

et à leur conversion en carburant. Ces plantes macroscopiques devraient donc rester cantonnées à leurs usages classiques, tels que les produits agroalimentaires : par exemple, on enveloppe les makis dans une algue nommée nori et on exploite les agars (des polysaccharides extraits des algues rouges) pour leurs propriétés gélifiantes.

Les microalgues sont omniprésentes dans la nature : on les trouve dans l'eau douce, l'eau de mer, les lacs hypersalés et même dans les écosystèmes désertiques et arctiques. Deux catégories principales de microalgues existent : les eucaryotes, qui possèdent des organites (noyau cellulaire, chloroplastes, mitochondries...), et les procaryotes (les cyanobactéries ou algues bleues), des bactéries photosynthétiques de structure cellulaire plus simple. On peut utiliser sur les cyanobactéries les nombreuses techniques d'ingénierie

génétique développées pour les bactéries, de sorte qu'elles sont intéressantes pour la recherche sur les biocarburants, mais elles ne fabriquent pas naturellement les huiles incorporables dans ces derniers. En revanche, les microalgues eucaryotes en synthétisent parfois en abondance.

Parmi les microalgues eucaryotes, les algues vertes, qualifiées d'oléagineuses, sont les plus riches en huiles : celles-ci peuvent représenter jusqu'à 60 pour cent de leur masse sèche cellulaire. Les algues vertes constituent un groupe d'espèces qui prospèrent dans une grande variété d'habitats et croissent rapidement.

La composition des lipides dépend notamment des espèces et des conditions dans lesquelles poussent les algues. Les lipides les plus intéressants pour les biocarburants sont ceux dits neutres, constitués de triglycérides, aussi nommés triacylglycérols ou

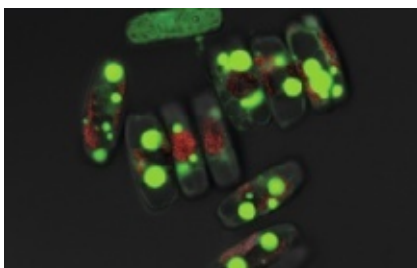
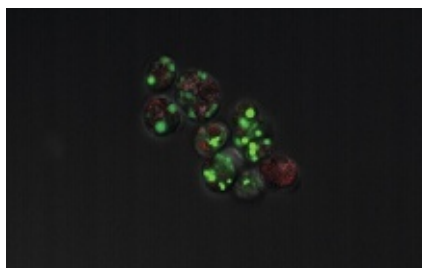
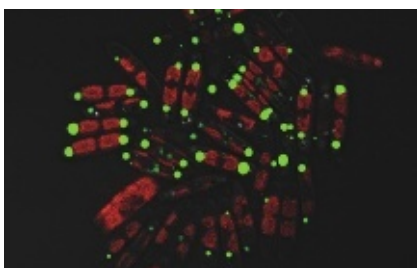
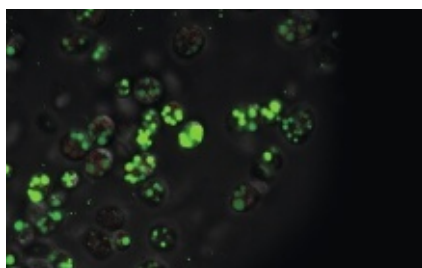
TAG : ces molécules sont formées de glycérol (une molécule dotée de trois groupes hydroxyle -OH), auquel sont associés par des liaisons dites ester trois acides gras de formule $R-COOH$, c'est-à-dire comprenant une chaîne carbonée R et un groupe acide carboxylique $COOH$ (voir la figure 4). Les acides gras, qui constituent la partie du lipide utilisée dans les biocarburants, représentent presque la totalité de la masse des triglycérides : ceux-ci sont donc convertibles quasi intégralement en carburants. D'autres types de lipides ne comprennent qu'une ou deux molécules d'acides gras et des composants (sucres, groupes phosphates...) inutilisables pour les biocarburants : la fabrication de carburant à partir de ces lipides a donc un moins bon rendement.

Les algues stressées augmentent leurs réserves

Les acides gras sont synthétisés essentiellement dans les chloroplastes. De multiples enzymes interviennent dans cette synthèse, telle l'acétyl-CoA carboxylase (ACCase), qui joue un rôle clef dans la régulation des vitesses de réaction. Dans un environnement favorable, la photosynthèse produit beaucoup de biomasse et la plupart des acides gras fabriqués sont destinés aux lipides membranaires, tels les phospholipides et les glycolipides. Seuls 30 à 50 pour cent de ces lipides peuvent être convertis en carburant.

En revanche, quand les cellules subissent un stress métabolique, tel un manque de nutriments azotés, le métabolisme de la cellule est redirigé vers la production de composés de stockage, principalement des hydrates de carbone (des glucides) et des triglycérides. On obtient donc des lipides plus intéressants pour les biocarburants, mais la croissance et la division cellulaire sont ralenties. On cherche à mieux comprendre les mécanismes en jeu dans la régulation de la fabrication des triglycérides, afin de créer des algues qui en produiraient plus sans ralentir leur croissance.

On peut extraire l'huile de diverses façons, par exemple à l'aide de solvants organiques. Elle représente une fraction d'autant plus importante de la biomasse que, chez les microalgues, toutes les cellules fabriquent de l'huile – à l'inverse des plantes terrestres (soja, colza, palmier...),



© Lee Elliott, Colorado School of Mines/Dennis Schroeder/ National Renewable Energy Laboratory

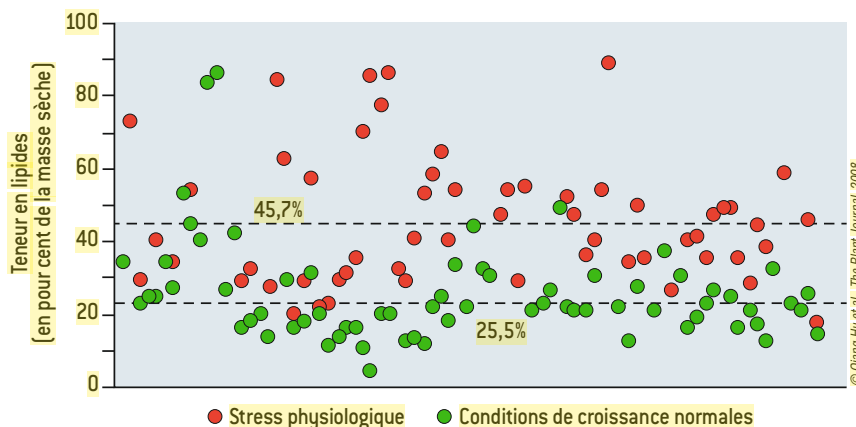
2. LA BIOPROSPECTION consiste à rechercher des algues naturelles aux caractéristiques intéressantes. Quatre espèces, prélevées dans le Sud-Ouest des États-Unis et vues au microscope, sont présentées ici. Les cellules ont été colorées avec du dipyrrométhène de bore (BODIPY), qui émet une fluorescence verte au contact de gouttelettes lipidiques. Il renseigne donc sur la teneur en lipides des cellules d'algues. La fluorescence rouge provient de la chlorophylle.

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