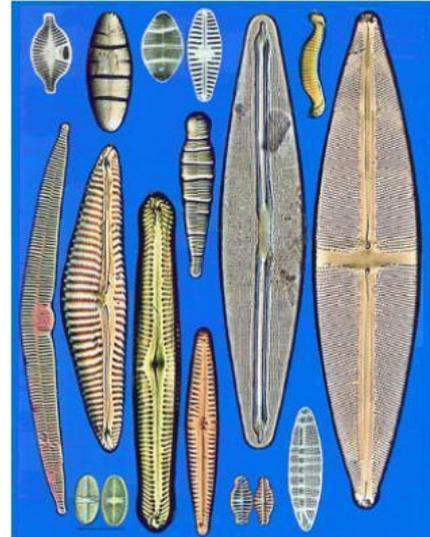


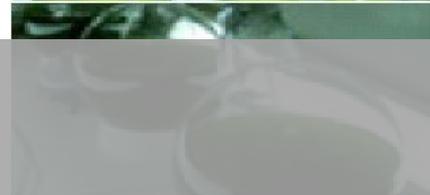
ALBOUSSIÈRE Marie-Charlotte

DARRIEUS Marie

GANTE Camille



ALGOCARBURANTS : UNE FILIÈRE D'AVENIR ?



Sommaire

Introduction.....	3
Partie 1 : Biocarburants à partir de micro-algues : un domaine prometteur	4
1.1 La production de biodiesel à partir de l'huile végétale	4
1.2 Valeurs ajoutées des microalgues par rapport aux autres filières de production de biodiesel	5
1.3 Les dispositifs de production de micro-algues.....	10
Partie 2 : L'état actuel des différents projets dans le monde.	14
2.1 Les Etats-Unis : le NREL et GreenFuel Corporation.....	14
2.2 L'Espagne et BioFuel Systems	16
2.3 Israël et Seambiotic.....	17
2.4 La France et le projet Shamash.....	18
Partie 3 : rentabilité économique et les freins à lever.....	19
3.1 Rentabilité économique des algocarburants.....	19
3.2 Les verrous à lever	20
Conclusion	22
Bibliographie.....	23
Annexe 1 : comparaison des coûts entre les systèmes raceway et photobioréacteur	24
Annexe 2 : analyse économique de la filière.....	25
Annexe 3 : Quel potentiel réellement disponible pour la production de micro-algues ?.....	26

Introduction

Les algocarburants sont des agrocaburants de la famille des biodiesels. Présentés comme étant des agrocaburants de « troisième génération », ils sont produits à partir de micro-algues à haute teneur en lipides.

À la fin du XIXe siècle, Alexandre Saint-Yves d'Alveydre fut le précurseur de l'utilisation des algues à l'échelle industrielle : il entreprit la mise au point d'application industrielle de plantes marines, mais mit fin à ses essais, faute de capitaux. Après le premier choc pétrolier de 1973, les États-Unis se sont penchés sur les possibilités que les algues pouvaient offrir : plusieurs laboratoires ont étudié le phytoplancton qui contient les micro-algues, pour sélectionner les spécimens les plus prometteurs. Ces recherches ont abouti à une impressionnante littérature scientifique, mais à peu d'applications concrètes, car le prix du baril de brut a, entre-temps, chuté à 20 dollars. Cependant, aujourd'hui, les cours du pétrole flambent de nouveau, provoquant un regain d'intérêt pour les techniques utilisant des ressources différentes.

Le nombre d'espèces de micro-algues est estimé entre 200.000 et plusieurs millions, un chiffre impressionnant par rapport aux quelques 250.000 espèces de plantes supérieures recensées! De plus, les inconvénients des biocarburants à base de végétaux terrestres sont plus nombreux qu'on ne le croit : les émissions de gaz à effet de serre, l'acidification des écosystèmes, l'eutrophisation des eaux, la toxicité des pesticides, la consommation d'eau, l'érosion des sols, la perte de biodiversité et l'intensification de l'agriculture sont autant de facteurs à prendre en compte. Les algocarburants présentent en outre l'avantage de ne pas entrer en compétition avec les cultures destinées à l'alimentation. C'est pourquoi les chercheurs et quelques industriels se tournent actuellement vers ces biocarburants dits « de troisième génération ».

Après une présentation de la production de carburant à partir d'algues et un état des lieux de l'avancée des recherches dans ce domaine au niveau mondial, les enjeux économiques seront abordés, ainsi que les verrous à lever, tant au niveau technique que politique pour que les algocarburants deviennent les carburants de demain (ou après-demain).

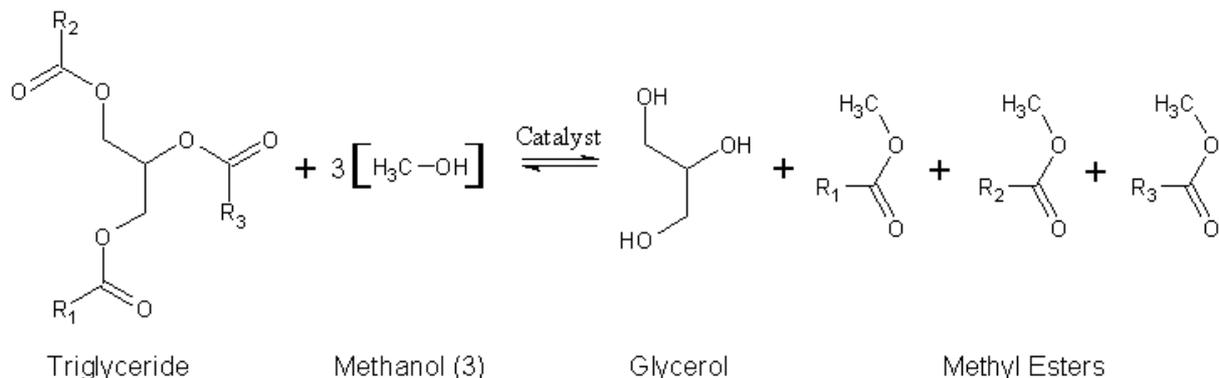
Nous remercions Olivier Bernard & Jean-Pierre Cadoret, coordinateurs du projet Shamash pour leur aide et les documents fournis.

Partie 1 : Biocarburants à partir de micro-algues : un domaine prometteur

1.1 La production de biodiesel à partir de l'huile végétale

L'huile végétale issue de la production de micro-algues n'est pas utilisable directement en tant que carburant. Avant de se concentrer plus précisément sur les algocarburants, intéressons nous au procédé chimique qui permet de transformer l'huile végétale en carburant, ici du biodiesel. Cette partie du procédé n'est pas spécifique aux algocarburants, elle a déjà été largement éprouvée pour transformer les huiles végétales issues du maïs, du soja, du jatropha, du palmier à huile,... Les huiles végétales ne sont pas utilisables directement comme carburant car elles sont trop denses. L'objectif de la transestérification est de réduire la densité du biodiesel.

Le processus chimique de base consiste en une estérification des triglycérides (molécules comportant 3 fonctions esters) contenus dans l'huile végétale en présence d'un alcool (on utilise généralement le méthanol car il est meilleur marché). Cette réaction produit du glycérol (triple alcool), et de méthyl-esters, c'est à dire du biodiesel, le produit qui nous intéresse. On peut remarquer que le résultat de cette réaction est de séquencer un triple-ester (plus gros) en esters plus petits et plus légers. Partant d'une huile dont la densité moyenne observée est de l'ordre de 0,912 kg/l (pour les micro-algues), on obtient par ce procédé du biodiesel dont la densité est de 0,864 kg/l¹ qui se conforme aux standards internationaux de l'ASTM² (entre 0,860 et 0,900 kg/l).



Réaction de transestérification : des triglycérides au biodiesel

(R1, R2, R3 sont des chaînes hydrocarbonées)

Les quantités stoechiométriques de la réaction indiquent qu'il faut fournir 3 moles de méthanol pour chaque triglycéride, ce qui conduira à la production de 3 méthyl-esters. Cependant, comme l'indique la double flèche, cette réaction est limitée, il s'agit d'un équilibre. Toute la quantité de triglycérides ne réagira pas : si on attend que l'équilibre s'établisse, on trouvera que seul 67% de la quantité initiale de triglycérides aura réagi pour produire des méthyl-esters, les 33% restent sous forme de triglycérides. Pour déplacer l'équilibre vers la droite (ie vers la formation de biodiesel), on utilise le méthanol en large excès dans le mélange réactif : les processus industriels utilisent 6 moles de méthanol pour chaque mole de triglycéride. Une solution encore plus élaborée consiste à éliminer le

1 X. Miao, Q. Wu / *Bioresource Technology* 97 (2006) 841–846

2 American Society for Testing and Materials

glycérol qui se forme au cours de la réaction, mais ce procédé plus perfectionné est également plus coûteux.

Pour limiter les pertes de production, il faut également s'assurer que les triglycérides et le méthanol sont bien secs. En effet, la présence d'eau, conduirait à une hydrolyse des esters par la réaction de saponification : nous obtenons alors du savon à la place du biodiesel !

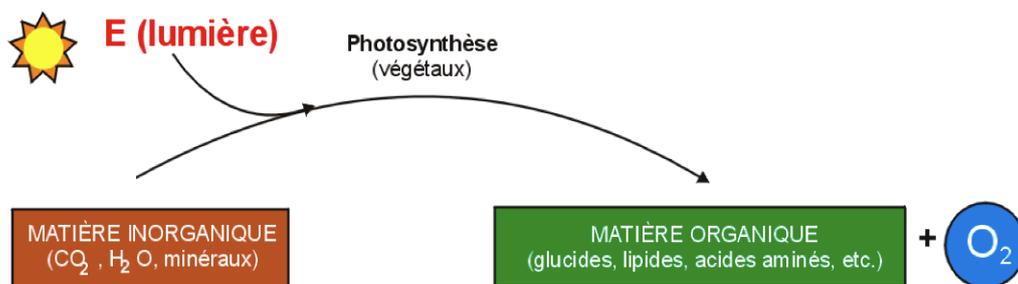
Cette réaction étant assez lente, elle est conduite en présence de catalyseurs comme l'hydroxyde de sodium ou de potassium. Elle est réalisée à une température de 60C, sous pression atmosphérique. Dans ces conditions, la réaction aura atteint son avancement maximal au bout de 90 minutes et la quantité de méthyl-esters en présence sera de l'ordre de 98% en masse. Le biodiesel est ensuite lavé pour éliminer le glycérol et le méthanol.

1.2 Valeurs ajoutées des microalgues par rapport aux autres filières de production de biodiesel

Intéressons nous maintenant aux potentialités intrinsèques des micro-algues quant à la production lipidique, c'est à dire l'étape qui précède la transformation de l'huile végétale en biodiesel. Nous essaierons autant que possible de dégager les caractéristiques et atouts de la filière micro-algues comparativement aux autres filières de production de biodiesel telles que le colza, le soja, le palmier à huile, ou de bioéthanol comme le maïs ou la canne à sucre.

1.2.1 Un rendement photosynthétique élevé qui se traduit par une forte teneur en lipides

Le rendement photosynthétique est une notion primordiale dans une perspective de valorisation de l'énergie absorbée par les micro-algues. Il correspond au rendement de la réaction de photosynthèse que nous exposons volontairement de façon très schématique et simplifiée : $hv + CO_2 \rightarrow MO + O_2$



Le rendement photosynthétique correspond au ratio entre l'énergie stockée dans la plante et l'énergie lumineuse incidente E. D'après les travaux de Benemann (1997), il faudrait théoriquement 8 moles de photons pour fixer une mole de CO₂ par la réaction de photosynthèse. Ses travaux expérimentaux montrent qu'il faudrait en réalité 10 moles pour une mole de CO₂. On peut expliquer ce supplément de 2 moles par les besoins autres de la cellule et des pertes incompressibles. En considérant qu'une mole de carbone contenue dans la cellule représente une énergie de l'ordre de 450 kJ et qu'une mole de photon (dans le rayonnement visible capté par les récepteurs des photosystèmes) correspond à une énergie de l'ordre de 200 kJ, on obtient un rendement de l'ordre de 22%. Si on prend de plus en compte le fait que seuls 45% du spectre solaire est utilisable par les

systèmes photosynthétiques, on tombe à un rendement maximal de 10%.Ce rendement théorique est supérieur à celui des végétaux supérieurs, situé entre 6% et 7%. Toutefois la différence n'est pas énorme...

Le principal atout réside dans le fait que la majeure partie de l'énergie stockée dans les algues est sous forme de lipides qui sont quasiment directement utilisables comme carburant. Alors que pour les végétaux supérieurs, une bonne partie de l'énergie est stockée sous forme de molécules lignocellulosiques qui ne peuvent pas être utilisées directement comme carburant.

En règle générale, on observe pour la majorité des micro-algues des contenus en huile de l'ordre de 20 à 50% en masse sur matière sèche. On remarque que cette proportion peut être extrêmement variable pour une même variété d'algue. Il est en effet possible d'améliorer la teneur en lipides en optimisant les conditions de culture des micro-algues. On peut ainsi se rapprocher du rendement maximum de 10% plus facilement que pour des végétaux terrestres car l'optimisation des conditions est mieux maîtrisée pour les micro-organismes en phase liquide (par exemple apports en CO₂, en azote,...). Sous certaines conditions expérimentales, des teneurs en huile végétale ont atteint des valeurs record de 80% en masse sur matière sèche pour certaines variétés d'algues (Metting 1996, Spolaore et al. 2006).

	Contenu maximum en lipides (% poids sec)
<i>Botryococcus braunii</i>	29-75
<i>Chlorella protothecoides</i>	15-55 ¹
<i>Cyclotella DI-35</i>	42
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	71.4 ²
<i>Hantzschia DI-160</i>	66
<i>Isochrysis sp.</i>	7-33
<i>Nannochloris</i>	6-63
<i>Nannochloropsis</i>	31-68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35-54
<i>Nitzschia sp</i>	45-50
<i>Phaeodactylum tricorutum</i>	31
<i>Pleurochrysis carterae</i>	32-35 ³
<i>Scenedesmus TR-84</i>	45
<i>Stichococcus</i>	9-59
<i>Tetraselmis suecica</i>	15-32
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	21-31 ⁴

Ce point est donc un enjeu majeur de la recherche sur les micro-algues. En conditions de stress, par exemple suite à une carence en azote, la teneur lipidique des micro-algues est fortement augmentée, ce qui correspond à un mécanisme d'auto-défense. Cependant ce stress imposé doit être contrôlé et limité dans le temps, car freine la croissance de façon importante, et une fois l'adaptation au stress dépassée, les réserves de lipides seront reconsommées. L'objectif de l'optimisation est donc de trouver un compromis entre stimulation de la croissance et augmentation de la teneur en lipides.

Une méthode envisageable serait d'envisager la culture des micro-algues en deux étapes : une première phase de croissance dans des conditions optimisées en bioréacteur et une seconde phase courte où les algues seraient soumises à une carence en azote afin d'augmenter leurs stocks en lipides.

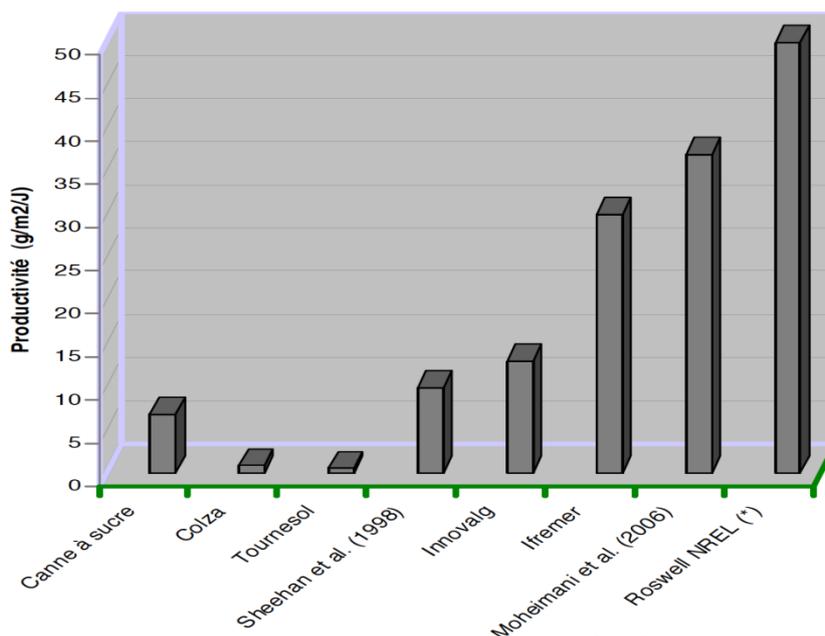
1.2.2 Taux de croissance record

Le taux de croissance des micro-algues, bien que très variable selon les types d'algues, atteint des valeurs records. Dans des conditions optimales l'espèce d'algues *Chlamydomonas reinhardtii* est capable de doubler sa biomasse, en l'espace d'un peu plus de 4 heures.

	Taux de croissance maximum (J ⁻¹)	Temps de doublement (Jour)
<i>Botryococcus braunii</i>	0.2	3.4
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	3.8	0.18
<i>Chlorella vulgaris</i>	1.84	0.37
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	3.5	0.2
<i>Isochrysis galbana</i>	2.0	0.34
<i>Navicula muralis</i>	2.63	0.26
<i>Pleurochrysis carterae</i>	0.65	1.1
<i>Rhodomonas salina</i>	0.6	1.15
<i>Spirulina platensis</i>	0.5	1.38
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	2.48	0.27

Ces résultats sont à prendre avec précaution car il s'agit d'expériences menées en laboratoire dans des conditions optimales. Toutefois, des expériences conduites en extérieur par Sheenan en 1998, révèlent des taux de croissance de 1,46 /jour, ce qui correspond à plus de deux doublement par jour.

Ces forts taux de croissance se traduisent par de fortes productivités à l'hectare, comparativement aux autres productions telles que le colza, le tournesol ou même la canne à sucre.



Cette croissance rapide a de plus l'avantage de permettre une récolte en continu alors que ce n'est pas le cas pour des cultures saisonnières comme le colza, le soja, le tournesol.

1.2.3 Pas de compétition pour l'usage des sols

Le graphique ci-dessus montre qu'en dehors d'une productivité journalière importante, les micro-algues permettent de satisfaire un ratio entre quantité d'huile produite et surface nécessaire à la culture assez performant comparativement aux autres cultures. Ceci est également un atout de poids en raison de la compétition féroce pour l'usage des sols qui, sous la pression d'une démographie

croissante, doivent satisfaire à la fois les besoins alimentaires, les services écologiques indispensables, les besoins énergétiques (biocarburants), tout en assurant la reproductibilité du capital écologique (développement durable).

Une étude basée sur les Etats-Unis s'est intéressée à la capacité de différents biocarburants à répondre aux besoins énergétiques actuels. En partant de l'hypothèse qu'il faudrait 530 millions de m³ de biodiesel pour remplacer la quantité annuelle de carburants utilisés dans le transport aux Etats-Unis, on estime la surface de culture correspondante nécessaire en fonction des différentes filières biocarburants.

Culture	Production d'huile (L/ha)	Surface de culture (Mha)	Pourcentage de la surface agricole des Etats-Unis ³
Maïs	172	1540	846
Soja	446	594	326
Colza	1190	223	122
Jatropha	1892	140	77
Noix de coco	2689	99	54
Huile de palme	5960	45	24
Micro-algues à 70% de lipides sur poids sec	136900	2	1,1
Micro-algues à 30% de lipides sur poids sec	58700	4,5	2,5

Ainsi, pour la plupart des cultures (maïs, soja, jatropha, cocotier), il faudrait consacrer plus de la moitié (voire même beaucoup plus) des terres agricoles des Etats-Unis pour satisfaire seulement la moitié de la consommation en carburant dans le transport. Même le palmier à huile, pourtant reconnu pour ses hauts rendements en huile végétale, nécessiterait que la moitié des terres agricoles soient consacrées à sa culture pour remplir les besoins en carburant dans le transport. Cela montre que ces filières ne pourront jamais à elles seules être des solutions de substitution pour le pétrole.

En revanche, la potentialité des micro-algues est à remarquer : entre 1 et 3% des terres agricoles permettraient de satisfaire la moitié des besoins en carburant pour le transport. La production d'huile donnée ici correspond à des valeurs extrapolées à partir de mesures en bioréacteur. Actuellement, on observe en extérieur des productions qui atteignent 80% de la valeur indiquée dans le tableau pour les micro-algues. Cela reste toutefois un potentiel intéressant.

1.2.4 Compétition moindre pour l'usage de l'eau

L'eau de mer et l'eau douce peuvent être utilisées indifféremment selon le type d'algues cultivées. L'avantage des micro-algues est que leur culture est possible (voir même optimisée pour certaines algues) en eau de mer, ce qui éviterait une pression supplémentaire sur l'eau douce, enjeu majeur d'un développement soutenable.

³ Pour satisfaire 50% des besoins en carburant pour le transport aux Etats-Unis
Source : Y. Chisti, Biotechnology Advances

Ces algues n'étant pas destinées à l'alimentation, il est également possible d'utiliser des eaux usées pour leur culture, ce qui est doublement avantageux :

- d'une part cela évite une consommation non-soutenable d'eau douce
- d'autre part, les eaux usées sont riches en nitrates, nutriment indispensable à la croissance des algues

1.2.5 Pas de compétition alimentaire

A la différence des produits issus de la culture du palmier à huile, du maïs, soja, l'huile produite à partir de micro-algues n'est pas un produit alimentaire. Il n'y a donc pas un risque direct de déstabilisation des prix des produits agricoles suite à une forte variation du cours du marché énergétique, évitant ainsi le risque d'une vaste crise alimentaire qui toucherait en premier lieu les pays du tiers-monde.

1.2.6 De multiples possibilités de production intégrée

De nombreuses possibilités sont aujourd'hui envisagées pour coupler le circuit de production de micro-algues à d'autres systèmes. Ceci dans une perspective de valorisation de la filière, autant du point de vue coût que du point de vue écologique.

■ Couplage avec un émetteur de CO₂ en entrée

Depuis que les émissions anthropiques de CO₂ ont été reconnues comme facteur clé du changement climatique, les solutions de stockage du CO₂ ont été envisagées sérieusement. La capacité des micro-algues à fixer du CO₂ de manière relativement maîtrisée fait partie des solutions de captation envisagées. D'après les résultats de Chisti, confirmés par d'autres études, la production d'1kg de biomasse correspond à 1,8kg de CO₂ fixé. Alimenter l'usine de production de micro-algues directement en CO₂ par une centrale à charbon voisine, est donc une solution potentiellement intéressante pour améliorer les gains.

■ Recyclage des eaux usées

Les eaux usées issues de stations d'épurations ou d'activités d'élevages sont riches en nutriments azotés, favorables à la croissance des algues. Par ailleurs, le traitement des nitrates en station d'épuration est un véritable problème car il est complexe et surtout coûteux. Un système où les eaux usées alimentent la production de micro-algues et qui restitue les eaux nettoyées des composés azotés est un couplage très intéressant.

■ Récupération des produits de méthanisation de la biomasse

En condition anaérobie, ie en l'absence d'oxygène, la respiration de la biomasse produit du méthane. Ce biogaz pourrait être récupéré et utilisé pour produire de l'énergie qui alimenterait en énergie l'industrie de micro-algues. Cela tendrait à améliorer notamment le bilan carbone, et à le rapprocher du « bilan carbone neutre » annoncé pour les biocarburants.

■ Recyclage des tourteaux

Les tourteaux de pressage qui résultent de l'extraction de l'huile dans les micro-algues pourraient être recyclés en aliment pour le bétail ou les poissons, ou même en engrais car ce sont des produits riches en engrais.

1.3 Les dispositifs de production de micro-algues

1.3.1 Eléments nécessaires pour la culture

Les conditions optimales de culture des micro-algues se situent autour de températures comprises entre 20 et 30 C.

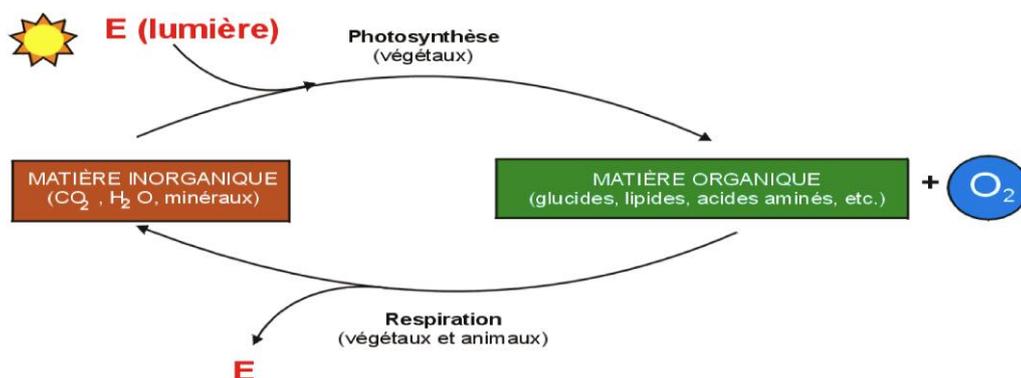
Les éléments indispensables à la croissance sont, outre la lumière de soleil, le CO₂, de l'azote et du phosphore. Les apports de ces nutriments sont évalués en fonction de la formule moléculaire « moyenne » des micro-algues : CO_{0,48}H_{1,83}N_{0,11}P_{0,01}. Dans les processus industriels, le phosphore est apporté en excès pour compenser les pertes dues à la formation de complexes avec les ions métalliques.

Comme nous l'avons vu précédemment l'objectif est d'optimiser les conditions de culture pour favoriser un taux de croissance maximum des cellules tout en assurant une forte teneur en lipide. C'est le produit de ces deux objectifs qui doit être maximisé.

Les procédés industriels doivent prendre en compte l'influence majeure des deux paramètres clés que sont l'intensité lumineuse et la température. La réussite des procédés de production dépendra en particulier de leur capacité à maîtriser les phénomènes suivants :

■ La respiration

La production lipidique des micro-algues ne peut se faire qu'en présence de lumière. Non seulement, elle cesse la nuit, mais on estime que 25% de la biomasse produite pendant le jour vont être consommés la nuit pour satisfaire les besoins en énergie de la cellule. Ce phénomène, appelé respiration, restitue à la cellule l'énergie emmagasinée pendant la journée, consomme du O₂ et produit du CO₂.

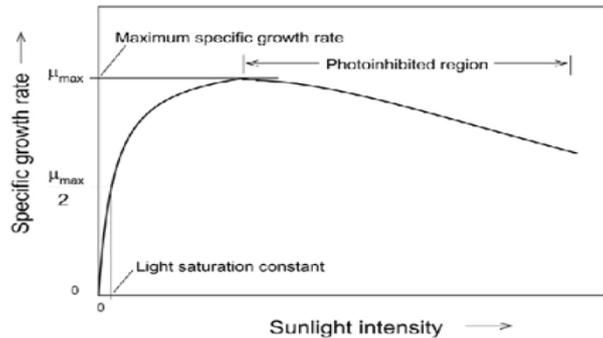


L'ampleur du phénomène de respiration dépend en particulier de la température pendant la journée et pendant la nuit. Un des enjeux de la production de micro-algues est donc de maximiser la production de matière organique lipidique par la photosynthèse, mais également de **limiter la dégradation de cette matière organique par respiration** sous peine d'annuler voire même d'aggraver le bilan de l'opération :

–dégradation de l'énergie potentiellement produite (consommation des lipides au profit de la cellule)

_dégazement de CO_2 qui annihilerait le bénéfice de la fixation du CO_2
 –dans le cas d'un milieu mal oxygéné (conditions anaérobie), il se produit un dégazage de méthane CH_4 , gaz à effet de serre dont le pouvoir radiatif est 25 fois plus important que celui du CO_2 . Le bilan carbone en serait donc aggravé...

■ La saturation en intensité lumineuse et la photo-inhibition



Effet de l'intensité lumineuse sur le taux de croissance (Source : Chisti)

La variation de l'intensité lumineuse au cours de la journée induit un phénomène de *saturation en intensité lumineuse* qui se traduit par un pallier du taux de croissance malgré une augmentation de l'intensité lumineuse. Ce phénomène est caractérisé par la *constante de saturation*, ie l'intensité lumineuse pour laquelle $\mu = \mu_{max}/2$. Or, pour les micro-algues, cette constante de saturation est largement inférieure à l'intensité lumineuse disponible en milieu de journée : il y donc un véritable potentiel non exploité. A cause de la saturation, le taux de croissance reste bien inférieur à ce qu'il pourrait être.

Par ailleurs, une intensité lumineuse trop importante conduit à un phénomène de photo-inhibition, c'est à dire à une diminution du taux de croissance, qu'il faut également éviter. Le point délicat est que ce phénomène intervient pour des intensités lumineuses tout juste supérieures aux valeurs de taux de croissance maximal.

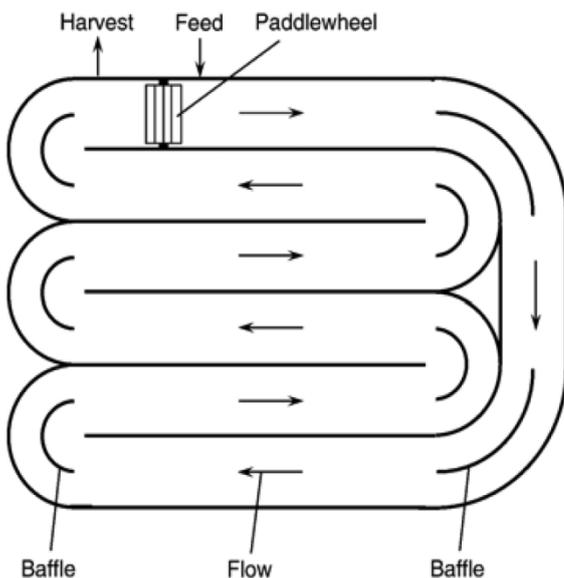
En conclusion, un des enjeux de recherche sur la modification génétique des micro-algues est d'**augmenter le seuil de saturation** et de **déplacer la zone de saturation vers des intensités lumineuses plus grandes**.

Nous allons examiner les types de dispositifs disponibles au regard des considérations précédentes pour voir s'ils sont à même de répondre aux contraintes énoncés ci-dessus.

1.3.2 Présentation comparée des deux « technologies de base » : Raceways et photobioréacteurs

Il existe aujourd'hui deux types de technologie capables de produire des micro-algues à échelle industrielle. Nous allons tenter de mettre en lumière les avantages et inconvénients de chacun des deux procédés.

▪ Raceways/bassins ouverts



Raceway, Bassins ouverts de 0,4ha chacun, Calipatria, Californie

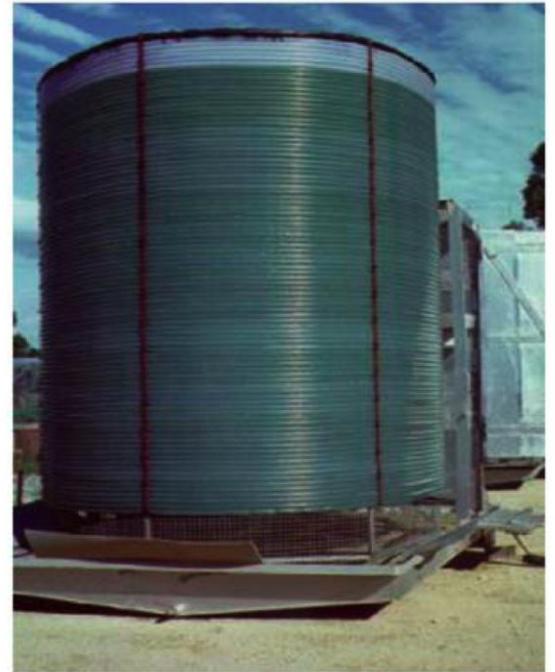
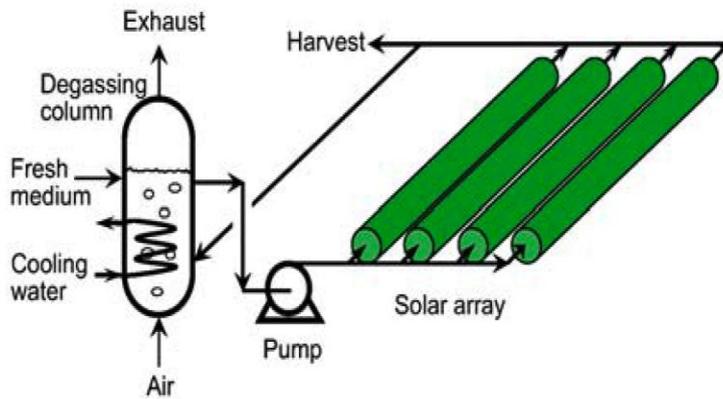
On nomme cette installation « raceway » car elle s'apparente à un champ de course. Il s'agit d'un bassin en forme de boucle, ouvert sur l'extérieur. La culture d'algues circule dans le bassin sous l'action de la roue à pales dont le rôle est également d'assurer un brassage constant pour éviter la sédimentation des algues.

Les principaux avantages de ce type d'installation est que certaines structures existent déjà (utilisées pour produire) et qu'elles sont peu coûteuse.

En revanche les inconvénients sont nombreux. Les micro-algues sont soumises à de fortes variations d'intensité lumineuses au cours des cycles diurne et saisonnier, ce qui a un impact fortement négatif sur le taux de croissance comme nous l'avons vu précédemment. De plus, l'agitation étant faible, il existe de nombreuses zones d'ombre non atteintes par la lumière. Le bassin étant ouvert sur l'extérieur, l'évaporation est non négligeable et le risque de contamination de la culture par des parasites est relativement important. Enfin, le CO₂ est prélevé directement dans l'atmosphère mais son utilisation reste peu efficace à cause d'une faible concentration et d'un brassage trop faible.

■ Bioréacteur

Bioréacteur tubulaire hélicoïdal de 1000L, Université de Murdoch, Australie



A la différence des raceways, les bioréacteurs sont des systèmes fermés. La culture des algues circule entre un réservoir (la colonne de dégazage) et le collecteur de rayonnement solaire composé de tuyaux transparents qui laissent entrer la lumière et sont disposés de manière à maximiser le rayonnement solaire incident. Les tubes ne dépassent pas un diamètre de 10 cm pour éviter la formation de zones d'ombres. De plus, un flux turbulent est maintenu dans l'écoulement au moyen d'une pompe afin d'éviter la sédimentation et pour limiter la formation de zones d'ombres. Le bioréacteur se prête facilement à la mise en place de systèmes coordonnés où la source de CO_2 injecté provient d'une usine à charbon par exemple.

Les avantages de ce type de procédé est tout d'abord de permettre un plus grand contrôle de l'espèce cultivée. Le paramètre de température est également plus facile à réguler. Le principal tout est la production de quantités importantes de biomasse très concentrée.

Un des principaux inconvénients est la formation d' O_2 dissout en grande concentration. Cela provoque en effet non seulement une inhibition de la photosynthèse, mais cela risque de détruire d'endommager les algues sous haute intensité lumineuse. Il est donc nécessaire de dégazer régulièrement pour évacuer le O_2 formé. Mais cette opération ne peut être réalisée que dans la colonne de dégazage et pas dans le tuyau, imposant ainsi une longueur limitée pour le tuyau. De même, cette méthode apporte une plus grande souplesse au niveau du contrôle du flux de CO_2 apporté et consommé (par mesure du pH), mais elle ne permet pas de réalimenter en CO_2 dans le tuyau, il finit donc par être en défaut. Ce problème pourrait être résolu en apportant du ravitaillement en CO_2 au cours du parcours, mais cela implique une installation plus élaborée et plus chère, ce qui est une limite importante car le coût des bioréacteurs est déjà prohibitif, mettant un frein important au développement à grande échelle de cette technologie.

■ **Comparaison Raceway / Bioréacteur**

La récupération de la biomasse à partir du mélange et l'extraction de l'huile est une des étapes les plus onéreuses. La difficulté et par conséquent le prix de cette opération sont directement liés à la concentration en biomasse du mélange de culture. La concentration en biomasse étant 30 fois plus importante en bioréacteur qu'en raceway, le bioréacteur semble un meilleur candidat. Cependant, les coûts élevés de cette installation étant très limitatifs, un compromis doit être trouvé. On peut espérer qu'un développement plus large de structures permettra une « démocratisation » de ces technologies par effet d'échelle.

Suite à l'introduction des principales problématiques et contraintes techniques, nous allons maintenant examiner un panorama mondial des solutions mises au point et des axes de recherche.

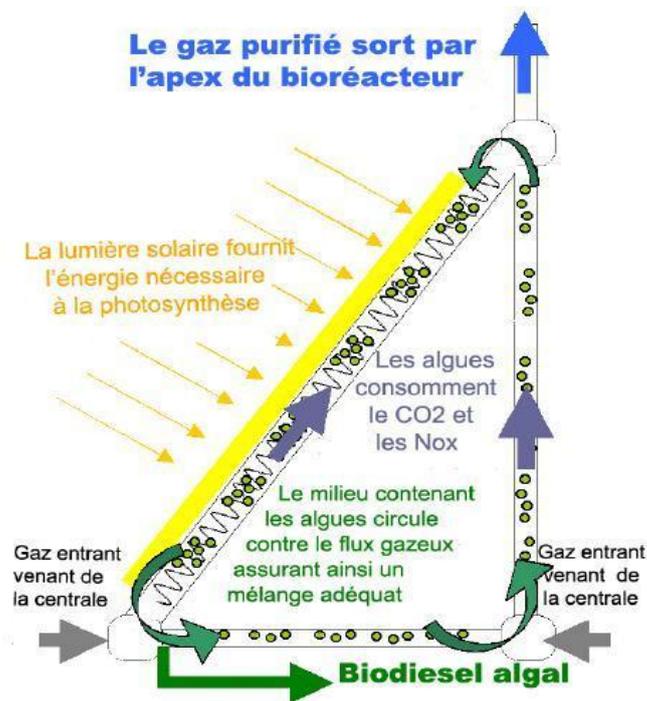
Partie 2 : L'état actuel des différents projets dans le monde.

Bien qu'encore à l'état de recherche, la production d'huile à partir d'algues fait l'objet de plusieurs projets dans le monde. Les premiers pilotes expérimentaux commencent d'ailleurs à donner des résultats, aux Etats-Unis, en Espagne, en Israël... En France, les chercheurs entament seulement les démarches concernant ce biocarburant de troisième génération.

2.1 Les Etats-Unis : le NREL et GreenFuel Corporation.

Les Etats-Unis se sont intéressés très tôt à la possibilité d'utiliser les algues pour produire des carburants. Fondé en 1974, le Laboratoire National des Energies Renouvelables – NREL – est un ensemble de laboratoires du bureau du développement des carburants.

Après le choc pétrolier de 1973, le gouvernement de Jimmy Carter a lancé un programme de recherche appelé *Aquatic Species Program*, car il lui est apparu indispensable de se tourner vers des sources pétrolières étrangères ou de développer d'autres carburants. Les travaux sur les algues ont pris de l'importance dans les années 1980 mais se sont arrêtés brusquement en 1996 pour cause de rigueur budgétaire : le pétrole ne coûtant alors que 20 dollars le baril, les algocarburants n'étaient pas considérés comme compétitifs en terme de prix. Cependant, à cause de la flambée actuelle des cours de l'or noir, les conclusions de ce programme attirent de nouveau l'attention : les chercheurs de l'*Aquatic Species Program* ont mis en avant les propriétés très intéressantes des micro-algues, en particulier des diatomées et des algues vertes, déjà citées auparavant. Ils ont également démontré la faisabilité des systèmes de bassin ouvert pour la production massive de ces micro-algues, tout en reconnaissant que les coûts de production élevés restaient un obstacle fort, notamment à cause des modifications génétiques à apporter aux souches. En revanche, leurs études ont prouvé la disponibilité des ressources nécessaires aux cultures – principalement espace, eau et CO₂ –, soulignant le fait que les micro-algues consomment nettement moins d'eau que les cultures traditionnelles basées sur les graines (colza, tournesol...).



Après 1996, les Etats-Unis ont interrompu leur programme de recherche mais depuis quelques années, l'utilisation à l'échelle industrielle de bioréacteurs à micro-algues est en pleine phase de développement. La start-up *GreenFuel Technologies Corporation* (GFT), créée en 2001 par Isaac Berzin, un ancien chercheur du *Massachusetts Institute for Technology* (MIT), a développé un bioréacteur permettant de réduire les émissions de NO_x et de CO_2 en les piégeant dans les algues. Ce système a été testé avec succès en couplant des bioréacteurs à la centrale de cogénération (*Cogen*) de 20MW du MIT.

Ce réacteur a une structure triangulaire constituée de tubes en polycarbonates (2 à 3m de long pour un diamètre de 10 à 20cm). L'hypoténuse du triangle est exposée au soleil et les deux autres côtés à l'ombre. Des modèles mathématiques poussés ont été utilisés pour développer le système le plus performant possible (vitesse du fluide dans les tubes, quantité de lumière disponible, température...). Le gaz injecté provient du *Cogen* avec une teneur classique en CO_2 de 13%. Ce CO_2 est assimilé par des algues sélectionnées selon un protocole utilisé par la NASA : ce ne sont pas des OGMs mais des souches qui se sont habituées aux conditions de culture. Le gaz nettoyé par le bioréacteur sort ensuite par l'apex tandis qu'une partie des algues est quotidiennement drainée et prélevée au niveau inférieur. La biomasse obtenue peut servir à produire du biodiesel, du plastique ou des molécules d'intérêt pharmaceutique. Elle peut également être réintroduite comme combustible dans une centrale thermique.

En octobre 2004, un rapport de l'organisme de certification *CK Environment* indiquait que sur une période de sept jours de mesures, les bioréacteurs ont permis les jours ensoleillés une réduction de 85,9% ($\pm 2,1\%$) des NO_x et de 82,3% ($\pm 12,5\%$) du CO_2 et les jours nuageux ou pluvieux de 50,1% pour le CO_2 ($\pm 6,5\%$). La méthode de test utilisée était conforme aux standards imposés par l'EPA (*Environmental Protection Agency*). Bien que n'atteignant pas le rendement théorique de 90% de captage du CO_2 à cause de contraintes financières et techniques, ce bioréacteur constitue une

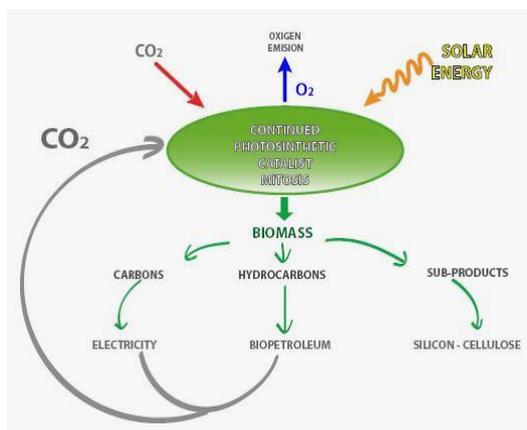
avancée technologique considérable : Peter Cooper, de la Direction du *Cogen*, affirme que « le système est plus efficace que nous l'avions espéré ».

En 2006, *GreenFuel* affirmait avoir réalisé une productivité moyenne de 98 grammes d'algues en poids sec par mètre carré et par jour, ce qui place ce procédé devant les autres méthodes de production de biomasse. Cependant, les spécialistes remarquent que *GFT* multiplie les effets d'annonce sans présenter de résultats tangibles. Plusieurs sociétés de capital-risque ont pourtant fait confiance à *GreenFuel*, en finançant 18 millions de dollars de levées de fond et plus de 14 millions de dollars en prêt-relais, pour accélérer son développement. Preuve de l'influence grandissante de cette société et de cette technologie, l'hebdomadaire américain *Time Magazine* a désigné Isaac Berzin, le fondateur de *GreenFuel*, comme l'une des cent personnalités les plus influentes de l'année 2008, dans la catégorie « Scientists & Thinkers ».

Enfin, de nombreuses multinationales, pour la plupart américaines, investissent dans les algocarburants: la firme *Petrosun* a annoncé la création, à Rio Hondo (Texas), d'une ferme de micro-algues marines s'étendant sur 450 hectares d'étangs salés, puis une seconde, près du Golfe du Mexique, de 1100 hectares. Les sociétés *Shell*, *Boeing*, *Chevron*, *General Electric* investissent dans ce secteur en association avec les entreprises pionnières, tout comme Bill Gates – par l'intermédiaire d'un fond d'investissement.

2.2 L'Espagne et BioFuel Systems

En Europe, l'Espagne fait figure de pionnière dans le domaine des algocarburants. En 2006, la société *BioFuel Systems* (BFS) a été créée, suite à un projet de recherche développé sur plus de trois ans par une équipe de scientifiques et d'ingénieurs, en collaboration avec le département de biotechnologie des universités d'Alicante et Valencia. Les deux fondateurs, Bernard Stroïazzo-Mongin – ingénieur en thermodynamique – et Cristian Gomis – docteur en biologie –, ont inventé un système permettant d'accélérer le cycle de photosynthèse des algues.



Le soleil émet des ondes électromagnétiques, transporteuses d'énergie, qui sont captées en même temps que le CO₂ de l'atmosphère au niveau de l'installation où des algues, appelées «*Super Algae*», réalisent la photosynthèse et la mitose : ces algues sont d'origine naturelle mais ont été modifiées pour avoir un taux de reproduction plus élevé. Une fois que la biomasse s'est accumulée, elle est divisée en carbones et hydrocarbures : les carbones sont utilisés pour produire de l'électricité et les hydrocarbures extraits donnent le biocarburant. Le processus se

réinitialise ensuite, tirant profit du CO₂ ajouté lors des opérations.

BioFuel Systems a construit une usine de production d'algocarburants sur près de 5.000m² près d'Alicante qui devait être opérationnelle début 2008 et fournir une centaine de barils de biodiesel par jour : la grande quantité de biomasse, environ 30.000 tonnes par an sert à produire du biogaz par méthanisation pour faire tourner une centrale électrique de 6MW. La société a également présenté son prototype « Airemar », qui capte le CO₂ atmosphérique, lors du congrès international *Bio-mass and biofuels production from algae oil* qui a eu lieu à l'université d'Alicante les 30 et 31 octobre 2008.

Par ce système, BFS arriverait à produire près de 300 millions d'algues unicellulaires par millilitre d'eau de mer en laboratoire, et 140 à 150 millions en bassins, sur le site pilote. Plusieurs groupes pétroliers internationaux se seraient mis sur les rangs, selon BFS, pour acheter son biocarburant. Mais, ici encore, il est difficile de distinguer les véritables avancées dans un argumentaire commercial bien rôdé. Même si la présence de Cristian Gomis apporte une certaine crédibilité au projet, les affirmations de Bernard Stroïazzo-Mougin semblent très optimistes : « Notre système produira d'énormes quantités de biocarburant dans un espace limité et à un coût très modéré. » Il avance par exemple que la technologie de BFS, dont les secrets sont farouchement gardés, appliquée sur une surface de 52.000km², produirait autant de pétrole de synthèse, soit 95 millions de barils par jour, que tous les gisements de brut réunis. Cependant, aucun chiffre précis n'a été communiqué depuis que l'usine est supposée être en service...

2.3 Israël et Seambiotic

Fondée en 2003, la société *Seambiotic*, basée près d'Ashkelon en Israël, expérimente un prototype de production de biocarburant à base de micro-algues. Le pilote, comprenant 1.000m² répartis en huit bassins ouverts, utilise les émissions de CO₂ de la centrale électrique voisine pour nourrir son phytoplancton. Les bassins sont remplis avec l'eau de mer du circuit de refroidissement de l'usine. Les nanochloropsis ont été les premières algues testées, puis l'équipe de recherche a choisi les *Skeletonemas*, des algues unicellulaires plus adaptées à la fabrication de biodiesel. Une partie des algues produites sont utilisées pour produire de l'huile et du bioéthanol, l'autre pour fabriquer des compléments alimentaires...

La *Compagnie Israélienne d'Electricité* est partenaire du projet, qui a également le soutien du gouvernement israélien. Ami Ben-Amotz, biologiste à l'Institut national d'océanographie d'Israël, qui participe aux recherches menées par *Seambiotic*, affirme : « Nous parvenons à produire un gramme d'algues par litre en poids sec », ce qui correspond à « une tonne d'algues liquides par mois », selon Shai Dior, responsable du marketing.

Après avoir réussi à maîtriser le développement des micro-algues, *Seambiotic* cherche maintenant à réussir la transition vers la culture d'algues et la production à l'échelle industrielle. Cela semble en bonne voie, puisqu'en janvier 2009, la société a annoncé la construction d'une ferme de micro-algues de 5 hectares, en collaboration avec la *Compagnie Israélienne d'Electricité*, dont la mise en fonctionnement est prévue pour la fin de l'année. Cependant, pour réussir ce passage délicat vers l'industrialisation, la société a besoin de l'appui d'un partenaire international : après avoir déjà investi 3 millions de dollars dans son projet, elle affirmait en 2007 que plusieurs candidats s'étaient fait connaître : des opérateurs électriques d'Hawaï, de Singapour, d'Italie et d'Inde se seraient montrés intéressés par la technologie développée. De plus, en juin 2008, *Seambiotic* a signé un partenariat avec la société américaine *Inventure Chemical* pour la construction d'une usine pilote de biocarburant commercial : celle-ci utilisera les algues cultivées en bassin ouvert par *Seambiotic* combiné avec les processus de conversion développés par *Inventure Chemical* pour produire de l'éthanol, du biocarburant et d'autres produits à haute valeur ajoutée, en se servant des émissions de CO₂ des centrales à charbon. Cependant, les détails financiers, le coût et la date de mise en service de ce projet n'ont pas encore été dévoilés. De plus, difficile de savoir si la ferme de 5 hectares en association avec la *Compagnie Israélienne d'Electricité* et ce nouveau projet ne font en fait qu'un...

2.4 La France et le projet Shamash

Jusqu'à présent, la France était très en retard dans le domaine des algocarburants, bien qu'elle compte de nombreux spécialistes de la culture des micro-algues. Pourtant, le rapport de la Commission pour la libération de la croissance française, dit « Rapport Attali », préconisait dans sa décision n°82 de « lancer dès à présent un programme de recherche et développement sur les biocarburants de 3^{ème} génération. ». Ce rapport soulignait le fait qu'« il existe un potentiel trop peu exploité de production de bioénergie à partir de micro-organismes ou d'algues (algocarburants), cultivables en bioréacteurs ».

Comme pour répondre à cette demande, sept laboratoires et une PME se sont lancés, en décembre 2006, dans un projet de production de biocarburant, à partir de micro-algues autotrophes. Le projet *Shamash*, doté d'un budget de 2,8 millions d'euros, dont 800.000€ financés par le *Programme National de Recherche sur les Bioénergies* (PNRB), doit durer 3 ans, de 2006 à 2009 et est soutenu par deux pôles de compétitivité de la région PACA : le pôle MER et le pôle CAPENERGIE.

Une quarantaine de scientifiques, venant de la recherche publique et du monde industriel, y sont impliqués. L'*INRIA* de Sophia-Antipolis assure la coordination du projet, par l'intermédiaire d'Olivier Bernard et de Jean-Paul Cadoret, et applique des méthodes de modélisation mathématique aux bioréacteurs de culture d'algues, expérimentés par le *laboratoire du génie des procédés de l'université de Nantes*. L'*Ifremer* étudie le métabolisme des micro-algues et sélectionne les meilleures souches lipidiques. Le *laboratoire d'océanographie de Villefranche-sur-Mer* et le *CEA* étudient les mécanismes de synthèse des lipides. Le *CIRAD*, le *laboratoire des procédés propres de l'université d'Aix-Marseille* et la société *Valcobio* travaillent à l'extraction des huiles. Depuis janvier 2009, la société *Alpha Biotech*, spécialisée dans la production et la commercialisation de micro-algues, a rejoint le projet *Shamash* : leader français dans son domaine, elle a développé un savoir-faire et des innovations valorisés par deux brevets et de nombreuses coopérations internationales.

Le but du projet, d'ici à fin 2009, est de faire fonctionner expérimentalement des moteurs avec du biodiesel à base d'algues. Pour cela, différentes étapes ont été définies :

- Sélectionner dix algues particulièrement riches en lipides,
- Les mettre en culture dans un photo-bioréacteur clos de taille préindustrielle offrant les meilleures conditions de production contrôlée de lipides,
- Établir un mode d'extraction des huiles,
- Étudier les rendements énergétique et économique des installations.

L'équipe de l'*Ifremer*, sur la base de calculs théoriques, affirme pouvoir fabriquer 24.000 litres d'huile par hectare, quand le meilleur oléagineux terrestre, le palmier à huile, donne 6.000 litres par hectare.

Contrairement à leurs confrères anglo-saxons, les équipes de recherche françaises communiquent très peu sur le projet *Shamash*, hormis un article en 2008 : « *la production de biocarburant lipidique avec des micro-algues : promesses et défis* ». Le site internet dédié à ce projet est d'ailleurs assez épuré. Cela ne signifie pas que les recherches ne progressent pas. Cependant, il serait intéressant d'avoir un peu plus de détails sur les avancées du projet – par exemple savoir si l'*Ifremer* se base sur les résultats de l'*Aquatic Species Program* du NREL pour sélectionner les dix espèces d'algues – sans pour autant tomber dans l'excès inverse, comme *GreenFuel* dont les communiqués répétés annonçant des rendements exceptionnels ont tendance à éveiller la méfiance.

Enfin, il est important de souligner que le projet *Shamash* sort peu à peu de l'ombre : en 2008, le laboratoire Physiologie et Biotechnologie des Algues dirigé par Jean-Paul Cadoret au centre *Ifremer* de Nantes s'est vu distinguer par les trophées INPI de l'Innovation (région Pays de la Loire) pour son implication dans de nombreux projets de recherche menés en partenariat, notamment le projet *Shamash*.

Ce panorama mondial sur les algocarburants est loin d'être exhaustif. Partout, les chercheurs et les entreprises s'intéressent de plus en plus à ce nouveau produit : au Canada, le gouvernement a créé un centre de recherche de conversion du CO₂, en partenariat avec *Shell Canada*, qui doit développer un programme de culture de micro-algues capable de capter jusqu'à 100 millions de tonnes de CO₂ issues de l'industrie, pour les transformer en biogaz, en biocarburant et en hydrogène. Aux Etats-Unis, *Global Green Solutions*, *Greenshift* et *Solix* rejoignent *GreenFuel*. En Israël, *Algatech* suit les traces de *Seambiotic*. *Kwikpower* au Royaume-Uni et *Aquaflow* en Nouvelle-Zélande se lancent également dans le développement des algocarburants.

Partie 3 : rentabilité économique et les freins à lever

3.1 Rentabilité économique des algocarburants

L'objectif des algocarburants est de remplacer à terme le pétrole, il faut donc que sa production à grande échelle soit plus rentable que celle du pétrole. L'évolution récente du cours du pétrole, de l'énergie de manière plus générale, incite à augmenter les efforts effectués en R&D dans le domaine des algocarburants. De nombreux articles et études traitent du sujet, mais peu s'intéressent à l'extrapolation de la production à grande échelle et de son coût. De plus, les études économiques réalisées sont faites sur des expériences à taille réduite puis simulées pour une plus grande taille car actuellement il n'existe pas d'installation de cette envergure.

Deux types d'installation sont actuellement développés : les fermes en plein air privilégiant l'énergie solaire et donc une grande surface de culture, et les photobioréacteurs qui optimisent les facteurs de développement des algues. Cependant, ces derniers ont pour le moment un coût prohibitif. En annexe 1, on trouve une analyse comparant les coûts des deux systèmes.

Si on suppose qu'un hectare produit entre 100 et 150 tonnes par an, on peut vérifier la possibilité de remplacer tout le pétrole consommé sur le continent américain par les transports par le biodiesel. En effet, chaque année, il est consommé l'équivalent de 530 milliards de litres de biodiesel (la consommation de biodiesel sera moins élevée que celle du diesel classique compte tenu des progrès des moteurs et des véhicules hybrides), il faudrait donc cultiver 3,85 millions d'hectares (on considère qu'un hectare produit environ 140 litres par an) pour un coût total de 308 milliards de dollars. Les coûts d'exploitation annuels sont estimés à 71 milliards. Ce chiffre est à mettre en balance avec les 150 milliards de dollars dépensés chaque année pour acheter le pétrole à l'étranger.

Pour être rentable économiquement, il faut que le prix du litre d'huile provenant d'algues respecte la proportion suivante : $P_{\text{algo-huile}} = 6,9 \cdot 10^{-3} P_{\text{baril de pétrole}}$. Ainsi, pour un baril de pétrole à 80\$, il faut que la production d'un litre d'huile ne dépasse pas les 0,55\$. Actuellement, dans les meilleures conditions et à petite échelle, les résultats oscillent entre 1,4\$ et 2,6\$ le litre. Il apparaît donc clairement qu'il

reste des progrès à faire même si on peut estimer que les économies d'échelle amèneront une réduction d'environ 47 à 60 centimes par litre.

Compte tenu de la crise actuelle, où le baril de pétrole est à peine à 50\$ le baril, la rentabilité économique de cette filière n'est pas encore d'actualité. Par contre, au plus fort de la hausse du pétrole, le baril coûtait 150\$: $P_{\text{algo-huile}} = 6,9 \cdot 10^{-3} \times 150 = 1,035\$/l$. La filière était alors rentable !

Enfin, en annexe 2, on trouve un tableau analysant les coûts et les gains de la filière algocarburant selon plusieurs scénarios, mais avec l'hypothèse commune de 100t/ha/an. La rentabilité dépend de nombreux paramètres, dont notamment la localisation du site et il semble plus probable d'être déficitaire que bénéficiaire pour le moment.

3.2 Les verrous à lever

A l'heure actuelle, de nombreux blocages techniques subsistent encore pour permettre une production à grande échelle. La production de biocarburant via les micro-algues n'a de sens que si elle utilise au maximum l'énergie solaire et un minimum de main d'œuvre. Or le système de photobioréacteur est très gourmand en coût puisqu'il réclame une technologie de pointe et une optimisation constante. Pour maximiser les gains des bassins de culture à ciel ouvert, il faut tester les productivités régionales liées à l'éclairement : en effet, il est difficile d'atteindre les rendements théoriques car ceux-ci sont extrêmement sensibles à l'intensité lumineuse. On rencontre donc le paradoxe suivant : développer des fermes dans des pays désertiques permet une forte luminosité mais rencontre le problème d'une très forte évaporation. Il faut donc développer des systèmes d'optimisation et de contrôle automatisé comme dans les serres. A contrario, l'impact du froid peut faire tomber le rendement à $2\text{g}/\text{m}^2/\text{j}$. La solution serait de cultiver différentes espèces, les plus adaptées, au cours des saisons.

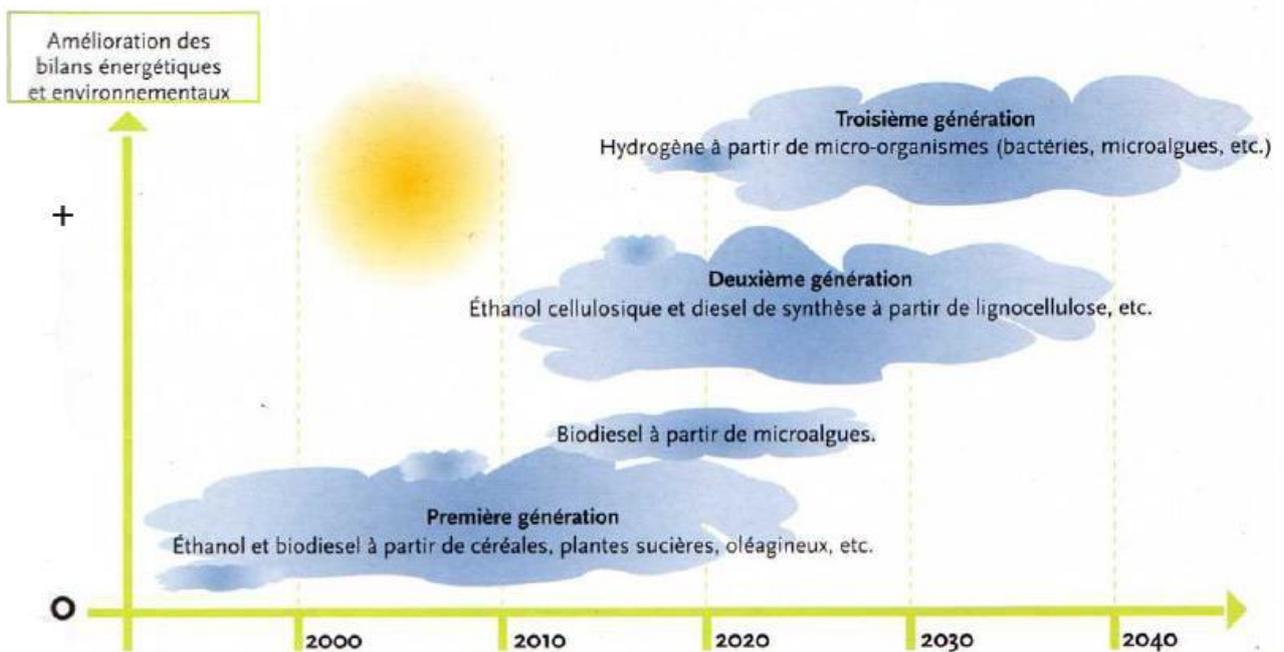
Deux pistes se dégagent actuellement pour parvenir à des rendements qui permettront la production à grande échelle : premièrement, le génie génétique permettrait de développer ou du moins d'adapter les espèces existantes pour optimiser leur croissance et leur teneur en lipides. De nombreux laboratoires travaillent actuellement sur ce sujet. Les problèmes majeurs restent le risque de pollution à d'autres espèces et le coût important puisqu'il faut racheter les souches. Une des solutions serait de les cultiver dans des photobioréacteurs au début puis dans des bassins pour la phase de récolte. Pour le moment, cette solution n'est pas rentable sur le long terme. Deuxièmement, il reste à trouver une optimisation entre la croissance des algues et la synthèse des lipides. Il faut donc modéliser le procédé de production en prenant en compte de nombreux facteurs : surface cultivée, profondeur du bassin, teneur en CO_2 , apport en phosphore et azote, température, ensoleillement, ...

De plus, la plupart des bilans chiffrés parviennent à une solution quasiment rentable en considérant les coûts d'acquisition du CO_2 et des nutriments quasi-nuls. Ceci implique donc de disposer les fermes d'élevage proches de station d'épuration ou d'usine produisant une grande quantité de CO_2 . A l'inverse, il est nécessaire de trouver une filière de valorisation de l'azote et du phosphore en sortie de chaîne car ils ne sont pas présents dans l'huile biocarburant : on peut penser à un recyclage de ces éléments pour les fermes d'algoculture, sinon le bilan économique et environnemental pourrait être extrêmement lourd.

Le biocarburant produit à partir d'algues doit respecter des normes, comme la norme européenne EN 14214. Les huiles à base d'algues sont différentes de la plupart des huiles d'origine végétale car elles sont riches en acides gras polyinsaturés. Ceci implique une possibilité d'oxydation durant le stockage et donc pose problème pour leur utilisation dans les biodiesels. Les normes européennes imposent un taux molaire de 12% en méthylester. De plus, le biodiesel ne doit pas contenir plus de 1% de méthylester avec quatre double liaisons ou plus. Actuellement, la plupart des huiles à base d'algues ne respectent pas les normes européennes. Cependant, ceci n'est pas une limitation importante car une hydrogénation catalytique partielle peut facilement réduire ces insaturations.

Conclusion

De plus en plus de pays, de laboratoires et d'entreprises se tournent vers de solutions alternatives pour pallier à l'augmentation du prix du pétrole. Si les carburants à base d'algues présentent de nombreux avantages par rapport à leurs prédécesseurs issus des plantes terrestres, de nombreux verrous, notamment techniques et économiques, persistent et handicapent encore cette industrie naissante. Les spécialistes prévoient donc que les algocarburants ne commenceront à être rentables qu'aux alentours de 2020.



Les trois générations de biocarburants (d'après le PNRB)

Cependant, des tests « grandeur nature » ont déjà eu lieu, notamment au niveau des compagnies aériennes. Le 8 janvier 2009, Continental Airlines a effectué le premier vol-test d'un appareil Boeing 737-800, dont l'un des moteurs était alimenté par un mélange 50% algocarburant – 50% kérosène traditionnel. L'avion, parti de l'aéroport international Bush de Houston, a volé autour du Golfe du Mexique, permettant aux pilotes de réaliser une série de tests à 11.6km d'altitude, incluant un arrêt des moteurs : « L'avion a très bien réagi » commentait Rich Jankowski, l'un des pilotes d'essais, « Il n'y a eu aucun problème ».

Enfin, l'hydrogène, de par ses propriétés énergétiques, se dessine doucement comme l'un des carburants de demain. Les scientifiques cherchent actuellement les solutions pour le produire de façon propre et rentable et l'utilisation de micro-organismes photo-synthétiques, en particulier des algues vertes, est étudiée de près, notamment par le programme européen Solar-H et le programme français PhotobioH₂ (ANR). Ces recherches sont encore loin d'aboutir à une industrialisation mais elles apparaissent comme une autre utilisation possible des algues...

Bibliographie

Ballerini J.-P., *Les biocarburants : Etat des lieux, perspectives et enjeux du développement*, Technip, 2006

Benemann J.R., *CO2 mitigation with microalgae systems*, Energy conversion and management 38, 1997

Cadoret J.-P., Bernard O., *La production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis*, Journal de la Société de Biologie, 2008

Campbell M., *Biodiesel : Algae as a renewable source for liquid fuel*, Guelph Engineering Journal, 2008

Chisti Y., *Biodiesel from microalgae*, Biotechnology Advances 25, 2007

Hu Q., Zhang C., Sommerfeld M., *Biodiesel from algae : Lessons learned over the past 60 years and future perspectives*, Journal of Phycology 42, 2006

Miao X., Wu Q., *Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil*, Bioresource technology 97, 2006

Olaizola M., *Commercial development of microalgal biotechnology : from the test tube to the marketplace*, Biomolecular Engineering 20, 2003

Sheenan J., Duhanay T., Benemann J., Roessler P., *A look back at the U.S. Department of Energy's aquatic species program « Biodiesel from algae »*, 1998, NREL U.S. Department of Energy's Office of Fuels Development

Rosenberg J., Oyley G., Wilkinson L., *A green light for engineered algae : redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution*, Current Opinion in Biotechnology, 2008

Spolaore P., Joannis-Cassan C., Duran E., Isambert A., *Commercial Applications of microalgae*, Journal of Bioscience and Bioengineering 101, 2006

Van Harmelen T., Oonk H., *Microalgae biofixation processes : applications and potential contributions to greenhouse gas mitigation options*, TNO Built Environment and Geosciences, 2006

Annexe 1 : comparaison des coûts entre les systèmes raceway et photobioréacteur

Ces tableaux sont extraits de l'article *A look back at the US Department of Energy's Aquatic Species Program : Biodiesel from Algae*, juillet 1998, the National Renewable Energy Laboratory.

Voici deux estimations des coûts d'une ferme productrice d'algues pour les biocarburants : la première en bassins ouverts sur 400 ha avec 112 t par an et par ha, la deuxième en photobioréacteurs sur 400ha avec 109 t par an et par ha.

BASSIN OUVERT avec CO2			
CAPITAL \$/ha		COUTS OPERATIONNELS \$/ha/an	
Terrassement	10135	CO2 (2kg/kg de biomasse)	6290
Bassins	8304	N(5,3%)	370
Mélangeur	4919	P, Fe	530
Injection de CO2	1830	floculant	1120
Instruments de mesure	500	1 ^{ère} récolte	120
Bassins de décantation	7479	2 ^{ème} récolte	370
Centrifugeuses	3958	Consommation d'eau	570
Apport en eau	4426	Autre (1,562 kWh/ha)	110
Apport de CO2	260	Production d'énergie	(2250)
Nutriments	781	Système de salage	1130
Système de salage	833	maintenance	1970
Bâtiments	573	Main d'oeuvre	1390
Drainage	521		
Electricité	1924		
Machines	417		
PROVISIONS (+25%)	11715		
TERRAIN	2500		
GENERATEUR	8250		
DIGESTION ANAEROBIQUE	3627		
SOUS-TOTAL	72952	TOTAL OPERATING COSTS + RSI	12420
Pour 1 an :25% des coûts de capital		TOTAL \$/ha/an	30658

La tonne de biomasse coûte 273 \$.

PHOTOBIOREACTEUR avec CO2			
CAPITAL \$/ha		COUTS OPERATIONNELS \$/ha/an	
Terrassement	6000	Energie	1870
Roues à aubes	5000	Nutriments N, P, Fe	900
Distribution du CO2	4300	CO2(40\$ la tonne)	7400
1 ^{ère} récolte, floculation	9000	floculation	1000
Centrifugeuse, extraction	12500	Main d'oeuvre et encadrement	3000
Digestion anaerobique	3250	déchets	1000
Générateur	8700	Maintenance, taxes, assurances	3400
Eau, nutriments, déchets	6200	Crédit pour l'énergie	(3400)
Bâtiment	4500	Charge sur le capital	11100
Provisions	8900		
Terrain	2000		
Capital travail	3800		
SOUS-TOTAL	74150	SOUS - TOTAL	15170
Pour 1 an : 15% des coûts de capital		TOTAL \$/ha/an	26270

La tonne de biomasse coûte 241\$.

Annexe 2 : analyse économique de la filière

Élément de la chaîne de production	hypothèses de calcul	remarques	pire cas	cas médian	meilleur cas
			€/tonne algue ou CO2		
GAINS					
eaux usées	0 à 0,08€/m3	dépend de la localisation	0 €	120 €	200 €
fertilisant	0 à 50€/tonne	seulement pour le traitement de l'eau	0 €	30 €	50 €
OU			OU	OU	OU
produits à haute valeur ajoutée	0 ou 20% de la biomasse entre 750€ et 1250€/tonne		0 €	150 €	250 €
pétrole produit	12 GJ/tonne d'algues	35/60/75€ le baril	70 €	100 €	120 €
CO2 évité	0 à 50€/tonne	1t CO2 = 1t d'algues	0 €	30 €	50 €
Total Gains			70 €	280 €	420 €
COÛTS					
terrains	100/20/0k€/ha	charges : 5%/an	50 €	10 €	0 €
bassins	100k€/ha à 10% ou 15% du capital & 4 à 8% de dépréciation	charges entre 15 et 25% sur 20 ans	250 €	180 €	160 €
coûts opérationnels	50 à 100k€/tonne		100 €	70 €	50 €
transport du CO2	0 à 40€/tonne	dépend de la localisation	40 €	10 €	0 €
risques	0 à 10% de provisions		45 €	10 €	0 €
Total Coûts			485 €	280 €	210 €
Gains moins coûts			-415 €	0 €	210 €

Tableau extrait de *Microalgae biofixation processes*, T. Van Harmelen, H. Oonk, mai 2006.

Annexe 3 : Quel potentiel réellement disponible pour la production de micro-algues ?

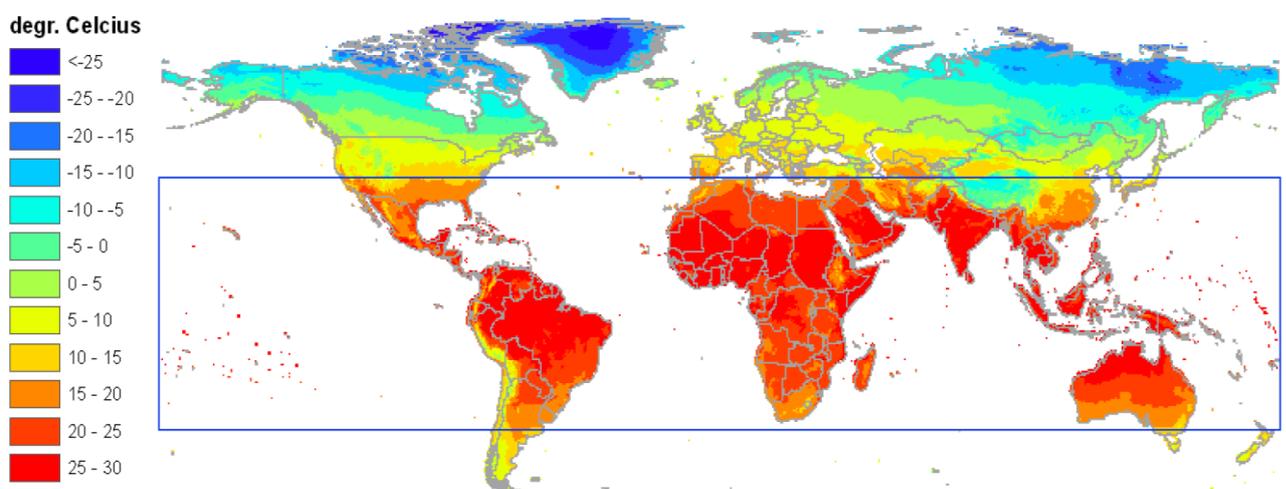
Une étude menée en partenariat avec l'Agence Internationale de l'Energie dans le cadre de son programme de recherche sur les gaz à effet de serre et sponsorisée par le groupe Eni, a eu pour objectif d'évaluer les potentialités des micro-algues dans la fixation du CO₂, en se basant sur les points disponibles d'eau usées. L'enjeu de cette étude est de prendre en compte les différentes contraintes techniques afin d'estimer les potentialités réelles de la production de micro-algues dans le monde.

1. Le climat

Comme nous l'avons vu, les paramètres de température et d'ensoleillement jouent un rôle fondamental dans la production des micro-algues. Par conséquent le climat va être un des principaux facteurs limitants.

Hypothèse : Il est estimé que seules les zones géographiques dont la température moyenne est de 15°C ou plus répondent aux conditions de production.

Cela discrimine donc une bonne partie de la surface terrestre. Les zones répondant à ces conditions figurent dans le cadre bleu.



1- Zone climatique adaptée à la production des micro-algues (Données IPCC)

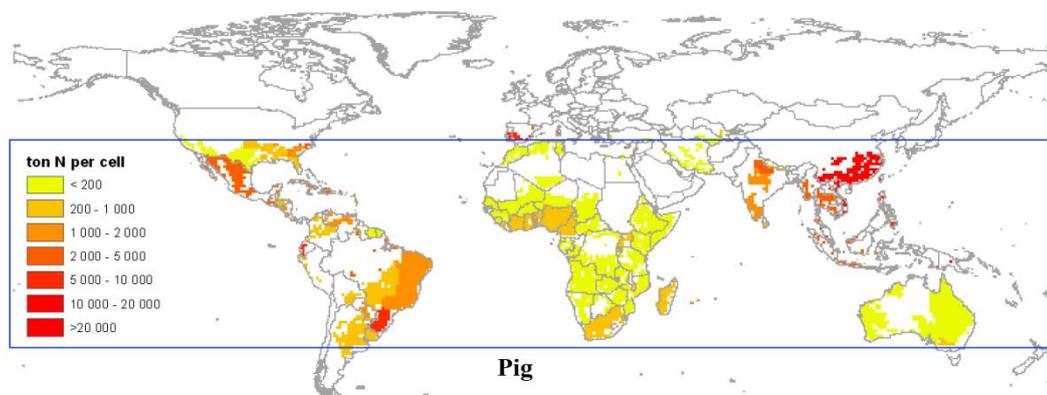
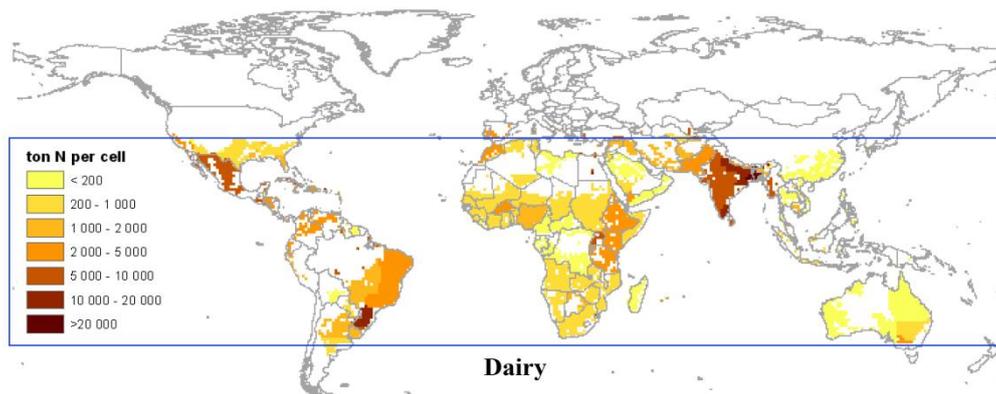
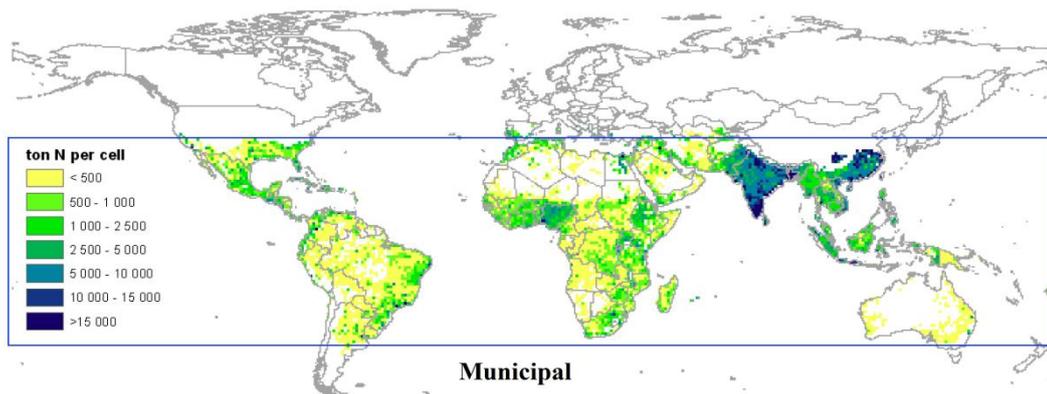
On peut néanmoins nuancer cette hypothèse un peu radicale, car il serait certainement plus judicieux de prendre en compte les températures nocturnes et les saisons qui sont des paramètres plus pertinents que la température moyenne.

2. Les ressources en nutriments issues des eaux usées

Ces nutriments sont principalement l'azote qui représente 10% de la constitution des micro-algues et le phosphore (1%). Ils sont présents en grande quantité dans les eaux usées municipales, dans les déchets d'élevage (surtout bovins et porcs) et aussi dans certains déchets industriels, dans les eaux de l'aquaculture,...

Hypothèse : On considère que seules les eaux usées provenant de déchets humains, des bovins et des porcs, contiennent les quantités suffisantes en nutriments pour répondre aux besoins de la production d'algues. L'azote est considéré comme l'élément limitant.

Ci-dessus figure la « distribution spatiale des nutriments » dans le monde, en fonction des concentrations en azote. A noter que 20 000 tonnes de N par cellule correspond à plus de 1600kg de N par km². Ce qui peut se traduire en termes de « population » par 500 personnes, 100 porcs ou 25 bovins...



Potentiel théorique de production de micor-algues basé sur les quantités disponibles d'eaux usées urbaines et des rejets des élevages bovins et porcins

Ces données sont ensuite extrapolées à 2020 en se basant sur les projections du GIEC selon le scénario B1, c'est à dire dans le cadre d'un monde "convergent", globalisé, où la population culmine au milieu du siècle et décline ensuite, et où l'accent est mis sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique et environnementale, mais sans initiatives "drastiques" pour gérer le climat. Dans ces conditions la population en Asie augmenterait de 1,4% annuellement sur la période 1990-2020. L'augmentation annuelle de la ration alimentaire par personne est estimée à 2% par an sur la même période, ce qui est pris comme présumé pour les déchets d'élevages ovins et porcins.

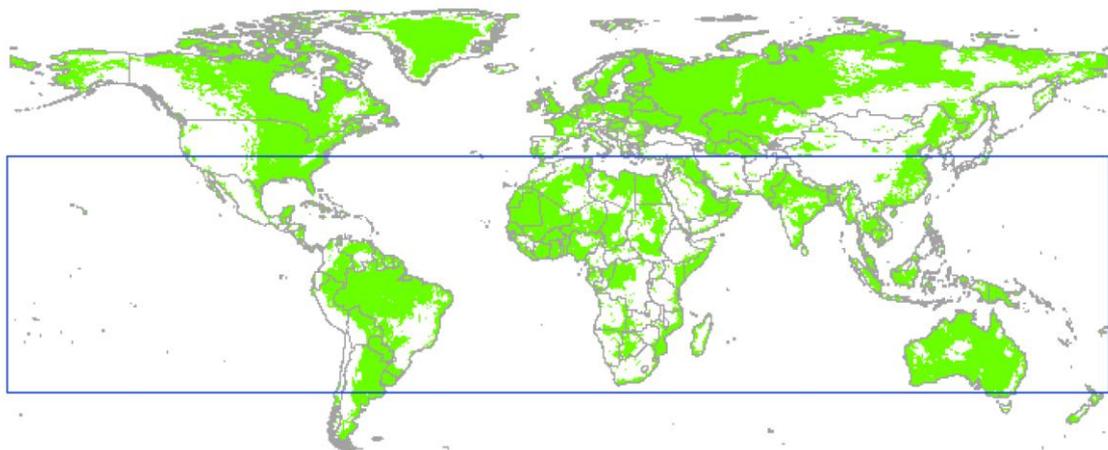
3. Contraintes techniques pour les installations industrielles de micro-algues

Seule une fraction du potentiel de nutriments décrit plus haut est exploitable en réalité. Il faut en particulier tenir compte des contraintes techniques de structures volumineuses telles que les raceways.

■ Disposer d'un terrain relativement plat

Hypothèse : Il est supposé que les zones situées à une altitude inférieure à 500 m répondent aux conditions. Elles sont représentées en vert sur la carte ci-dessous.

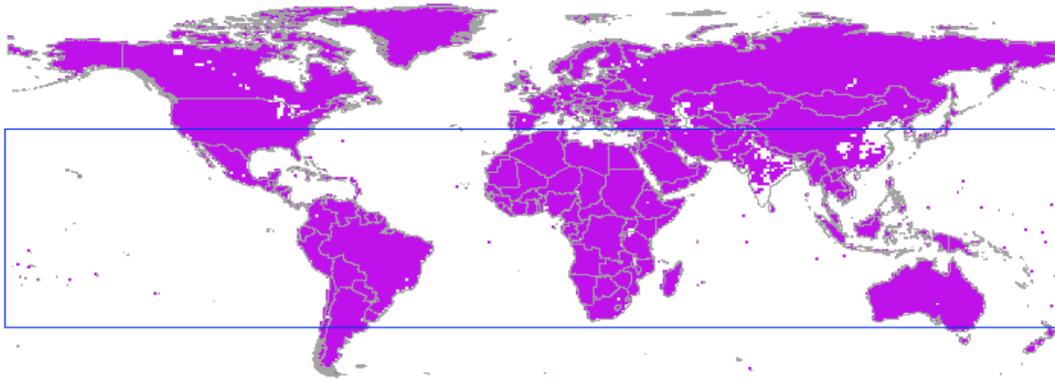
Cette hypothèse est discutable, car cela exclut de larges zones en Inde et en Chine (plateaux continentaux). Mais on peut aussi dire que l'altitude augmente la complexité d'infrastructures et de fait le coût, donc cette hypothèse est défendable.



Zones géographiques situées à une altitude inférieure à 500m (Source : Go spatial)

- Disponibilité de terrain à faible coût

Hypothèse : On estime que les zones dont la densité de population est inférieure à 250 habitants par km² satisfont ce critère. Elles sont représentées en rose sur la carte.

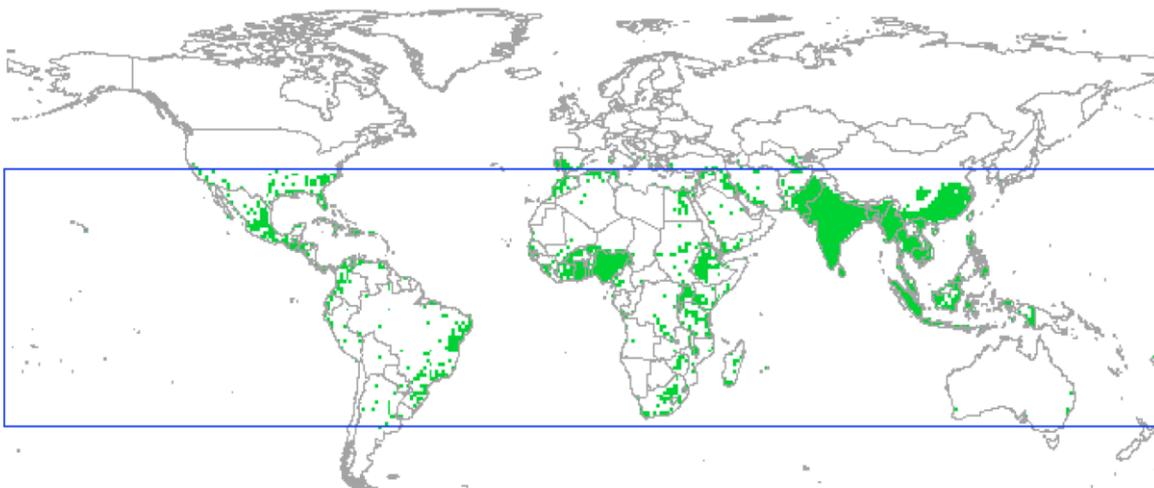


Zones dont la densité de population est inférieure à 250 habitants par km² (Source : Columbia University of New York)

Ce critère est plutôt "généreux" puisqu'il exclut seulement les grandes métropoles. On constate par ailleurs que nombreuses zones d'Inde et de Chine sont incompatibles avec la production de micro-algues du fait de la surpopulation.

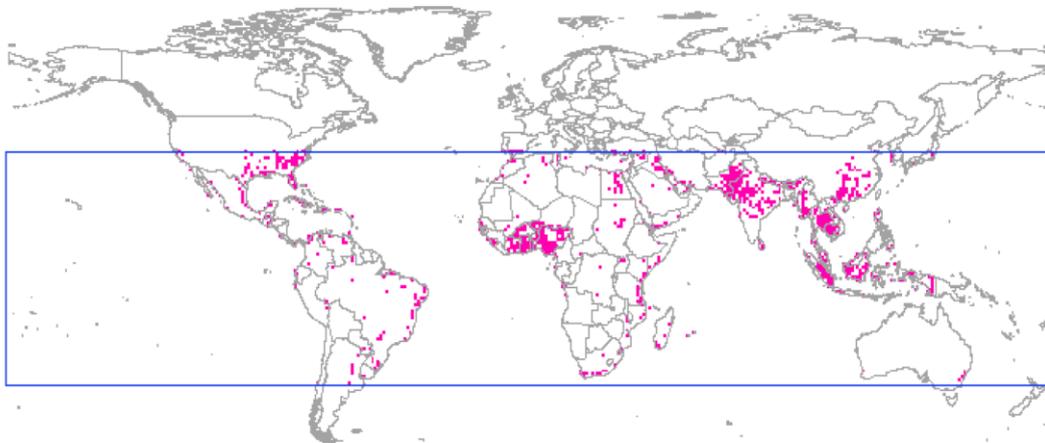
- Approvisionnement en CO₂ à proximité (centrale à charbon, industrie,...)

Hypothèse : On considère que les zones de densité de population supérieures à 25 habitants par km² remplissent cette condition. Autrement dit, pour des densités inférieures, on considère que les populations n'ont pas accès ou une part très faible à accès à l'énergie, ce qui ne permet pas de justifier d'une production de CO₂ conséquente.



Zones dont la densité de population est supérieure à 25 habitants par km² (Source : Edgard)

Si on recoupe les ressources avec les contraintes techniques, on obtient les zones qui permettraient potentiellement de produire des biocarburants à partir de micro-algues, tout en assurant une partie du traitement des eaux usées et en fixant une portion du CO₂ émis par les activités humaines. Ces espaces doivent être un compromis entre zones suffisamment peuplées pour apporter des nutriments et du CO₂ en quantités suffisantes, et zones pas trop denses en populations pour s'affranchir des contraintes techniques. On considère donc des zones ayant au moins 25 habitants ou un bovin ou 25 porcs par km². Compte-tenu des nutriments disponibles, la production d'algues est estimée à 10000 tonnes en biomasse par km².



Secteurs adaptés à la production de micro-algues en tenant compte des ressources disponibles et des contraintes d'infrastructures

Force est de constater, que les sites potentiellement intéressants sont relativement limités et qu'ils se situent pour la plupart dans les pays du Sud, du fait des contraintes climatiques. Nous avons vu que la production de biodiesel à partir de micro-algues est une activité à haute intensité en capital, à cause du coût des infrastructures de départ. Dans les pays les moins avancés, il est peu probable que ce type d'installation voit le jour compte-tenu de la valeur trop élevée de l'investissement. Cependant, ce type de projet pourrait être financé par des mécanismes de type MDP dans le cadre de Kyoto, tout du moins si son efficacité est reconnue dans fixation du CO₂.

Une estimation du CO2 fixée peut être établie sur la base des hypothèses précédentes. Il faut toutefois être prudent car il s'agit d'ordres de grandeurs plus qu'approximatifs compte-tenu des hypothèses faites.

Source	Eaux usées municipales		Déchets élevages bovins		Déchets élevages porcins		TOTAL	
	Mtonne	%	Mtonne	%	Mtonne	%	Mtonne	%
Production de micro-algues								
Afrique	9	34	4	14	0	3	14	24
Amérique	6	28	7	15	3	15	16	18
Asie	21	25	17	32	15	27	53	27
Europe	1	34	1	40	1	32	3	35
Moyen-Orient	1	32	0	25	0	0	1	30
Océanie	4	52	0	0	0	15	4	39
TOTAL	41	29	30	22	20	23	90	25

Compte-tenu de ces approximations, on estime le potentiel mondial de production annuelle de micro-algues à 90 millions de tonnes en biomasse à l'horizon 2020. Cela correspondrait donc à 160 Mtonnes de CO2 fixé par an, soit 45 Mtonnes de C fixé par an.

Comparé aux émissions anthropiques annuelles de carbone de 6,4 Gtonnes, cela représente une petite contribution de 0,7%...