

Quand nos voitures rouleront aux algues

Bilan carbone médiocre, concurrence avec l'alimentation..., les biocarburants actuels déçoivent. Tout devrait changer avec les microalgues. Gorgées de lipides ou d'hydrogène, elles pourraient un jour faire démarrer nos moteurs.

Tout le monde a oublié que les premiers moteurs à explosion ou Diesel, à la fin du XIX^e siècle, fonctionnaient à l'éthanol et à l'huile d'origine végétale. Un siècle plus tard, la pénurie annoncée des produits pétroliers et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre nous ont fait redécouvrir les carburants issus de matières premières végétales. Avec l'idée enthousiasmante qu'ils diminueraient la pollution automobile. Mais l'euphorie des débuts est vite retombée. Désormais l'espoir repose sur des organismes aquatiques inattendus, les algues.

La première génération de biocarburants (ou « agrocarburants »), les seuls à être produits industriellement aujourd'hui, n'a pas été à la hauteur des espérances.

D'abord, les productions de bioéthanol, à partir des sucres de la betterave, de la canne à sucre, du blé ou encore du maïs entrent en

compétition avec les cultures alimentaires. C'est également le cas pour le biodiesel fabriqué à partir des huiles de colza, de tournesol, de palme et de soja.

En 2008, les experts de la Banque mondiale concluaient que la production d'agrocarburants aux États-Unis et en Europe était en grande partie responsable de la hausse du cours des matières premières alimentaires. Ensuite, la culture intensive de ces végétaux nécessite quantité d'engrais et de pesticides et, surtout, d'importantes ressources en eau. Enfin, pour répondre à la demande mondiale, des milliers d'hectares de forêts tropicales ont été rasés en Indonésie, en Malaisie, et même au Brésil, dans le but d'être convertis en champs de palmiers à huile ou de cannes à sucre.

Si l'on ajoute à cette liste déjà longue un bilan mitigé en termes d'émissions de gaz à effet de serre (lire « Une première génération peu vertueuse », p. 54), on comprend que les agrocarburants ne

Gilles Peltier est directeur de recherche au CEA. Il dirige le laboratoire de bioénergétique et biotechnologie des bactéries et microalgues (unité mixte de recherche CEA-CNRS, université d'Aix-Marseille), au centre de Cadarache.

*L'hydrolyse enzymatique est une réaction chimique catalysée par des enzymes.

pourront jamais se substituer aux carburants conventionnels.

Une deuxième génération de biocarburants est en phase finale de mise au point. Elle exploite, non plus simplement les sucres ou l'huile contenus dans quelques organes spécialisés des plantes mais l'ensemble des molécules qui les constituent, en particulier les polymères complexes des parois cellulaires (cellulose, hémicellulose, lignine). Ces biocarburants peuvent donc être produits aussi bien à partir de plantes entières non alimentaires à forte productivité (*Miscanthus giganteus* ou herbe à éléphant, *Jatropha curcas*, etc.) que des résidus de récolte, du bois...

DES BIOCARBURANTS DE TROISIÈME GÉNÉRATION

Différentes méthodes sont à l'étude pour convertir cette biomasse en biocarburants. Les procédés « thermochimiques » reposent sur la transformation des végétaux en un gaz qui est ensuite utilisé pour produire des carburants liquides. Avec, l'autre voie dite « biologique », les polymères végétaux sont d'abord transformés en sucres par hydrolyse enzymatique*, puis ces sucres sont convertis en éthanol par fermentation. Ces deux voies sont actuellement testées en France au travers de deux projets de démonstration afin d'évaluer la viabilité économique de cette filière et son impact environnemental. Il s'agit

de BioTfuel et Futurol, portés chacun par différents partenaires issus du monde de la recherche, de l'industrie et de la finance.

Les biocarburants de deuxième génération sont probablement appelés à jouer un rôle croissant dans le futur. Mais leur déploiement sera, lui aussi, limité par le manque de terres disponibles. Et l'accessibilité des ressources en biomasse. C'est pourquoi de nombreuses équipes, dont notre laboratoire, explorent une autre piste, plus futuriste encore, celle des algocarburants. Il s'agit cette fois-ci d'utiliser les sucres ou les lipides produits naturellement par des microalgues et des cyanobactéries* pour élaborer des biocarburants, dits de « troisième génération ».

Les microalgues sont des organismes unicellulaires ubiquistes : elles se développent naturellement aussi bien dans les mers que dans les rivières et les lacs que dans le sable des déserts ou la neige des glaciers. Certaines sont cultivées pour l'agroalimentaire. Mais leur culture n'est économiquement viable que pour des productions à haute valeur ajoutée, destinées à l'aquaculture – nourriture des alevins – ou à l'alimentation humaine (compléments alimentaires tels que les acides gras polyinsaturés, les antioxydants, les pigments caroténoïdes). En 2009, 10 000 tonnes de microalgues ont ainsi été produites dans le monde.

Au-delà de leur utilisation alimentaire, les microalgues ont plusieurs propriétés fort intéressantes en matière d'énergie pour l'élaboration de biocarburants. Tout d'abord, ces micro-organismes synthétisent quantité de lipides (huiles), de sucres (sous forme d'amidon) ou d'hydrogène à partir desquels peuvent être élaborés des biocarburants. Ainsi, les chloroplastes (de minuscules lentilles gorgées de chlorophylle où se déroule la photosynthèse) de *Chlamydomonas reinhardtii*, l'espèce modèle des

*Les cyanobactéries sont des bactéries photosynthétiques productrices d'oxygène.

*Les chlorophycées sont une classe d'algues vertes.

*Les diatomées sont des algues unicellulaires possédant une coque de silice.

*Les photobioréacteurs sont des bassins fermés dans lesquels les conditions sont contrôlées de façon à optimiser le développement des micro-organismes et donc la production de biomasse.

INITIATIVES POUR L'AVENIR

chercheurs, sont dotés d'une enzyme, l'hydrogénase, qui permet de convertir l'énergie solaire en hydrogène c'est-à-dire en un produit récupérable et utilisable, pour les piles à combustible par exemple. Certaines espèces de chlorophycées* et de diatomées* accumulent dans leurs cellules de l'amidon ou des lipides triglycérides qui peuvent représenter jusqu'à 60 % de leur masse sèche ! Après extraction, ils peuvent être convertis en biodiesel.

CERTAINES MICROALGUES SONT TRÈS PRODUCTIVES

Le deuxième avantage des microalgues tient à leur productivité : elles se multiplient très vite, si bien que leur biomasse peut

atteindre 100 tonnes par hectare et par an, soit deux à trois fois plus que celle des plantes cultivées les plus productives. La culture des microalgues, qu'elle ait lieu dans des bassins ouverts ou dans des systèmes clos (les « photobioréacteurs* »), s'avère aussi moins dispendieuse que celle des plantes. En particulier, les pertes d'eau par évaporation restent inférieures à celles des grandes cultures.

D'autres avantages sont parfois mis en avant, comme la séquestration du dioxyde de carbone (CO₂) ou une moindre compétition avec l'alimentation que les biocarburants antérieurs. Ils doivent être nuancés. En effet, au cours de la photosynthèse, les microalgues consomment du CO₂, >>>



CERTAINES MICROALGUES, comme ici en culture dans ces flacons *Chlamydomonas reinhardtii*, sont étudiées en laboratoire en vue de produire des biocarburants. Car elles sont dotées d'une enzyme, l'hydrogénase, qui permet de convertir l'énergie solaire en hydrogène.

- > Le développement des agrocarburants pour remplacer l'essence et le diesel a fait monter le cours des matières premières alimentaires.
- > L'espoir se tourne désormais vers les microalgues car elles synthétisent des huiles, des sucres ou de l'hydrogène.
- > Reste à augmenter leur productivité en les modifiant génétiquement pour qu'elles soient rentables.

Quand nos voitures rouleront aux algues

►►► mais si elles servent un jour à la production de biocarburant, ce CO₂ sera nécessairement relâché. En outre, leurs besoins en CO₂ sont tels que les cultures de masse ne sont possibles qu'aux abords immédiats des sites industriels afin de disposer d'une source abondante et bon marché, et d'éviter les coûts d'acheminement du gaz sur de grandes distances.

UN POMPAGE ET DES RÉCOLTES ÉNERGIVORES

Par ailleurs, les microalgues riches en protéines, vitamines et acides gras, peuvent constituer, comme nous l'avons déjà vu, une source alimentaire. C'est le cas des spirulines, qui représentent les deux tiers de la production mondiale de microalgues, ou des chlorelles. Enfin, on oublie souvent que, même si elles se multiplient très vite, il n'y a au final que quelques grammes seulement de matière sèche par litre de culture. Et la récupérer nécessite des opérations de pompage, d'agitation et de récolte énergivores.

Avant d'améliorer les technologies de production et de récolte, le premier défi consiste à augmenter la productivité des souches. Les récents progrès de la génomique

des céréales laissent penser que l'on pourrait améliorer aussi les souches de microalgues. En effet, c'est parce que l'homme a peu à peu sélectionné les variétés de céréales les plus productives et les plus adaptées à son mode de vie que les espèces domestiques actuelles ont fini par émerger. Or l'une des caractéristiques les plus remarquables des céréales est leur énorme capacité de stockage d'huile ou de sucres dans les organes de réserve que sont les graines ou les tubercules. Et différentes études de génomique menées aux États-Unis et en France sur le maïs ou le blé ont montré qu'un nombre réduit de gènes est concerné par cette domestication. En ce qui concerne les microalgues, les espèces cultivées actuellement n'ont fait l'objet d'aucune sélection. L'identification des gènes clés contrôlant le métabolisme énergétique cellulaire de ces microalgues permettrait donc de reprogrammer leurs cellules afin d'accroître la production de sucres et surtout d'huiles.

Comme nous l'avons vu, les chlorophycées et les diatomées accumulent naturellement quantité d'huiles dans leurs cellules. Le problème est qu'elles le font surtout lorsque les conditions de

culture ne sont pas optimales, par exemple en réponse à une carence en azote. Ce qui limite d'autant la productivité. L'objectif de nos recherches est donc de reprogrammer les cellules pour qu'elles synthétisent davantage d'huiles lorsque les conditions sont optimales. D'autres recherches, menées dans nos laboratoires du CEA ou aux États-Unis, visent à changer la nature des huiles produites. Il s'agit par exemple de favoriser la fabrication d'acides gras à courtes chaînes de carbone (moins de 14 atomes) particulièrement intéressants pour faire du biokérosène à destination de l'aéronautique. Les chercheurs tentent aussi de reprogrammer les microalgues pour qu'elles excrètent les huiles dans le milieu extracellulaire au lieu de les stocker. Ce qui permettrait de s'affranchir des étapes fort coûteuses de récolte des microalgues et d'extraction des lipides.

ALLONGER LA DURÉE DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE

Une autre piste de recherche, que nous explorons au CEA, consiste à modifier génétiquement le métabolisme en vue de produire de l'hydrogène. Comme nous l'avons dit, les chloroplastes sont le siège de la photosynthèse. C'est là que les molécules d'eau sont transformées en oxygène sous l'action de l'énergie lumineuse. Cette réaction génère des électrons qui seront utilisés dans la production d'hydrogène, sous le contrôle de l'hydrogénase. Bien qu'efficace, cette production d'hydrogène n'est que transitoire et dure quelques secondes à quelques minutes. Notre objectif est donc de modifier le métabolisme des microalgues de façon à allonger la période durant laquelle l'hydrogène est produit.

Le potentiel des microalgues est considérable. Reste que nul ne peut prédire aujourd'hui à quelle échéance elles pourront faire rouler nos voitures. ■

Une première génération peu vertueuse

Les agrocarburants sont censés limiter les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux carburants conventionnels. Comme ils sont issus de matières premières végétales, leur combustion ne fait, en théorie, que restituer à l'atmosphère les doses de dioxyde de carbone capturées par les plantes au cours de leur croissance. La réalité est cependant plus complexe. La culture intensive des végétaux, l'approvisionnement des usines de production, la transformation industrielle, la synthèse des agrocarburants puis leur transport jusqu'aux stations où ils sont délivrés... Toutes ces opérations sont énergivores et sources de gaz à effet de serre. Mais il est extrêmement difficile d'en faire un bilan précis car de nombreux paramètres entrent en ligne de compte : la nature des végétaux, les pratiques culturales, les procédés de fabrication, etc. Le bioéthanol produit en France à partir des sucres de betterave ou de céréales permettrait une réduction de 30 % à 50 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport au carburant fossile ; le biodiesel issu de la transformation de l'huile de colza d'environ 60 %. Mais ces estimations restent très controversées.