueke, C. G., Oswald, W. J. (1959). Biological Conversion of Light Energy to the Chemical Energy of Methane. *In* University of California, Berkeley, California Sanitary Engineering Research Laboratory, Department of Engineering. *ASM Journals*, [En ligne]. <http://aem.asm.org/cgi/reprint/7/4/219> (Page consultée le 7 novembre 2008).
- Green Fuel (2008). Project with Aurantia enters second phase at Spanish cement plant. *In* Green Fuel. *Greenfuelonline.com* [En ligne]. http://www.greenfuelonline.com/gf_files/GREENFUEL_AURANTIA.pdf, (Page consultée le 22 janvier 2009).

- Greene, N. (2004). *Growing Energy- How Biofuels Can Help End America's Oil Dependence*, Décembre 2004, New York City; Washington, D.C.; Los Angeles; and San Francisco, 86 p. In Natural Resources Defense Council. *Site de NRDC*, [En ligne]. <http://www.nrdc.org> (Page consultée le 22 octobre 2008).
- Hankamer, B.; Lehr, F.; Rupprecht, J.; Mussgnug, J. H.; Posten, C. and Kruse, O. (2007). Photosynthetic biomass and H₂ Production by Green Algae: In Bioengineering to Bioreactor Scale-Up. *Physiologia Plantarum*, Vol. 131, pp. 10-21., [En ligne]. http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/vsample?PISSN=0031-9317&path_ok=/journal/118510326/home (Page consultée le 14 février 2009).
- Hendrickson, G. and Ross, K. (2005). *The drive to efficient transportation - State policies to encourage the purchase and use of light-duty advanced technology vehicles and alternative fuels*, 109 p. In Alliance to Save Energy, Washington. *ASE.org* [En ligne]. www.ase.org (Page consultée le 21 novembre 2008).
- HR Biopetroleum (2008). *CoreTechnology*, [En ligne]. <http://www.hrbp.com/Technology/CoreTech.html> (Page consultée le 28 janvier 2009).
- Huang, G. -T. (2008). Investors Talk Biofuels Winners, Latecomers to the Party, and \$100 Billion Dollar Companies at Algae Biomass Summit. In Xconomy.com. *Author/Ghuang* [En ligne]. <http://www.xconomy.com/author/ghuang/> (Page consultée 14 janvier 2009).
- Hubbert, K., (1956). *Nuclear energy and the fossil fuels*, Shell, Texas. In Hubbertpeak.com. *Hubbert*, [En ligne]. <http://www.hubbertpeak.com/hubbert/1956/1956.pdf> (Page consultée le 20 novembre 2008).
- Huntley and Redalje (2004). CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change (2006), C. Springer, 2006, 36 p., In HRBP.com. *PDF library*, [En ligne] <http://www.hrbp.com/PDF/Huntley%20&%20Redalje%202006.pdf>. (Page consultée le 25 janvier 2009).
- I-Can (2008). A propos de Innoventure Canada. In Innoventure Canada. *Site de I-Can*, [En ligne]. http://www.i-can.ca/french/a_propos_i_can.htm (Page consultée le 14 décembre 2008).
- IPCC (2008). Global mean temperature data set by month at 0.5 degree for 1981-1990. In IPCC. *Data distribution centre*, [En ligne]. <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/> (Page consultée le 10 décembre 2008).

- JGI (2009). Why Sequence *Botryococcus braunii*? In DOE - Joint Genome Institute. Site du JGI, [En ligne]. <http://www.jgi.doe.gov/sequencing/why/bbraunii.html> (Page consultée le 28 février 2009).
- Jha, A. (2008). Carbon Trust launches £26m project to develop transport fuels made from algae by 2020 - UK announces world's largest algal biofuel project. In *The Guardian. Section environnement du site du Guardian*, [En ligne]. <http://www.guardian.co.uk/environment> (Page consultée le 13 janvier 2009).
- Kadam, K. L. (2001). Microalgae Production from Power Plant Flue Gas: NREL/TP-510-29417, Environmental Implications on a Life Cycle Basis, 63 p. In NREL. *Documents du site*, [En ligne] <http://www.nrel.gov/docs/fy01osti/29417.pdf> (Page consultée le 19 novembre 2008).
- Kho, J. A. (2008). *GreenFuel grows 100 square meters of algae*. In Greentechmedia.com. *Articles*, [En ligne]. <http://www.greentechmedia.com/articles/greenfuel-grows-100-square-meters-of-algae--5031.html> (Page consultée le 14 janvier 2009).
- Kodama, S. (2008). With Algae As Oil Source, Japan Could Be Energy Exporter. In *The Nikkei Business Daily. Nikkei news* [En ligne]. <http://www.nni.nikkei.co.jp/CF/FR/TNKS/nikkeinews.cfm?GenreID=1&PageSet=1> (Page consultée le 31 octobre 2008).
- Kok, B. and Businger, J. A. (1956). Kinetics of Photosynthesis and Photo-inhibition, B. & Nature 177, 135 - 136 , doi:10.1038/177135a0. In *Nature. Journaux.*, [En ligne]. <http://www.nature.com/nature/journal/v177/n4499/abs/177135a0.html> (Page consultée le 12 janvier 2009).
- Kok, B. (1957). Absorption Changes induced by the Photochemical Reaction of Photosynthesis. In *Nature* 179, 583 - 584; doi:10.1038/179583a0, [En ligne]. <http://www.nature.com/nature/journal/v179/n4559/abs/179583a0.html> (Page consultée le 12 janvier 2009).
- Koning, R. E. (1994). Cyanobacteria Slides. In University of Texas. *Plant Physiology Information Website*, [En ligne]. <http://www.bio.utexas.edu/research/utex/photogallery/Images/> (Page consultée le 15 septembre 2008).
- Konrad, T. (2007). The Energy Balance of Snake Oil. In *Altenergystocks.com. Archives*, [En ligne]. http://www.altenergystocks.com/archives/2007/07/the_energy_balance_of_snake_oil_1.html (Page consultée le 7 février 2008).

- La Monica, M. (2008). Algae-to-energy company GreenFuel replaces CEO. In cnet news.com. *Greentech*, [En ligne]. <http://news.cnet.com/greentech/?keyword=biodiesel> (Page consultée le 14 janvier 2009)
- Langlois, P. (2008). *Rouler sans pétrole* - Éditions Multi monde, Québec (Québec), 312 p.
- Lepisto, C. (2008). Chevron Backs Solazyme to Develop Algal Biodiesel Technology. In Tree hugger. *Science & Technology (alternative energy)*, [En ligne]. http://www.treehugger.com/files/2008/02/chevron_backs_solazyme.php (Page consultée le 24 mars 2008).
- Lindblad, P. (2005). *Bio Hydrogen Nordic Energy Research Program*, In Uppsala University, Suède. *Site de HFP Europe*, # 28-02, 20 p., [En ligne]. https://www.hfpeurope.org/uploads/1103/1596/BioHydrogen_LINDBLAD_TechDays05_051208.pdf (Page consultée le 25 novembre 2008).
- Martek (2008). Martek Biosciences corporation. In Martek. *Aboutmartek.martek.com*, [En ligne]. <http://aboutmartek.martek.com/researchanddevelopment/> (Page consultée le 14 octobre 2008).
- Mitchell, D. (2008). *A note on Rising Food Crisis*. In The World Bank. *Policy Research Group Working Paper No. 4682*. 21 p., [En ligne]. http://www.wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/IW3P/IB/2008/07/28/000020439_20080728103002/Rendered/PDF/WP4682.pdf (Page consultée le 11 octobre 2008)
- Morrison, C. (2008). Sapphire Energy gets “open checkbook” from investors for algae-based gasoline. In Venturebeat. *Morrison*, [En ligne]. <http://venturebeat.com/author/chris-morrison/> (Page consultée le 14 janvier 2009).
- Myers, J. and Graham, J. R. (1958). *On the mass culture of algae. ii. Yield as a function of cell concentration under continuous sunlight irradiance*. Departments of zoology and botany, University of Texas, Austin, [En ligne]. <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=541203> (Page consultée le 16 janvier 2009).
- NCAT (National Center for Appropriate Technology) (2008). *Biodiesel : The Sustainability Dimensions*. In National Center for Appropriate Technology, funded under a grant from the United States Department of Agriculture, (Editor) Cole Loeffler, [En ligne]. <http://www.attra.ncat.org/> (Page consultée le 12 février 2009).

- Norden (2009). Nordic Energy Research. *In* Norden, Stensberggata 25, NO-0170, Oslo. *Site de Norden*, [En ligne]. <http://www.nordicenergy.org:80/section.cfm?id=3-0&path=3,23> (Page consultée le 15 février 2009).
- NRC (National Research Council) (2007). Water Implications of Biofuels Production in the United States. *In* NRC. *Site du NRC*, [En ligne]. <http://nationalacademies.org/wstb> (Page consultée le 13 septembre 2008).
- OCDE-FIT (2008). Les défis du changement climatique - Messages clés. *In* Forum international sur les transports (premier), Session ministérielle, Leipzig, Allemagne, 28-30 mai 2008. *Site de l'OCDE*, [En ligne]. www.SourceOCDE.org (Page consultée le 13 septembre 2008).
- OCDE-IEA (2007). Synthèse - Biocarburants pour les transports : politiques et possibilités, [En ligne]. www.SourceOCDE.org (Page consultée le 16 novembre 2008).
- OECD-IEA (2007). Share of Total Primary Energy Supply in 2005. *In* IEA. *Statistiques*, [En ligne]. <http://www.iea.org/statist/29TPESPI.pdf> (Page consultée le 16 novembre 2008).
- OIAF-EIA-DOE (2008). International Energy Outlook 2008. *In* Energy Information Administration Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy, Washington, DC, Energy Information Administration. *Site de l'organisme*, [En ligne]. www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.htm (Page consultée le 16 novembre 2008).
- Olivier, M.J. (2002). *Chimie de l'environnement*. 4^e édition, Québec, Les productions Jacques Bernier, 301 p.
- Oyadomary, J. (2005). Algal images. *In* Keweenawalgae.mtu.edu [En ligne]. http://www.keweenawalgae.mtu.edu/ALGAL_IMAGES/ (Page consultée le 10 septembre 2008).
- Petrosun (2009). Algae-biofuels. *In* Petrosun. *Site de Petrosun* [En ligne]. <http://www.petrosuninc.com/algae-biofuels.html> (Page consultée le 23 janvier 2009).
- Pulz, O. (2007). Evaluation of GreenFuel's 3D Matrix Algae Growth , Engineering Scale Unit , APS Red Hawk Power Plant, AZ , June – July, 2007. *In* IGV Institut für Getreideverarbeitung GmbH, 14 p. *Site de Green Fuel*, [En ligne]. http://www.greenfuelonline.com/gf_files/Performance%20Summary%20Report.pdf (Page consultée le 14 mars 2009).

- Putt, R. (2007). *Algae as a Biodiesel Feedstock: A Feasibility Assessment*. In Center for Microfibrous Materials Manufacturing (CM3), Department of Chemical Engineering, Auburn University, Alabama, 47 p., [En ligne]. <http://www.eere.energy.gov/afdc/pdfs/algae.pdf> (Page consultée le 19 février 2009).
- Qin, J. (2005). *Bio - Hydrocarbons from Algae: impacts of temperature, light and salinity on algal growth*. In Project No. SQC-1, Rural Industries Research and Development Corporation. School of Biological Sciences Flinders University, Adelaide, 26 p. Site du RIRDC, [En ligne]. <http://www.rirdc.gov.au> (Page consultée le 18 février 2009).
- Racle, G. (2007). Ressources énergétiques fossiles où en sommes-nous?. In Site du journal L'Express, [En ligne]. <http://www.lexpress.to/archives/chronique/Économie/> (Page consultée le 13 septembre 2008).
- Riesing, T. F. (2007). Cultivating Algae for Liquid Fuel Production In [En ligne]. <http://www.permacultureactivist.net/> (Page consultée le 7 novembre 2008).
- Sapphire Energy (2008). The company, [En ligne]. <http://www.sapphireenergy.com/company> (Page consultée le 14 janvier 2009).
- Sapphire Energy (2009). *Alternative energy producer Sapphire Energy applauds stimulus bill passage*, February 17, 2009. In Sapphireenergy.com [En ligne]. http://www.sapphireenergy.com/press_release/10 (Page consultée le 20 février 2009).
- Sazdanoff, N. (2006). *Modeling and Simulation of the Algae to Biodiesel Fuel Cycle*. Honors Undergraduate Thesis, Department of Mechanical Engineering, Ohio State University, 67 p., [En ligne]. https://kb.osu.edu/dspace/bitstream/1811/5981/1/Modeling_and_Simulation_of_the_Algae_to_Biodiesel_Fuel_Cycle-Sazdanoff_undergrad_thesis.pdf (Page consultée le 28 février 2009).
- Schallenberg, C. (2008). The power of pond scum, In Site du journal Globe and mail [En ligne]. <http://globeandmail.com> (Page consultée le 23 septembre 2008).
- Schulz, T. (2006). *The economics of micro-algae production and processing into biodiesel*. Farming Systems, Department of Agriculture, Western Australia. 7 p. [En ligne]. http://159.207.224.130/content/SUST/biofuel/Algae_biodieselTSDec062.pdf (Page consultée le 17 février 2008).

- Schwartz, A. (2008). Solazyme Creates World's First Algae Jet Fuel. *In* Cleantechnica.com and alternative-fuels [En ligne]. <http://cleantechnica.com/category/alternative-fuels/Solazyme> (Page consultée le 14 janvier 2009).
- Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J., Roessler, P., NREL, (1998). Part II Technical review In A Look Back at the U.S.Department of Energy's Aquatic Species Program – Biodiesel from Algae. Close Out Report, Juillet 1998. *In* National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 328 p. *Site de EERE*, [En ligne]. http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/biodiesel_from_algae.pdf (Page consultée le 3 novembre 2008).
- Smith, D.-L. (2007). *Biofuel Crops Better Power Plants*. *In* McGill University, Plant science, Présentation Power point, 44 p. Site de Agriréseau, [En ligne]. http://www.agrireseau.gc.ca/energie/documents/Biofuel_crops.pdf (Page consultée le 17 janvier 2008).
- Solazyme (2008). About Solazyme - Metabolic-engineering, *In* Solazyme. About, [En ligne]. <http://www.solazyme.com/metabolic-engineering.shtml> (Page consultée le 17 janvier 2009).
- Solix (2007). Fueling a Better World. *In* NREL 20th Growth Forum. *Site de Solixbiofuels*, [En ligne]. <http://www.solixbiofuels.com/> (Page consultée le 16 janvier 2009).
- Song, V. (2008). Les algues comme carburant propre. *In* Planète verte, Sun Media, [En ligne]. <http://www.canoe.com/infos/environnement> (Page consultée le 7 décembre 2008).
- UMD, (Université of Maryland) (1992), Homepage of PAR Projet, [En ligne]. <http://www.atmos.umd.edu/~srb/par/Figure01.htm> (Page consultée le 2 février 2009)
- Van Baalen, C., Hoare D. S., Brandt, E. (1970). Heterotrophic Growth of Blue-Green Algae in DimLight, *In* University of Texas, Marine Science Institute Port Aransas, Texas. *NIH Pubmedcentral*, [En ligne]. <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=248487> (Page consultée le 16 novembre 2008).
- Van Harmelen, Toon and Oonk, Hans (2006). *Microalgae biofixation processes : Applications and Potential Contributions to Greenhouse Gas Mitigation Options*. *In* International Network on Biofixation of CO2 and Greenhouse Gas Abatement with Microalgae, International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme. 45 p. *Site de Algalbiomass.org* [En ligne]. <http://www.algalbiomass.org/resources/documents/MicroalgaeBiofixationProcessesTNOReportvAug06.pdf> (Page consultée le 12 février 2009).

- Wang, U. (2009). Solazyme Explores Jet-Fuel Market. *In* Greentechmedia. *Articles du site* [En ligne]. <http://www.greentechmedia.com/articles/solazyme-explores-jet-fuel-market-1381.html> (Page consultée le 18 janvier 2008).
- Weissman, J.C. and Goebel, R.-P. (1987). Design and analysis of microalgal open pond systems for the purpose of producing fuels: A subcontract report. *In* US DOE- SERI. Site du NREL, [En ligne]. <http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/2840.pdf> (Page consultée le 5 janvier 2009)
- Weissman, J.C. and Tillett, D.T. (1992). Design and operation of an outdoor microalgae test facility : large-scale system results. *In* EERE, FY 1989-1990, *Aquatic Species Project Report*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, NREL/MP-232-4174, pp 32-56. , [En ligne]. http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/biodiesel_from_algae.pdf (Page consultée le 3 novembre 2008).
- Wikipedia (2008). *Algae*. *In* Wikipedia. *Site de Wikipedia*, [En ligne]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Algae> (Page consultée le 19 décembre 2008).
- Wikipedia (2009a). *Canne à sucre*. *In* Wikipedia. *Site de Wikipedia*, [En ligne]. http://fr.wikipedia.org/wiki/Canne_à_sucres#Culture.mht (Page consultée le 5 janvier 2009).
- Wikipedia (2009b). *Biological hydrogen production*. *In* Wikipedia. *Site de Wikipedia*, [En ligne]. http://en.wikipedia.org/wiki/Biological_hydrogen_production (Page consultée le 14 mars 2009).
- Willson, B. (2008). *Low Cost Photobioreactors for Algal Biofuel Production & Carbon Capture*. *In* Solix Biofuels - Colorado State University, 2nd Bundes-Algen-Stammtisch, Hamburg, 9 octobre 2008, [En ligne]. <http://www.mstonline.de/mikrosystemtechnik/mst-fuer-energie/algen/presentation/willson.pdf> (Page consultée le 8 février 2009).
- Xiong, W. & Li, X. & Xiang, J. & Wu, Q., (2008). High-density fermentation of microalga *Chlorellaprotothecoides* in bioreactor for microbio-diesel production. *In* Applied Microbiology - Biotechnology, 78:29–36, DOI 10.1007/s00253-007-1285-1, 8 p. *Site de Springer*, [En ligne]. <http://www.springerlink.com/content/l72736647t07k765/> (Page consultée le 14 novembre 2008).

Xu, H., Miao, X. and Q. Wu., (2006). High Quality Biodiesel Production from a Microalga *Chlorella protothecoides* by Heterotrophic Growth in Fermenters. *In* Journal of Biotechnology, Vol. 126, pp.499-507, [En ligne]. http://www.find-health-articles.com/rec_pub_16772097-high-quality-biodiesel-production-microalga-chlorella-protothecoides.htm (Page consultée le 20 novembre 2008).

ANNEXE 1
BIBLIOGRAPHIE

- Biofuels digest (2008). Articles *In* biofuelsdigest, Database, [En ligne]. <http://biofuelsdigest.com> (Page consultée le 10 novembre 2008)
- CCE (Commission de coopération environnementale) (2007). *Premier rapport sur la pollution atmosphérique provenant de plus d'un millier de centrales alimentées par des combustibles fossiles en Amérique du Nord*. In Trio - Revue de la CCE, numéro : Hiver 2004-2005, [En ligne]. <http://www.cec.org/trio/stories/index.cfm?varlan=français&ed=14&ID=159> (Page consultée le 16 novembre 2008)
- Cozijnsen, J. (2008). *Analysis of the EU CO2 Market*, [En ligne]. www.co2prices.eu (Page consultée le 18 octobre 2008).
- États-Unis. Hannan, P. J. and Patouillet, C. (1963). *Gas Exchange with Mass Cultures of Algae*. IL. Reliability of a Photosynthetic Gas Exchanger, U.S. Naval Research Laboratory, Washington, D.C., 27 May 1963, [En ligne]. <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1058024> (Page consultée le 20 octobre 2008)
- Larson, K.-D. and al. (1993). *Initiation à la comptabilité financière*. Cinquième édition française. University of Texas at Austin, Ed. Richard D. Irwin, Homewood, IL, 1046 p.
- Talpalariu, D. (2008). *Chinese Develop Algae Biodiesel Company - Petro Sun helps China go green*. In Softpedia, Science Editor, [En ligne]. <http://news.softpedia.com/cat/Science/Nano-Biotechnology/> (Page consultée le 20 octobre 2008)
- Wikipedia (2008). *Electric car*, [En ligne]. http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car (Page consultée le 21 novembre 2008)