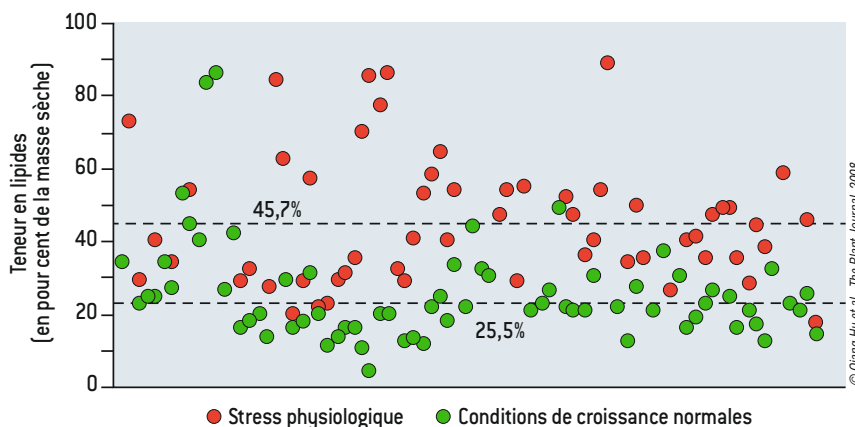


où seules des cellules spécialisées en produisent. Pour l'espèce *Chlorella vulgaris*, que nous avons particulièrement étudiée, la teneur en huile varie dans des proportions importantes : elle va de 10 à 50 pour cent de la biomasse, en fonction notamment de l'âge de la cellule et des conditions environnementales.

Comment transforme-t-on l'huile en biocarburant ? La première étape est une réaction chimique nommée transestérification, dans laquelle les acides gras sont détachés des triglycérides pour donner des alkyl-esters méthyliques ou éthyliques d'acides gras et du glycérol (voir la figure 4). Lors de la deuxième étape, le raffinage, on enlève du mélange les composants autres que les alkyl-esters d'acides gras (glycérol, lipides polaires, pigments résiduels...). On peut aussi effectuer des traitements similaires à ceux appliqués aux produits pétroliers, tel le craquage, qui consiste à scinder des molécules organiques complexes en éléments plus petits. Les carburants obtenus ressemblent à ceux dérivés du pétrole et peuvent leur être mélangés (en proportions variables selon les traitements subis) dans les infrastructures existantes.

Des coproduits pour rentabiliser la filière

Une fois les huiles algales extraites, par des solvants organiques ou d'une autre façon, la biomasse restante est constituée d'hydrates de carbone et de protéines en quantités approximativement égales. On cherche à s'en servir pour ce que l'on nomme des coproduits, afin d'optimiser économiquement la filière des algues. Les hydrates de carbone sont utilisables pour produire du méthane par digestion anaérobie (en mélangeant des micro-organismes à la biomasse) ou de l'éthanol par fermentation. Les protéines peuvent être exploitées pour l'alimentation du bétail, des poissons de pisciculture ou de l'homme. D'autres produits algaux de grande valeur, tels les acides gras oméga-3 (utilisables comme compléments alimentaires) et les antioxydants (nécessaires dans l'alimentation, afin de limiter l'endommagement oxydatif de certaines molécules, tel l'ADN), sont déjà disponibles dans le commerce, mais la demande est trop faible par rapport à celle de biocarburants ; ils ne peuvent donc rentabiliser la filière.



3. LES ALGUES VERTES sont celles qui produisent le plus de lipides, principalement sous forme de triglycérides, des molécules stockant le carbone et l'énergie (l'axe des abscisses correspond aux différentes espèces d'algues vertes). Elles sont dites oléagineuses, ce qui signifie que les lipides représentent au moins 20 pour cent de leur masse sèche. La production de lipides augmente quand les algues subissent un stress physiologique, tel un manque d'azote : la teneur moyenne des algues vertes en lipides est de 25,5 pour cent dans un environnement normal (points verts) contre 45,7 pour cent dans un environnement stressant (points rouges).

Aujourd'hui, le marché de la biomasse algale ne représente que quelques dizaines de milliers de tonnes par an. Des coproduits à haute valeur ajoutée bénéficiant d'un vaste marché restent à élaborer. C'est notamment l'objectif du projet français EIMA (Exploitation industrielle des microalgues).

Pour faire pousser des microalgues à grande échelle, nous devons développer un type d'agriculture inédit, centré sur des micro-organismes. De nouvelles méthodes de culture, de récolte et de traitement devront être élaborées. Quiconque possède une piscine mal entretenue peut confirmer que les algues croissent sans qu'on les y incite beaucoup, mais il reste à optimiser la vitesse de croissance et la densité de cellules dans le milieu de culture. En outre, il faut que les algues résistent aux prédateurs, tels les rotifères qui les broutent, et aux agents pathogènes (bactéries, champignons et virus). Enfin, elles doivent prospérer malgré la présence d'algues assimilables à de « mauvaises herbes » ; plus robustes que les souches productives, celles-ci ne sont d'aucune utilité pour les biocarburants.

De nombreuses recherches visent à maximiser la vitesse de croissance et la teneur en lipides des algues. Elles incluent la bioprospection, c'est-à-dire la traque de souches naturelles robustes dotées de ces caractéristiques et capables de prospérer sur un site de culture. Nous utilisons des techniques mises au point par les biotechnologies et les industries pharmaceutiques, notamment pour isoler des cellules algales

■ LES AUTEURS

Philip PIENKOS est biologiste moléculaire au Laboratoire américain des énergies renouvelables (NREL).

Lieve LAURENS est biochimiste au NREL.

Andy ADEN est ingénieur chimiste au NREL.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

■ SUR LE WEB

Plate-forme européenne des biocarburants : www.biofuelstp.eu

uniques à partir de prélèvements environnementaux et tester leurs propriétés. En collaboration avec l'Université du Texas, nous avons développé des méthodes pour conserver des échantillons dormants par cryogénie et les « ressusciter » à volonté, ce qui nous dispense de renouvellements réguliers et fastidieux des milieux de culture.

Les techniques d'analyse doivent encore être améliorées, afin de passer rapidement au crible plusieurs centaines ou milliers de souches individuelles. Nous avons mis au point des méthodes à haut débit par

niques classiques, telles que l'accélération des mutations (grâce à des ultraviolets, des produits chimiques...), le criblage (on sélectionne les individus aux propriétés intéressantes dans une population) ou les croisements (certaines microalgues ont une reproduction sexuée). La seconde famille de méthodes est celle du génie génétique : on module par exemple le degré d'expression des gènes.

Des projets dits de biologie systémique sont aussi en cours : ils utilisent à la fois la génomique, la transcriptomique (l'étude des ARN messagers issus de la transcription du génome) et la protéomique (l'étude des protéines) pour comprendre les mécanismes moléculaires de la produc-

tion des lipides. En France, des recherches de ce type sont notamment menées dans le cadre du projet ALGOMICS. Les informations récoltées par ces projets sont précieuses pour les expériences de génie génétique. Comme dans la bioprospection, on tente d'obtenir des algues faciles à exploiter et produisant plus de lipides sans diminuer leur croissance.

Outre *Chlorella vulgaris*, déjà mentionnée, d'autres algues eucaryotes sont étudiées, telles *Chlamydomonas reinhardtii* et différentes espèces de *Scenedesmus* et *Nannochloropsis*. *C. reinhardtii* produit peu d'huile, mais est l'algue eucaryote la mieux connue, et donc

la plus facile à exploiter pour les recherches : son génome a été entièrement séquencé et de nombreux outils de manipulation génétique sont disponibles. Quant aux espèces de *Scenedesmus* et *Nannochloropsis*, elles se développent bien dans les systèmes de culture à grande échelle et produisent beaucoup d'huile.

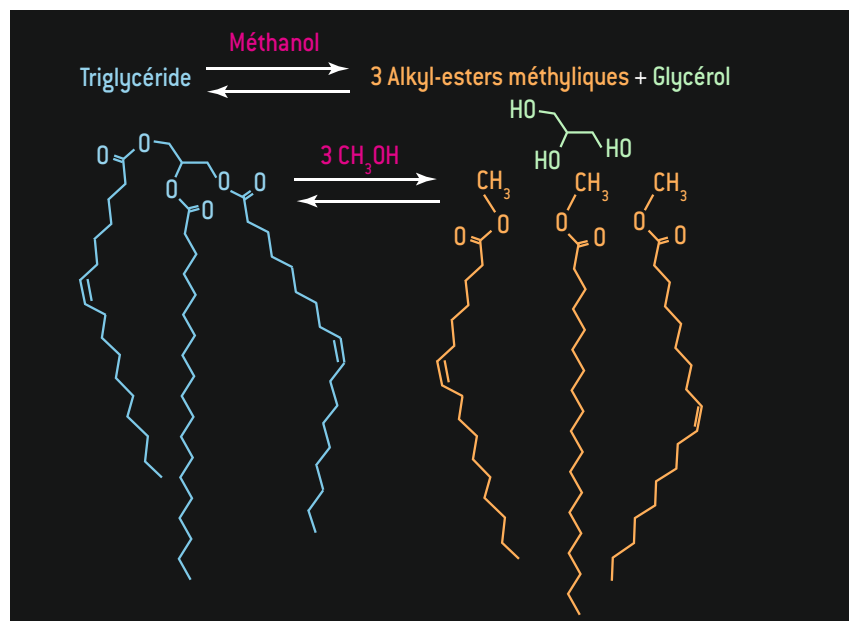
Nos travaux en génie génétique concernent aussi la cyanobactérie *Synechocystis* PCC 6803. Bien que les cyanobactéries « naturelles » ne fabriquent pas de triglycérides, nous élaborons actuellement une espèce qui en est capable. Pour cela, nous réorientons le métabolisme de la cellule pour lui faire produire des acides gras plutôt que des hydrates de carbone, et nous lui insérons des gènes nécessaires à cette production.

Le génie génétique est controversé en raison des craintes de « contamination » du milieu naturel : des cultures à grande échelle pourraient favoriser la dispersion de souches modifiées, dont les gènes risqueraient de se propager à d'autres espèces. Quoi qu'il en soit, dans les laboratoires, des règles strictes sont en place pour éviter une libération accidentelle et les recherches en génie génétique sont essentielles pour estimer le potentiel d'une souche algale. Elles doivent être menées en parallèle avec des études sur des souches naturelles ou issues de la génétique classique, et inclure une évaluation des risques, afin de prendre toutes les précautions nécessaires pour une culture à grande échelle.

LA BIOPROSPECTION ET L'AMÉLIORATION génétique des souches algales naturelles sont deux des priorités des chercheurs.

spectroscopie infrarouge pour estimer la teneur en lipides des algues. Nous les avons appliquées à des centaines d'échantillons de biomasse algale provenant de plus de 80 espèces, dont la teneur en lipides variait de 10 à plus de 60 pour cent au cours de la croissance. Ces méthodes permettent en outre de distinguer les lipides neutres des autres lipides, ce qui est difficile avec les techniques usuelles.

La bioprospection et l'amélioration génétique des souches algales naturelles sont deux des priorités des chercheurs. Cette amélioration se fait de deux façons. La première consiste à recourir aux tech-



4. LES TRIGLYCÉRIDES (EN BLEU) sont constitués de trois acides gras (les longues chaînes carbonées) liés à du glycérol par des liaisons dites ester. La trans-estérification consiste à les transformer en alkyl-esters méthyliques ou éthyliques (en orange) incorporables dans les biodiesels.

Un modèle de culture à trouver

Deux systèmes principaux ont été développés pour la culture des microalgues photosynthétiques : les bassins ouverts et les photobioréacteurs (des récipients fermés). Tous les dispositifs étudiés sont des variantes de ces deux systèmes. Certains bassins sont de conception simple : petits, d'une profondeur de 20 à 30 centimètres, ils n'ont pas de dispositif de brassage de l'eau. D'autres, plus élaborés, sont dotés de roues à aubes et leur géométrie est adaptée à la circulation de l'eau (voir la figure 5). Les bassins représentent le système le moins coûteux (en particulier ceux de conception simple), mais ils protègent peu contre les nuisibles, les prédateurs et les agents pathogènes de l'air. En outre, ils ont une faible surface par rapport à