

# Le biodiesel algal l'emporte sur le bioéthanol

Yusuf Chisti, École d'ingénieurs, Université de Massey, Private Bag 11 222, Palmerston North, Nouvelle-Zélande En ligne depuis le 24 janvier 2008.

Traduction de l'anglais réalisée par **Sophie DESLANDES**. Août 2008.

Aujourd'hui, nous avons besoin des biocarburants pour remplacer les carburants d'origine pétrolière utilisés pour les transports. Ces derniers contribuent au réchauffement climatique et constituent une ressource épuisable. Le biodiesel et le bioéthanol sont les deux carburants renouvelables potentiels qui se sont le plus démarqués. Il est démontré ici qu'en utilisant les méthodes actuelles, le biodiesel et le bioéthanol produits à partir de cultures agricoles ne peuvent pas remplacer de façon durable les combustibles fossiles utilisés pour les transports. Toutefois, il existe une alternative à ces carburants. En effet, le biodiesel produit à partir de microalgues semble constituer le seul biocarburant capable de remplacer complètement les carburants d'origine pétrolière utilisés pour les transports sans pour autant affecter l'approvisionnement en nourriture et en produits agricoles divers. Les cultures oléagineuses les plus productives, comme le palmier à huile, sont loin d'égaliser les microalgues dans la production des quantités nécessaires de biodiesel sur le long terme. Le bioéthanol produit à partir de canne à sucre se classe également loin derrière.

## Le biodiesel et le bioéthanol produits à partir de cultures agricoles ne constituent pas une solution durable

À terme, en raison du réchauffement climatique, les combustibles liquides renouvelables neutres en carbone seront amenés à remplacer intégralement les carburants d'origine pétrolière utilisés pour les transports. On produit actuellement du biodiesel issu de cultures oléagineuses et du bioéthanol de canne à sucre dans des quantités de plus en plus importantes. Pourtant, la production à grande échelle de ces biocarburants ne peut pas s'inscrire dans la durée. Une des solutions à ce problème repose sur l'utilisation des microalgues.

Les microalgues sont des micro-organismes photosynthétiques qui convertissent la lumière du soleil, l'eau ainsi que le dioxyde de carbone en biomasse algale. De nombreuses espèces de microalgues sont extrêmement riches en huile [1] et [2] ; les technologies actuelles permettent de transformer cette huile en biodiesel. Cet article étudie la capacité des microalgues à produire du biodiesel de façon durable en vue de remplacer l'intégralité des combustibles d'origine pétrolière utilisés pour les transports (comme l'essence, le carburéacteur et le gazole) et ce, sans effet négatif sur l'approvisionnement en nourriture et en produits agricoles divers, contrairement aux cultures oléagineuses les plus productives. Il est démontré plus loin que le biodiesel à base de microalgues constitue une meilleure alternative aux combustibles fossiles que le bioéthanol de canne à sucre, le biocarburant le plus largement utilisé à l'heure actuelle [3].

La teneur en huile de certaines microalgues dépasse 80 % de leur poids sec [1] et [2]. On produit principalement du biodiesel à partir de cultures oléagineuses comme le soja et le palmier à huile ; toutefois, leur rendement en huile est extrêmement réduit (moins de 5 % de la biomasse totale) comparé à celui des microalgues [1]. Par conséquent, ces cultures ne peuvent servir qu'à produire une faible quantité de biodiesel qui sera mélangé à du pétrodiesel à hauteur de quelques pourcents. Elles ne peuvent donc en aucun cas fournir les quantités importantes nécessaires pour remplacer complètement tous les carburants d'origine pétrolière

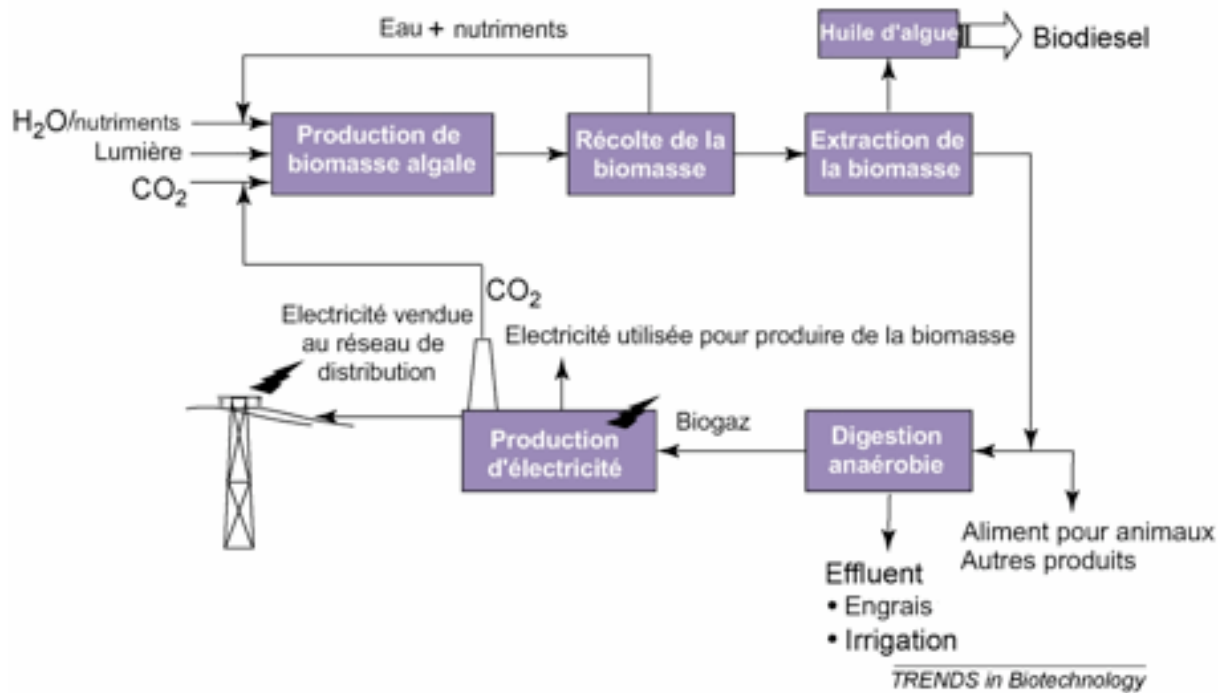
utilisés pour les transports [1]. Le palmier à huile, par exemple, qui est l'une des cultures oléagineuses les plus productives, fournit seulement 5 950 litres d'huile par hectare [1]. Le rendement en biodiesel à partir d'une huile de végétaux supérieurs correspond à 80 % du rendement d'huile à l'hectare. Si la totalité du carburant d'origine pétrolière utilisé pour les transports était remplacée par du biodiesel, un pays comme les États-Unis aurait besoin de près de 530 millions de m<sup>3</sup> de biodiesel par an [1], d'après le taux de consommation actuel. La production d'une telle quantité de biodiesel à partir de palmiers à huile nécessiterait 111 millions d'hectares, ce qui représente environ 61 % des terres cultivables des États-Unis. La culture de palmiers à huile à cette échelle ne serait donc pas réaliste, dans la mesure où il ne resterait plus suffisamment de terres arables consacrées à la production de nourriture, de fourrage et d'autres cultures.

Au vu de ces chiffres, il paraît évident que les cultures oléagineuses ne pourront pas remplacer les carburants liquides d'origine pétrolière dans un avenir proche. En revanche, cela deviendrait possible si les microalgues étaient utilisées comme source de biodiesel.

Dans un système de production adapté situé dans une zone tropicale, la productivité annuelle moyenne de la biomasse microalgale peut atteindre environ 1,535 kg m<sup>-3</sup> j<sup>-1</sup> [1] et [4]. À ce niveau de productivité de biomasse et si l'on suppose une teneur en huile moyenne égale à 30 % de la matière sèche de la microalgue en question, la production d'huile par hectare est de 123 m<sup>3</sup> sur 90 % de l'année civile (étant donné que sur une période d'environ 10 % de l'année, la production est arrêtée pour cause de maintenance et de nettoyage de l'unité de production). Cela porte le rendement en biodiesel algal à 98,4 m<sup>3</sup> par hectare. Par conséquent, pour produire les 530 millions de m<sup>3</sup> de biodiesel dont les États-Unis ont besoin pour leurs transports, il faudrait cultiver des microalgues sur une surface de 5,4 millions d'hectares, soit seulement 3 % de la surface cultivable du pays. Cela resterait possible, même si la biomasse algale contenait seulement 15 % d'huile par poids sec. L'utilisation des microalgues comme source de biodiesel est donc d'un réalisme sans égal comparé aux autres sources potentielles de biodiesel. Les microalgues possèdent également un autre avantage : contrairement aux autres cultures oléagineuses, elles présentent une croissance extrêmement rapide et doublent généralement leur biomasse en 24 heures. Le temps de doublement de la biomasse passe à seulement 3,5 heures durant la période de croissance exponentielle [1], ce qui est beaucoup plus court que pour les cultures oléagineuses.

## Un procédé intégré de production d'huile

La [figure 1](#) décrit un concept de production d'huile de microalgues en vue d'obtenir du biodiesel. Ce procédé comporte une étape de production de biomasse microalgale qui nécessite de la lumière, du dioxyde de carbone, de l'eau et des nutriments inorganiques. Ces derniers sont principalement des nitrates, des phosphates, du fer ainsi que quelques éléments traces. Habituellement, pour cultiver des microalgues marines, on utilise de l'eau de mer enrichie en engrais commerciaux à base de nitrate et de phosphate ainsi qu'en autres micronutriments [5]. On peut aussi envisager d'utiliser de l'eau douce et saumâtre provenant de lacs, rivières et aquifères. En général, ces éléments sont peu coûteux [1]. Dans une infrastructure permettant de produire 100 tonnes an<sup>-1</sup>, le coût de production de la biomasse algale a été estimé à environ 3 000 \$ ton<sup>-1</sup> [1], mais le coût à la tonne baisse significativement à mesure que l'échelle de production augmente.



**Figure 1.** Concept de production d'huile à partir de microalgues visant à obtenir du biodiesel. Lors de l'étape de production de biomasse, on fournit de l'eau, des nutriments inorganiques, du dioxyde de carbone et de la lumière à la culture microalgale. Lors de la récolte de la biomasse, les cellules en suspension dans le milieu de culture sont séparées de l'eau et des nutriments résiduels, qui sont ensuite réutilisés pour la production de biomasse. L'huile d'algue est extraite de la biomasse récoltée puis convertie en biodiesel au cours d'un processus isolé. Une partie de la biomasse résiduelle peut servir d'aliment pour animaux ; on peut également envisager d'en extraire d'autres produits à haute valeur ajoutée. La majeure partie de la biomasse subit une digestion anaérobie produisant du biogaz utilisé pour générer de l'électricité. Les effluents du digesteur anaérobie sont utilisés comme engrais riche en nutriments et comme eau d'irrigation. La majeure partie de l'électricité produite à partir du biogaz est consommée lors de la production de biomasse. La partie restante est vendue au réseau de distribution d'électricité. Le dioxyde de carbone émis lors de la production d'électricité est utilisé pour la production de biomasse.

Environ la moitié de la matière sèche de la biomasse microalgale est constituée de carbone [6], qui est en général dérivé de dioxyde de carbone. Par conséquent, en produisant 100 tonnes de biomasse algale, on fixe aux alentours de 183 tonnes de dioxyde de carbone. Ce dernier doit être fourni en continu pendant la journée. La production de biomasse microalgale peut éventuellement être réalisée à partir d'une partie du dioxyde de carbone rejeté par des centrales électriques lors de la combustion de carburants fossiles [7] et [8]. Ce dioxyde de carbone est souvent disponible à un coût réduit ou même gratuitement.

Afin de récolter la biomasse, il est nécessaire de traiter le milieu de culture obtenu lors de la production des microalgues [9]. L'eau et les nutriments résiduels récupérés au cours de cette étape peuvent être réinjectés dans un nouveau cycle (Figure 1). La pâte contenant les microalgues concentrées est extraite à l'aide d'un solvant non miscible à l'eau pour récolter l'huile d'algue. Cette dernière peut par la suite être convertie en biodiesel en utilisant les méthodes existantes [1]. Il a déjà été démontré que l'extraction d'huile à partir de biomasse microalgale est réalisable [6] et [10]. Il est en outre préférable que le solvant (exemple : hexane) nécessaire à l'extraction soit ensuite récupéré et recyclé.

Une fois l'huile extraite, le résidu de biomasse pourrait servir d'aliment pour animaux riche en protéines et éventuellement constituer de petites quantités d'autres produits algaux à haute valeur ajoutée [5], [11] et [12]. Dans les deux cas, les revenus issus de la vente de ces résidus de biomasse pourraient compenser les coûts liés à la production de biodiesel. Néanmoins, on suppose que la majeure partie du résidu de biomasse algale provenant de l'extraction d'huile subira une digestion anaérobie en vue de produire du biogaz. Ce dernier constituera la source principale d'énergie pour la majeure partie de la production et de la transformation de la biomasse algale. Un surplus d'énergie devrait être obtenu et pourrait ensuite être vendu au réseau de distribution d'électricité afin d'améliorer davantage la rentabilité du concept. La vente d'engrais riche en nutriments et d'eau d'irrigation produits au cours de la digestion anaérobie pourrait représenter une source de revenus supplémentaires (Figure 1).

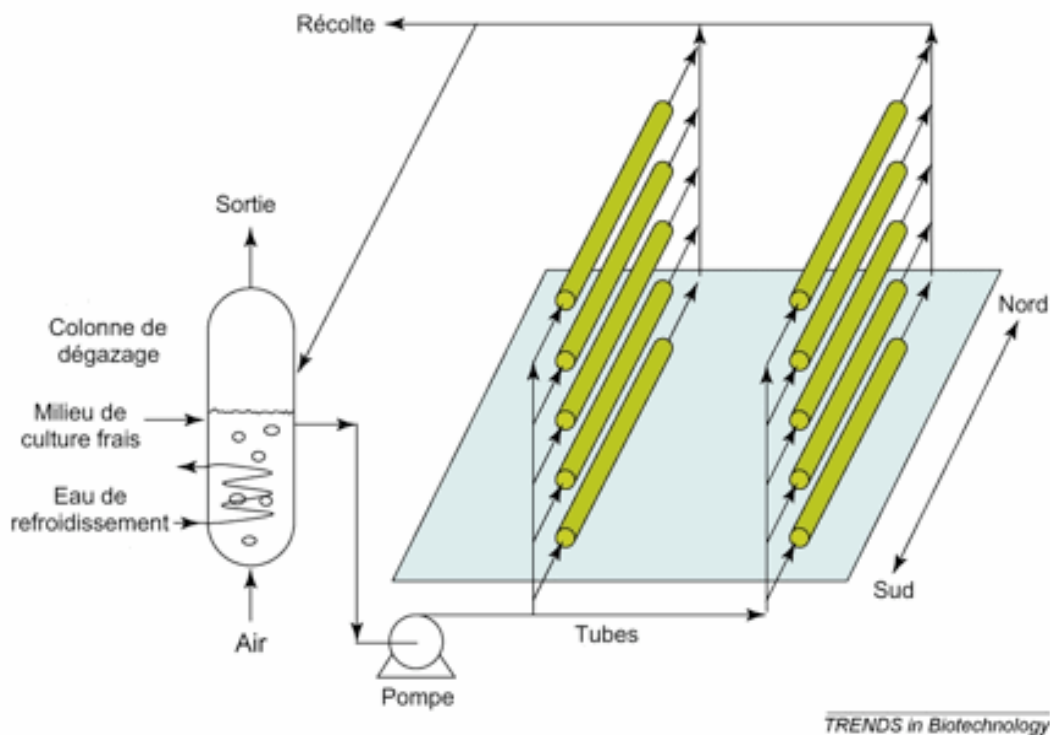
La technologie de digestion anaérobie de déchets organiques existe et est couramment employée [13], de même que celle destinée à convertir du biogaz en énergie électrique/mécanique. Le dioxyde de carbone généré par la combustion de biogaz pourrait être recyclé directement pour produire la biomasse microalgale (Figure 1).

Le contenu énergétique du biogaz produit par digestion anaérobie oscille habituellement entre  $16\,200\text{ kJ m}^{-3}$  et  $30\,600\text{ kJ m}^{-3}$  selon la nature de la biomasse. En règle générale, le rendement de biogaz est compris entre 0,15 et 0,65  $\text{m}^3$  par kg de biomasse sèche. Partant de valeurs moyennes en termes de contenu énergétique et de rendement de biogaz, la production de biogaz à partir de matières solides (microalgues), une fois 30 % de l'huile qu'elles contiennent éliminée, pourrait fournir au moins 9 360 MJ d'énergie par tonne. Il s'agit d'une quantité importante qui devrait permettre d'alimenter le procédé de production de biomasse microalgale.

Idéalement, le biodiesel algal pourrait être neutre en carbone, dans la mesure où l'énergie nécessaire à la production et à la transformation des algues proviendrait du biodiesel lui-même et du méthane produit par digestion anaérobie de la biomasse restant après extraction de l'huile. Mais, même dans ce cas, sa production ne permettra pas de réduire les quantités de CO<sub>2</sub> qui s'est déjà accumulé suite à la combustion de carburants fossiles.

## **Production de biomasse microalgale**

La production de biodiesel à partir de microalgues nécessite de grandes quantités de biomasse algale. Afin de réduire les coûts au maximum, la biomasse doit être produite en utilisant la lumière solaire, sachant que son intensité est affectée par des variations saisonnières et journalières, notamment. Les microalgues peuvent être cultivées à grande échelle dans des photobioréacteurs [4], [5], [12], [15], [16], [17], [18] et [19]. Il existe de nombreux types de photobioréacteurs, mais il semble que les photobioréacteurs tubulaires soient les plus adaptés pour produire les quantités de biomasse algale nécessaires à la production de biocarburant (Figure 2).



**Figure 2.** Photobioréacteur tubulaire comportant des capteurs solaires disposés en parallèle. Le milieu de culture provenant de la colonne de dégazage est pompé en continu dans les tubes où la lumière est absorbée. Il retourne ensuite dans la colonne de dégazage. Du milieu de culture frais est introduit de façon continue dans la colonne de dégazage pendant la journée et une quantité équivalente du milieu de culture situé à l'intérieur du dispositif est extraite du courant qui retourne dans la colonne. En vue de contrôler la température, de l'eau de refroidissement est utilisée. Celle-ci passe par le serpentin d'un échangeur thermique situé dans la colonne de dégazage. Cette dernière est aérée en continu afin d'évacuer l'oxygène accumulé au cours de la photosynthèse. On élimine également le gaz de sortie de la colonne.

Un photobioréacteur tubulaire est constitué d'un ensemble de tubes transparents placés en parallèle généralement en plastique ou en verre. Ces tubes, que l'on peut qualifier de capteur solaire, capturent la lumière du soleil nécessaire à la photosynthèse (Figure 2). Ils ont habituellement un diamètre de moins de 10 cm afin de permettre à la lumière d'atteindre la majeure partie des cellules en suspension. Le milieu de culture circule dans un réservoir (tel que la colonne de dégazage illustrée sur la Figure 2), puis dans le capteur solaire et revient ensuite dans le réservoir [1]. Généralement, pendant la journée, la culture a lieu en continu dans le photobioréacteur [1].

Une culture en continu implique que l'on introduise du milieu de culture frais à un rythme constant et que la quantité équivalente de milieu contenant les microalgues soit extraite en permanence. Pendant la nuit, l'apport en milieu de culture est interrompu. Néanmoins, le brassage du milieu doit perdurer afin d'éviter toute sédimentation de la biomasse [5]. La nuit, jusqu'à 25 % de la biomasse produite pendant la journée peut être consommée pour maintenir les cellules en vie jusqu'au lever du soleil [1], [20] et [21]. L'ampleur de cette consommation dépend de l'intensité lumineuse enregistrée dans la journée, ainsi que de la température relevée au cours de la croissance des microalgues (journée) et pendant la nuit.

Afin d'optimiser la capture de la lumière du soleil, les tubes dans le capteur solaire sont en général orientés nord-sud (Figure 2) [4] et [5]. La disposition des tubes, comme illustré sur la

[Figure 2](#), permet d'en utiliser un maximum dans une zone donnée. La surface située sous le capteur solaire est peinte en blanc ou recouverte de morceaux de plastique blancs [\[1\]](#), [\[5\]](#) et [\[16\]](#) afin d'augmenter la réflectance ou albédo, ce qui aura pour effet d'accroître la quantité de lumière diffusée dans les tubes.

La sédimentation de la biomasse dans les tubes est empêchée grâce à un écoulement très turbulent maintenu en permanence. Ce dernier est produit au moyen d'une pompe mécanique (comme illustré sur la [Figure 2](#)) ou d'une pompe airlift, moins puissante et limitant ainsi le risque d'altérer les microalgues [\[6\]](#), [\[22\]](#), [\[23\]](#), [\[24\]](#) et [\[25\]](#). Par ailleurs, les pompes airlift sont plus fréquemment utilisées [\[5\]](#), [\[12\]](#), [\[26\]](#), [\[27\]](#) et [\[28\]](#), car leur coût d'installation est moins élevé que celui des pompes mécaniques. Enfin, elles ne contiennent aucune pièce mobile susceptible de présenter un dysfonctionnement. En revanche, les pompes airlift sont moins polyvalentes que les pompes mécaniques et peuvent être difficiles à concevoir [\[28\]](#), [\[29\]](#) et [\[30\]](#).

La photosynthèse produit de l'oxygène. Dans la plupart des régions, avec une irradiance de milieu de journée, le taux maximum de production d'oxygène dans un photobioréacteur tubulaire classique peut atteindre  $10 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ min}^{-1}$ . Les teneurs en oxygène dissous, qui sont bien plus élevées que le taux de saturation de l'air, inhibent la photosynthèse [\[27\]](#). Par ailleurs, une forte concentration en oxygène dissous associée à une forte intensité solaire provoque une photooxydation des cellules algales, ce qui a pour effet de les endommager. Afin d'éviter ce phénomène, la concentration maximale tolérée en oxygène dissous ne doit pas dépasser 400 % du taux de saturation de l'air [\[27\]](#). Dans la mesure où l'oxygène accumulé dans le tube d'un photobioréacteur ne peut être éliminé, la longueur maximale de l'ensemble des tubes est limitée. Afin d'enlever l'oxygène, la culture est régulièrement renvoyée vers une zone de dégazage dans laquelle elle est aérée ([Figure 2](#)) [\[1\]](#). En règle générale, la longueur totale des tubes ne dépasse pas 80 m [\[27\]](#) ; toutefois, elle dépend d'un certain nombre de facteurs, comme la concentration de la biomasse, l'intensité lumineuse, le taux d'écoulement et la concentration en oxygène à l'entrée du tube.

Le passage dans la zone de dégazage doit non seulement éliminer l'oxygène dissous qui s'est accumulé, mais aussi enlever les bulles de gaz du milieu de culture avant qu'il ne retourne dans les tubes du capteur solaire. La présence de trop nombreuses bulles de gaz dans les tubes affecte l'absorption de la lumière et réduit l'écoulement du milieu de culture dans les tubes. La possibilité de concevoir d'éventuels séparateurs gaz-liquide permettant d'éliminer la totalité des bulles a été envisagée [\[29\]](#) et [\[31\]](#). Un élément important à prendre en compte concernant une zone de dégazage est que son volume doit rester réduit comparé au volume du capteur solaire. Cela est dû au fait que les zones de dégazage sont en général plus profondes et laissent plus difficilement pénétrer la lumière que les tubes du capteur solaire, ce qui diminue la croissance des microalgues.

Le pH de la culture est un autre facteur affectant la performance d'un photobioréacteur. À mesure que le milieu de culture se déplace dans l'un des tubes du photobioréacteur, son pH augmente en raison de la consommation de dioxyde de carbone [\[32\]](#). Afin d'éviter ce phénomène, du dioxyde de carbone est introduit dans la zone de dégazage en fonction des indications fournies par un régulateur de pH. Par ailleurs, des points d'injection de dioxyde de carbone supplémentaires placés à différents intervalles le long des tubes peuvent éviter une quantité limitante en carbone ainsi qu'une augmentation excessive du pH [\[5\]](#).

La température optimale pour la croissance de nombreuses espèces de microalgues se situe entre 20 et 30 °C. Une température qui n'est pas comprise dans cet intervalle peut endommager, voire tuer les cellules. Dans les tubes du photobioréacteur, le milieu de culture,

exposé à la lumière solaire, surchauffe rapidement. C'est pourquoi il est vital de faire baisser sa température pendant la journée. Il peut également se révéler utile de contrôler la température du milieu de culture au cours de la nuit. En effet, une température trop basse risque d'endommager les cellules. La perte de biomasse au cours de la nuit due à la respiration peut, par exemple, être limitée en faisant baisser la température de quelques degrés en dessous du seuil optimal de croissance de l'algue donnée. Il est possible de refroidir des photobioréacteurs tubulaires extérieurs de manière efficace et peu coûteuse à l'aide d'échangeurs thermiques. Ils peuvent être placés dans la colonne de dégazage, comme illustré sur la [Figure 2](#), ou dans la boucle tubulaire. On peut avoir recours à une méthode de refroidissement par évaporation consistant à asperger de l'eau sur les tubes [\[16\]](#), comme ce fût le cas avec succès dans des zones au climat sec, en Israël, par exemple.

Il convient d'arrêter d'utiliser le photobioréacteur au moins une fois par an pour cause de nettoyage et de maintenance. Il est également nécessaire de nettoyer et de désinfecter le dispositif si la culture échoue en raison d'une contamination par des parasites et des algues indésirables. Un photobioréacteur commercialisé doit pouvoir être nettoyé rapidement afin que la production reprenne au plus vite. En règle générale, on a recours à des méthodes de nettoyage sur place automatisé qui ne nécessitent pas de démonter le dispositif [\[33\]](#) et [\[34\]](#).

## **Le biodiesel algal préférable au bioéthanol**

Il est intéressant de comparer le potentiel du biodiesel algal à celui du bioéthanol de canne à sucre. En effet, sur une base énergétique équivalente, il est possible de produire du bioéthanol à partir de canne à sucre au même prix que l'essence [\[35\]](#). Par ailleurs, l'utilisation du bioéthanol comme carburant pour les transports est répandue. La canne à sucre constitue la source de bioéthanol la plus productive [\[35\]](#). Au Brésil, par exemple, le meilleur rendement en bioéthanol produit à partir de canne à sucre est de 7,5 m<sup>3</sup> par hectare [\[35\]](#). Néanmoins, le contenu énergétique du bioéthanol équivaut à seulement 64 % du contenu énergétique du biodiesel. C'est pourquoi, si toute l'énergie associée aux 530 millions de m<sup>3</sup> de biodiesel dont les États-Unis ont besoin chaque année [\[1\]](#) devait provenir du bioéthanol, il en faudrait près de 828 millions de m<sup>3</sup>. Il faudrait alors planter de la canne à sucre sur une surface de 111 millions d'hectares, soit 61 % de la surface cultivable disponible aux États-Unis.

La majeure partie de l'énergie nécessaire pour cultiver la canne à sucre et pour la transformer en éthanol provient de la combustion de déchets de canne à sucre, appelés également bagasse. Pour chaque unité d'énergie fossile utilisée pour produire de l'éthanol de canne à sucre, 8 unités d'énergie sont récupérées [\[35\]](#). Il semble possible d'obtenir le même chiffre avec le biodiesel algal. En effet, en termes de matière sèche totale (comprenant le sucre), la canne à sucre atteint généralement 75 tonnes de biomasse par hectare, ce qui est très peu en comparaison avec les 158 tonnes par hectare pour la biomasse microalgale. Par ailleurs, même dans des conditions optimales, le rendement en biomasse de canne à sucre ne dépasse pas 100 tonnes par hectare. À des niveaux équivalents d'énergie pour la biomasse totale, la production de biomasse par hectare plus importante pour la canne à sucre est en réalité le reflet de la quantité plus élevée d'énergie solaire stockée par hectare.

## **Perspectives du biodiesel algal**

Les obstacles relatifs à la culture de microalgues à grande échelle sont principalement d'ordre économique ([Encadré 1](#)). Néanmoins, les progrès en matière de technologie pourraient augmenter les rendements de la production de biodiesel. Les problèmes technologiques

actuels résident dans l'efficacité limitée des méthodes de récolte de la biomasse algale à partir des milieux de culture dilués situés dans les photobioréacteurs. En outre, il est nécessaire de mettre au point des techniques d'extraction permettant de récupérer l'huile d'algue à partir des pâtes d'algues humides sans passer par une étape de séchage.

La capacité de production de biomasse algale (c'est à dire la productivité) d'un photobioréacteur donné dépend de la latitude géographique de l'endroit où il se trouve. En effet, le régime de lumière varie en fonction des situations géographiques. Lorsque l'on envisage de construire un dispositif de production d'algues, afin de déterminer sa taille, le coût d'investissement et les dépenses de fonctionnement qu'il engendrera, il est nécessaire de pouvoir calculer la quantité de biomasse et d'huile qui y sera produite dans une région donnée. En raison du manque de connaissances actuel en matière d'ingénierie des photobioréacteurs, les estimations de ce type ne sont pas toujours fiables. Le développement à venir de l'ingénierie des photobioréacteurs permettra de réaliser des estimations de productivité plus précises et de créer des photobioréacteurs plus performants.

L'ingénierie génétique et métabolique constitue une approche différente et complémentaire en vue d'augmenter la productivité des microalgues. Elle permettra probablement de rendre la production de biodiesel algal plus rentable [1]. Il s'agit d'un fait reconnu depuis les années 90 [36], [37] et [38], mais il semble que peu de progrès aient été réalisés pour le moment dans ce domaine et que l'ingénierie génétique des algues soit très en retard par rapport à l'ingénierie des bactéries, des champignons ainsi que des eucaryotes supérieurs. Il a été démontré que la production de transformants stables de microalgues est complexe [39] et [40], même si des stratégies de transformation efficace sont en cours de développement [40]. L'ingénierie génétique et métabolique des microalgues s'est focalisée sur la production de substances bioactives à haute valeur ajoutée et non oléagineuses [41] et [42]. Cette situation est susceptible de changer en raison du récent regain d'intérêt pour la production durable de biocarburants. On peut avoir recours à l'ingénierie moléculaire pour :

- 1 – améliorer l'efficacité photosynthétique et la production de biomasse par rapport à la quantité de lumière utilisée ;
- 2 – augmenter le taux de croissance de la biomasse ;
- 3 – accroître le contenu en huile de la biomasse ;
- 4 – améliorer la tolérance à la température des algues afin de les refroidir moins fréquemment et donc de minimiser les coûts.

La photoinhibition est un autre point important qui pourrait être abordé par les spécialistes en ingénierie métabolique. En effet, tout comme les plantes, lorsque les microalgues sont soumises à une quantité élevée de lumière solaire, un phénomène de photoinhibition est observé ; autrement dit, la photosynthèse est ralentie une fois que l'intensité lumineuse dépasse une certaine valeur. Si aucune photoinhibition n'apparaissait chez des algues modifiées génétiquement ou si le seuil de photoinhibition était plus élevé chez ces organismes, la production de biodiesel augmenterait de façon significative.

Les procédés industriels nécessitent des souches modifiées stables par nature. Ils requièrent également une compréhension des méthodes permettant d'éviter qu'une souche instable perde les caractéristiques qui lui ont été attribuées lors de manipulations génétiques [43], même si à l'heure actuelle, on a peu de connaissances dans ce domaine concernant les microalgues.



## **Conclusion**

Comme évoqué précédemment, le biodiesel algal est le seul biodiesel qui a le potentiel de remplacer complètement les carburants liquides d'origine pétrolière utilisés pour les transports. Contrairement au bioéthanol de canne à sucre, le biodiesel algal pourrait satisfaire la demande actuelle en carburants liquides pour les transports de façon durable. La biomasse algale nécessaire pour produire de grandes quantités de biodiesel pourrait être cultivée dans des photobioréacteurs. Toutefois, cela nécessite une estimation précise des coûts de production afin que ce biocarburant soit rentable comparé aux carburants d'origine pétrolière. Dans le cadre d'un développement durable, il est capital de réussir à produire du biodiesel algal à un coût réduit. Malgré les efforts importants réalisés actuellement pour produire de l'huile de microalgues à l'échelle industrielle, très peu de biodiesel algal a été produit jusqu'ici.