

plutôt les régions tropicales. Ce n'était pas forcément le cas au Crétacé supérieur, où l'effet de serre et les températures élevées ont pu limiter la diversité animale et végétale au niveau des tropiques.

En revanche, aux latitudes moyennes, qui concernent la plus grande partie de l'île-continent de Laramidia, le climat était doux et la saison de croissance végétale longue. À l'Ouest, les chaînes de montagnes et les rivières multipliaient le nombre de niches écologiques disponibles. À l'Est, la voie maritime intérieure exerçait son influence bénéfique sur les températures, tout en étant source de plus grandes précipitations. Les paléobotanistes Ian Miller et Kirk Johnson, du Musée de la nature et de la science de Denver, ont déjà retrouvé une centaine de variétés de plantes différentes dans les couches géologiques du plateau de Kaiparowits. Bien qu'il reste beaucoup à explorer, tout semble indiquer que les communautés de dinosaures de Laramidia bénéficiaient d'une végétation abondante et diversifiée.

Une diversité peut-être bien plus importante

D'autres travaux de recherche seront nécessaires pour établir si un métabolisme plus lent ou une plus grande disponibilité de la nourriture ont permis aux dinosaures d'atteindre de si grandes tailles et une telle diversité d'espèces. Ces facteurs sont peut-être tous deux impliqués. Une chose est certaine : le monde des dinosaures soumis au climat très chaud qui a caractérisé le Crétacé était bien différent de notre environnement actuel.

Nos travaux sur la formation de Kaiparowits suscitent autant de questions que de réponses, comme toute autre recherche scientifique digne de ce nom. Par exemple, combien de communautés distinctes de dinosaures ont coexisté sur le continent perdu de Laramidia ? Une autre question importante porte sur la nature de la barrière qui séparait les communautés du Nord de celles du Sud. Cette frontière était-elle uniquement climatique, comme on le pensait initialement ? Certains géologues soupçonnent aujourd'hui qu'il existait une barrière plus tangible, constituée peut-être de fleuves descendus des montagnes et allant se jeter dans la mer au niveau du Nord de l'Utah et du Colorado.

Une conséquence intrigante est à souligner. S'il s'avérait que les aires de répartition des espèces de dinosaures étaient beaucoup plus restreintes que ne le sont celles des mammifères de taille équivalente, la diversité des dinosaures devait être bien plus importante qu'on ne le pensait, puisqu'il devait alors y avoir des communautés différentes de dinosaures dans les régions non encore explorées. Autrement dit, sur Laramidia, un grand nombre d'étranges et merveilleuses créatures sont toujours sous terre, attendant que l'on veuille bien venir les exhumer. ■



Muséum national d'Histoire naturelle

Écologie acoustique



des chiroptères d'Europe

Identification des espèces, études de leurs habitats et comportements de chasse

Michel Barataud

Animaux nocturnes, les chiroptères ont développé un système de repérage dans l'espace du type sonar. Inaudibles à l'oreille humaine, les cris des chauves-souris peuvent être perçus, enregistrés et analysés grâce à différents appareils et logiciels. Cet ouvrage dresse le bilan des connaissances acquises par l'auteur depuis plus de vingt ans en matière de détection ultrasonore. Aux premières approches, purement auditives, il ajoute une autre dimension : l'identification par l'analyse informatique des ultrasons. Grâce aux détecteurs de plus en plus performants et à l'analyse informatique, la méthode décrite permet d'identifier en Europe environ 85 % des contacts acoustiques, de mener des inventaires et d'entreprendre des études toujours plus fines sans perturber les animaux. Ce livre traite 33 des 42 espèces de chauves-souris européennes.

DVD en supplément

Vous y trouverez les échantillons sonores illustrant la méthode ainsi que les fichiers (graphiques) nécessaires à l'identification des espèces.



ISBN : 978-2-85653-685-8

format 170 x 245 mm • impression quadri

nombreuses photos • DVD • 344p. • 49,90 € TTC

ouvrage en vente dans la librairie des Publications Scientifiques face à la Grande Galerie de l'Évolution

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements :

Muséum national d'Histoire naturelle

Publications scientifiques

Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05

Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40

diff.pub@mnhn.fr • <http://www.mnhn.fr/pubsci>

Microalgues : ? les carburants du futur

Philip Pienkos, Lieve Laurens et Andy Aden

Les algues microscopiques pourraient fournir presque autant de biocarburants que les plantes terrestres. Il reste à les rendre compétitives avec les carburants fossiles.

Le développement d'alternatives aux combustibles fossiles est en plein essor. Dans le futur, les véhicules ne fonctionneront plus uniquement à l'essence ou au diesel usuels, mais aussi aux biocarburants liquides, à l'électricité et peut-être à l'hydrogène. Presque toute l'essence distribuée aux États-Unis contient déjà dix pour cent d'éthanol, essentiellement fabriqué à partir de maïs. En France, selon l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), les biocarburants ont fourni 5,71 pour cent (en valeur énergétique) de la consommation totale de carburants en 2008. À l'échelle mondiale, 75 millions de tonnes de biocarburants ont été produits en 2010, à comparer aux 1 700 millions de tonnes de carburants pétroliers consommés annuellement.

Selon les chercheurs, de multiples types de biomasse seront nécessaires pour assurer un approvisionnement suffisant. Un rapport américain actualisé en 2011 indique qu'on pourrait extraire aux États-Unis jusqu'à 1,6 milliard de tonnes de biomasse terrestre par an, tout en respectant l'environnement, à partir de diverses sources : les déchets

de l'agriculture et de la sylviculture, les ordures ménagères, ainsi que des plantes spécifiques, telles les graminées *Miscanthus* et *Panicum virgatum* (en anglais *switchgrass*, le terme français panic raide étant peu utilisé). La biomasse servirait au chauffage et à la fabrication de biocarburants et de divers autres produits. Le rapport établit aussi la production maximale théorique de substituts à l'essence fondés sur cette biomasse : près de 363 milliards de litres. Les États-Unis consommant environ 756 milliards de litres par an de carburants liquides dérivés du pétrole brut, la biomasse terrestre ne suffira pas. Il faut donc prospecter ailleurs.

Les algues présentent de nombreux avantages. Certaines espèces ont une teneur élevée en lipides, exploitables pour un type de biocarburant nommé biodiesel. La quantité d'algues cultivable par hectare est importante. La production de biocarburant entre moins en compétition avec les usages alimentaires que ne le font des cultures telles que le maïs. Les algues poussent dans des environnements divers et sont cultivables sur des surfaces impropres à l'agriculture.

© Soeren Stachewitz/Corbis

Différents types d'eau sont utilisables : douce, saumâtre, salée et même des eaux usées. On pense que les carburants extraits d'algues dégageraient bien moins de gaz à effet de serre que les combustibles fossiles – cela reste toutefois à confirmer. Enfin, outre les biocarburants, d'autres produits commercialement intéressants pourraient être développés à partir des algues.

Dans une étude publiée en 2011, Mark Wigmosta, du Département de l'énergie américain, et ses collègues ont évalué la quantité de terres et de ressources (en eau, en dioxyde de carbone et en nutriments minéraux) disponibles pour la culture des algues. Ils en ont déduit la quantité potentielle de biocarburants susceptibles d'être produits aux États-Unis par cette filière : 216 milliards de litres par an, soit le même ordre de grandeur que l'ensemble des carburants tirés de la biomasse terrestre (363 milliards de litres). C'est d'autant plus intéressant que ce chiffre peut augmenter, car il se fonde sur les techniques actuelles, que l'on cherche à améliorer.

Des macroalgues trop chères

En effet, la filière des algues est confrontée à de multiples défis. Nous devons encore identifier les souches d'algues à forte productivité, mettre au point des méthodes fiables et peu exigeantes en eau pour les cultiver, et inventer des systèmes efficaces d'extraction des lipides et des autres produits d'intérêt commercial. Le coût de ces techniques ne devra pas être trop élevé, pour que le carburant extrait des algues soit compétitif avec ceux dérivés du pétrole.

Précisons que les algues qui nous intéressent pour les biocarburants sont les microalgues, des micro-organismes photosynthétiques unicellulaires. Le potentiel des macroalgues a aussi été étudié, mais l'idée de les utiliser a été abandonnée en raison de coûts prohibitifs liés à leur récolte

1. LES PHOTOBIOREACTEURS sont des récipients fermés dans lesquels on cultive des microalgues. Comme les autres systèmes de culture à l'étude, ils sont encore trop coûteux pour alimenter une filière de biocarburants rentable.

L'ESSENTIEL

- Les microalgues abondent dans les eaux douces et salées. Certaines espèces sont riches en lipides, exploitables pour les biocarburants.
- Toutefois, les carburants qu'elles fournissent sont trop chers par rapport à ceux dérivés du pétrole.
- On tente de rendre la filière des microalgues compétitive grâce à plusieurs types d'actions : recherche de souches algales plus intéressantes, améliorations techniques à toutes les étapes (culture des algues, extraction des huiles...) et développement de coproduits commerciaux avec la biomasse résiduelle.

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 notablement 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

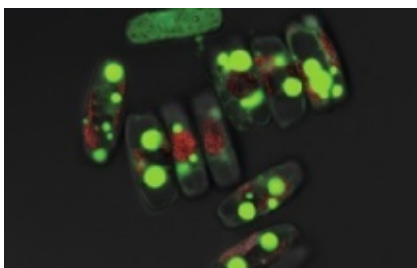
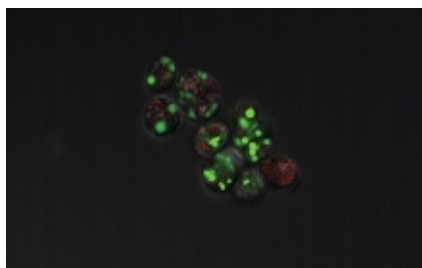
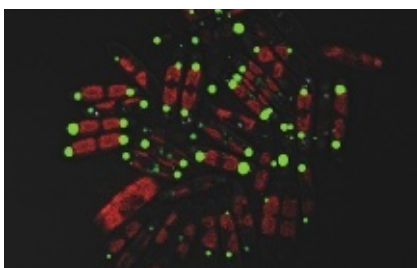
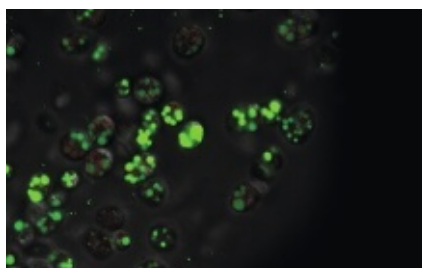
TAG : ces molécules sont formées de glycérol (une molécule dotée de trois groupes hydroxyle -OH), auquel sont associés par des liaisons dites ester trois acides gras de formule $R-COOH$, c'est-à-dire comprenant une chaîne carbonée R et un groupe acide carboxylique $COOH$ (voir la figure 4). Les acides 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

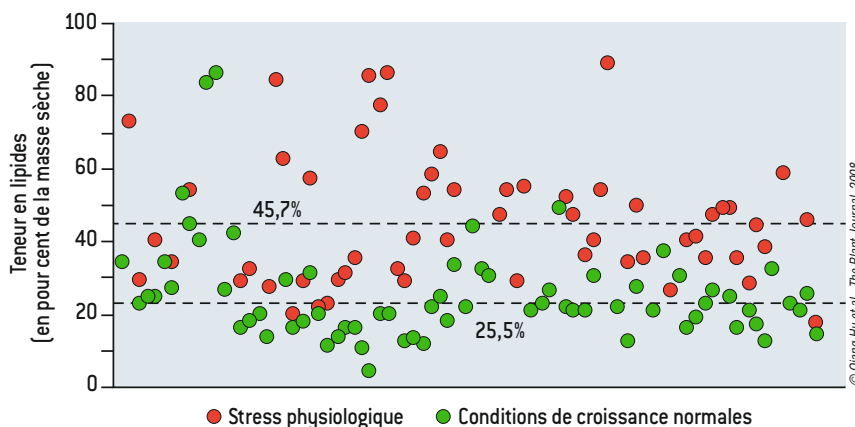
2. LA BIOPROSPECTION consiste à rechercher des algues naturelles aux caractéristiques intéressantes. Quatre espèces, prélevées dans le Sud-Ouest des États-Unis et vues au microscope, sont présentées ici. Les cellules ont été colorées avec du dipyrrométhène de bore (BODIPY), qui émet une fluorescence 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

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.

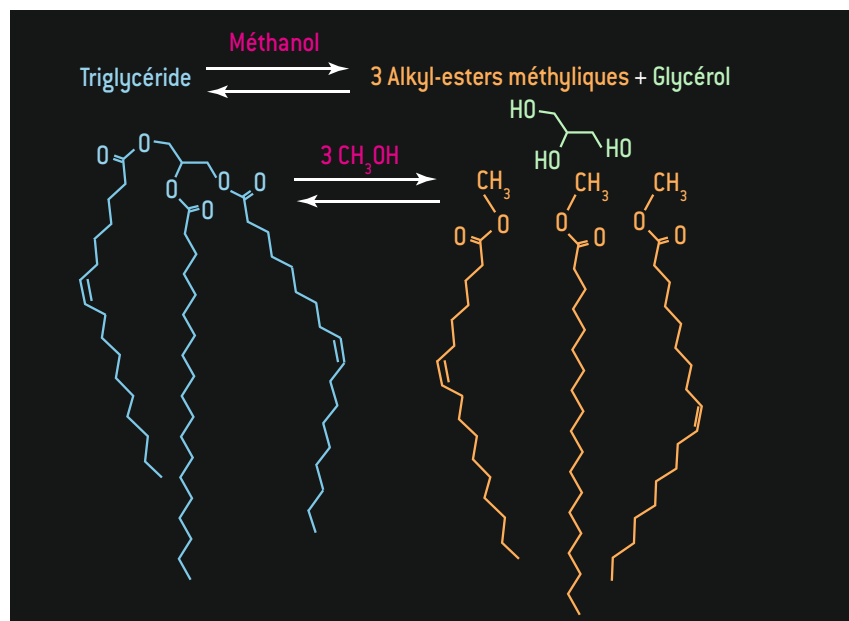
Nos travaux en génie génétique concernent aussi la cyanobactérie *Synechocystis* PCC 6803. Bien que les cyanobactéries « naturelles » ne fabriquent pas de triglycérides, nous élaborons actuellement une espèce qui en est capable. Pour cela, nous réorientons le métabolisme de la cellule pour lui faire 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. Quoiqu'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

leur volume : dans les cultures denses, de nombreuses cellules algales risquent de rester à l'ombre (ce qui pénalise la photosynthèse), surtout s'il n'y a pas de dispositif de brassage.

Les photobioréacteurs fermés doivent être construits en matériaux qui laissent passer la lumière, tel le verre ou le plastique. Ils prennent diverses configurations : panneaux plats, tubes, voire simples sacs en plastique suspendus ou posés sur le sol. Dotés de rapports surface/volume plus élevés que les bassins, ils limitent les ombres sur les algues. Le récipient fermé empêche l'entrée d'organismes indésirables et réduit l'évaporation (et donc la quantité d'eau nécessaire pour une culture continue). Toutefois, l'alimentation en dioxyde de carbone et l'accumulation de chaleur et de dioxygène peuvent poser problème. En outre, ces systèmes sont bien plus coûteux que les bassins.

Pour les produits déjà commercialisés (compléments alimentaires, antioxydants), la plupart des entreprises de microalgues utilisent des bassins ouverts. Nos évaluations indiquent que ces derniers seront bien plus rentables que les photobioréacteurs pour les biocarburants, mais notre laboratoire n'a pas encore recommandé un système plutôt que l'autre. Chacun a des avantages et des inconvénients, et les deux sont encore trop coûteux pour produire des carburants économiquement compétitifs avec ceux dérivés du pétrole. Nous cherchons donc toujours à réduire les coûts et à identifier des coproduits à forte valeur ajoutée.

La culture des algues n'est qu'un des défis à surmonter : leur récolte et l'extraction des huiles en constituent deux autres. Même dans des conditions de culture optimales, on n'obtient qu'un ou deux grammes de biomasse par litre de culture – à comparer aux 100 grammes par litre atteints avec des souches bactériennes industrielles telle *Escherichia coli* (utilisée dans des processus de fermentation aérobie pour fabriquer divers produits pharmaceutiques). La densité des cellules algales doit alors être multipliée, parfois par 100, avant l'extraction des huiles. La centrifugation le permet facilement, mais elle nécessite des équipements chers et consomme beaucoup d'énergie. D'autres méthodes issues de l'industrie du traitement des eaux usées sont meilleur marché. C'est le cas de la floculation et de la flottation par air dissous. Lors de la floculation, on



5. DE MULTIPLES SYSTÈMES DE CULTURE D'ALGUES sont étudiés, tels des bassins ouverts (en blanc au milieu ; la roue à aubes, pointée par une flèche rouge, crée une circulation d'eau) et des récipients fermés nommés photobioréacteurs. Ces derniers sont par exemple tubulaires (à gauche) ou à panneaux plats (flèche bleue). Les couleurs proviennent de souches algales variées ou de conditions de culture différentes appliquées à une même souche.

fait s'agréger les cellules autour d'ions minéraux ou de polymères organiques – on exploite aussi parfois les propriétés de la paroi cellulaire des algues pour déclencher leur regroupement en masses compactes. Ces amas cellulaires se déposent ensuite au fond sous l'effet de la gravité, ou sont repoussés en surface grâce à l'injection d'air ou d'autres gaz dans le cas de la flottation par air dissous. Ces deux méthodes sont moins coûteuses que la centrifugation, mais elles sont moins efficaces pour concentrer les cellules et elles nécessitent des adaptations en fonction des souches algales et des conditions de culture.

Une fois la concentration adéquate obtenue, reste à extraire les lipides des cellules. Dans le cas des végétaux terrestres, il suffit de les presser pour récolter l'huile, mais les microalgues sont trop petites et solides pour que cette technique soit efficace. On utilise aussi des solvants du type de l'hexane avec certaines graines, tel le soja, mais ils traversent difficilement les parois cellulaires algales. Souvent, on doit d'abord rompre ces parois cellulaires pour rendre les lipides plus accessibles, grâce à des techniques comme la sonication (l'envoi d'ultrasons) ou le broyage mécanique. Ces étapes augmentent le coût global et les dépenses énergétiques, de sorte qu'on tente de les éliminer.

Si les lipides représentent le composant algal clef pour les biodiesel, les glucides et les protéines pourraient être utilisés pour d'autres produits énergétiques, tels

Comment calculer la production maximale ?

La production maximale théorique d'une région donnée est calculée en considérant une transformation totale de l'énergie solaire en biomasse algale. On admet généralement que c'est un objectif inatteignable. Les taux de production d'algues avec les techniques actuelles représentent en moyenne 3,5 pour cent de ce maximum théorique. Cet indice tend à suggérer que les régions très ensoleillées sont les plus favorables à la culture d'algues, mais les problèmes de gestion de l'eau devront alors être pris en compte.

du méthane et des types de biocarburants différents. On cherche donc aussi à quantifier les glucides et les protéines présents dans la biomasse algale.

Des problèmes économiques à surmonter

Les obstacles techniques ont été surmontés jusqu'à un certain point en laboratoire ou dans des établissements pilotes, mais le plus grand défi reste la viabilité commerciale des biocarburants tirés des algues, c'est-à-dire leur production à un prix compétitif. Ces 30 dernières années, les estimations les plus optimistes donnaient un coût de production d'environ 26 centimes par litre, et les plus pessimistes de plus de 10 euros par litre. Sans une valeur de référence fiable, il sera difficile de quantifier la réduction des coûts obtenue grâce aux progrès techniques. Nous avons donc tenté de préciser les coûts de production, en nous fondant sur les techniques actuelles.

Pour ce faire, nous avons appliqué les méthodes d'analyse technico-économique utilisées pour la génération précédente de

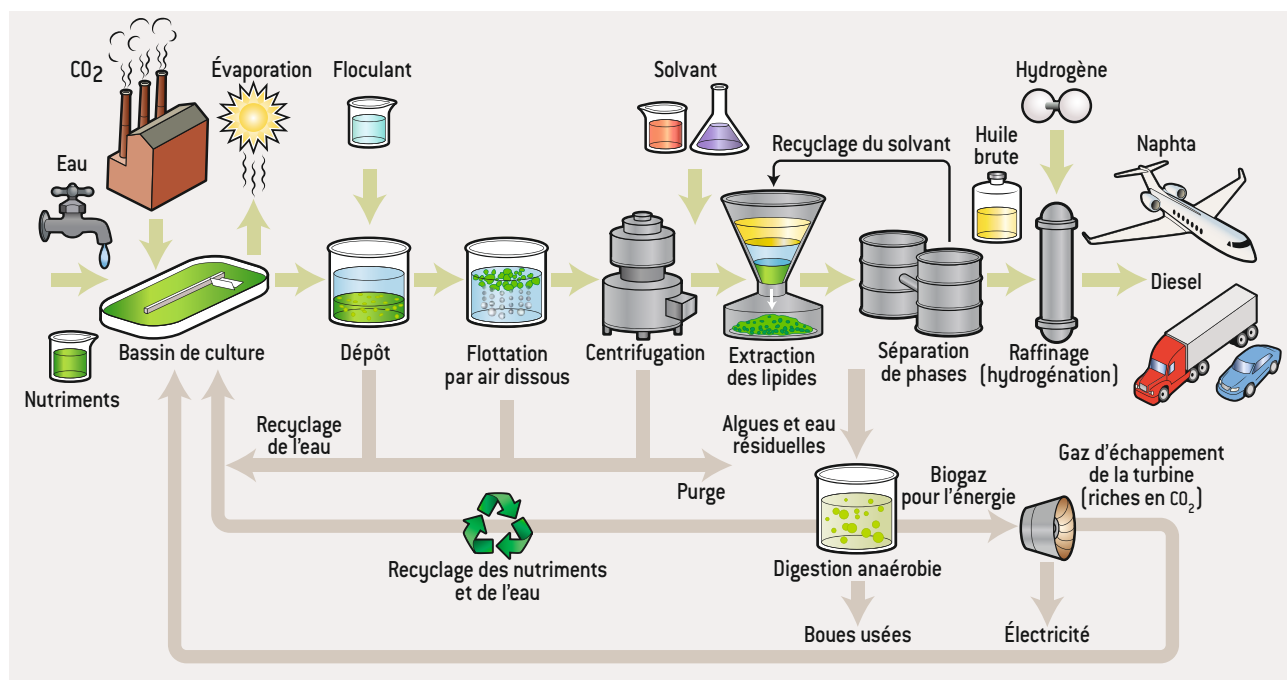
biocarburants, fondée sur la ligno-cellulose (bois, pailles, feuilles...) et qui en est à un stade préindustriel (caractérisé par le passage d'installations pilotes aux premières usines commerciales). Nous avons modélisé l'ensemble de la chaîne de production, pour les bassins ouverts comme pour les photobioréacteurs fermés. Nos modèles incluent la culture, la récolte et la concentration des algues, l'extraction et la récupération des lipides, puis enfin la conversion en carburant. Ils considèrent qu'une partie de la valeur énergétique de la biomasse algale est récupérée sous forme de méthane ; d'autres coproduits pourront leur être incorporés dans le futur. Les flux en matériau et en énergie calculés servent à déterminer la taille des équipements requis, les investissements nécessaires et les frais d'exploitation.

Selon notre analyse publiée en 2011, une installation de 38 millions de litres par an aurait un coût de production compris entre 2,6 et 5,3 euros par litre de biocarburant. Ce coût dépend de nombreux paramètres, mais deux d'entre eux sont particulièrement importants : la teneur en lipides des algues et leur vitesse de croissance (voir l'encadré page ci-contre). En les améliorant et en développant les

coproduits, nous pourrions réduire les coûts. D'une façon générale, la composition de la biomasse influe notablement sur l'aspect économique. La proportion et la nature des protéines et des hydrates de carbone dans les algues déterminent l'intérêt de la biomasse résiduelle, une fois les lipides extraits. Par exemple, une biomasse riche en sucre fermentescible peut être transformée en éthanol, qui a une plus grande valeur commerciale que le méthane.

Aujourd'hui, les données expérimentales affluent, car de multiples opérations pilotes sont en cours. Elles permettront d'améliorer les modèles. Les hypothèses sur l'efficacité technico-économique du recyclage des nutriments et de l'eau seront aussi testées.

Une autre difficulté est la grande variabilité des teneurs en lipides rapportées dans la littérature scientifique pour une algue donnée. Elle résulte en partie de la diversité des méthodes d'extraction et des types de solvants employés... En outre, les huiles extraites contiennent d'autres composants que les lipides incorporables dans les carburants (tels la chlorophylle et d'autres pigments, ainsi que des protéines et des glucides hydrophobes). On doit donc



6. UNE BIORAFFINERIE ALGALE a été modélisée au laboratoire des auteurs de l'article. Les algues sont cultivées dans des bassins ouverts où rentrent de l'eau, des nutriments minéraux, du CO₂ et de la lumière solaire. Les cellules sont récoltées par flocculation (on les fait s'agréger en flocons) et flottation par air dissous (du gaz pousse les flocons vers la surface), puis concentrées par centrifugation. La majeure partie de l'eau est recyclée, le reste étant écarté pour éviter la concentration des sels et

des déchets de culture. Les lipides sont extraits à l'aide de solvants, puis changés en carburant par divers traitements. Les solvants sont récupérés et réutilisés. La biomasse résiduelle est transformée en biogaz par digestion anaérobie. Ce biogaz actionne des turbines qui alimentent la bioraffinerie en électricité. Les nutriments des boues usées sont récupérés et renvoyés dans les bassins. Un recyclage poussé est essentiel pour réduire les coûts et assurer la viabilité de ce système.

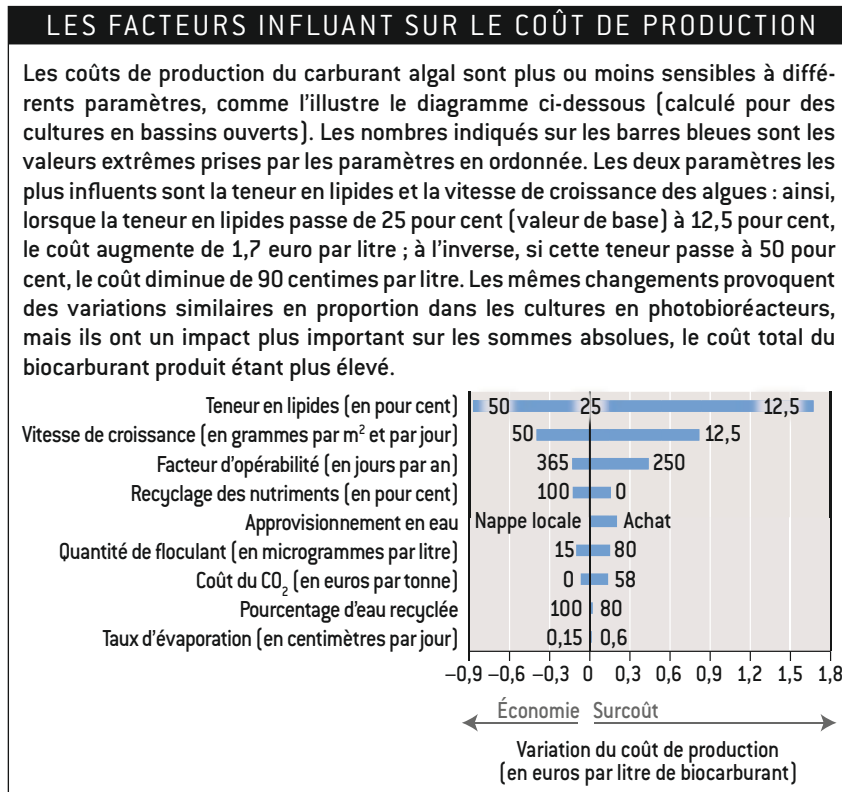
mesurer la fraction « carburant » – la teneur en acides gras des lipides extraits – de ces huiles. Une harmonisation des méthodes est nécessaire pour évaluer précisément les améliorations de productivité : nous devons être certains qu'un accroissement observé de la quantité de lipides extraits n'est pas un artefact de la mesure.

Dans ce contexte, on cherche de plus en plus à mesurer directement la quantité d'aides gras, plutôt que celle de lipides. Ces acides gras étant les composants clefs des biocarburants, on obtient ainsi une bonne estimation du potentiel réel des algues.

Des critères environnementaux à respecter

Les biocarburants doivent être non seulement rentables, mais aussi « durables », c'est-à-dire respectueux de l'environnement. Les critères sous-jacents sont définis par exemple dans une directive européenne datée de 2009. La durabilité se caractérise notamment par la quantité de dioxyde de carbone émise par unité d'énergie libérée, en comparaison avec l'essence ou d'autres carburants. D'autres facteurs sont pris en compte, tels que l'utilisation des sols – en particulier si l'on doit récupérer des terrains agricoles ou forestiers – et la consommation de nutriments. Il s'agit par exemple de l'azote, mais surtout du phosphore, dont les réserves sont limitées ; son utilisation pour les algues risque alors d'entraîner une compétition avec les cultures alimentaires. Les ressources en eau posent également problème, notamment si de l'eau douce est utilisée dans des bassins ouverts, où elle s'évapore. Enfin, la production d'un biocarburant doit consommer moins d'énergie que celle qu'il fournit.

Bien que ces critères paraissent évidents, ils sont difficiles à prendre en compte dans les calculs, comme le montre le débat sur l'éthanol issu du maïs. C'est particulièrement vrai pour les biocarburants algaux, car nombre de valeurs nécessaires aux calculs ne sont que des estimations ou des hypothèses. Seules quelques évaluations globales ont été réalisées, mais elles n'ont indiqué que de faibles bénéfices en termes de bilan énergétique et d'émission de gaz à effet de serre. Il est crucial d'améliorer ces calculs. Les énormes investissements en recherche et développement nécessaires ne



sont justifiables que si nous prouvons que les carburants extraits des algues seront plus intéressants que ceux dérivés du pétrole.

Les biocarburants d'origine algale ont été critiqués, car les défis techniques sont considérables et car ils ne pourront pas être commercialisés avant cinq à dix ans – voire 10 à 20 ans, selon Gilles Peltier, du CEA, à Cadarache, qui précise que cela dépendra notamment de l'évolution du prix du pétrole. Néanmoins, des progrès importants ont été réalisés dans tous les domaines : la culture, la récolte, l'extraction et la compréhension des mécanismes biologiques. Les modèles technico-économiques se sont perfectionnés, et de nouvelles données viennent les enrichir. Les estimations de coût disponibles deviennent plus précises et plus utiles – même si elles restent pour l'instant assez élevées. Les incertitudes diminuent et les risques sont mieux connus, ce qui accroît la confiance des investisseurs. Cette confiance a entraîné une augmentation des ressources privées et publiques allouées à la recherche sur les microalgues. Bien que le chemin vers la commercialisation soit encore long et coûteux, il vaut la peine d'être parcouru : les microalgues pourraient participer notablement à réduire la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles et les émissions de dioxyde de carbone...

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Sun *et al.*, Comparative cost analysis of algal oil production for biofuels, *Energy*, vol. 36, pp. 5169-5179, 2011.

U.S. Department of Energy, U.S. billion-ton update : Biomass supply for a bioenergy and bioproducts industry, Oak Ridge National Laboratory, 2011.

A. Clarens *et al.*, Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks, *Environmental Science & Technology*, vol. 44, pp. 1813-1819, 2010.

H. Greenwell *et al.*, Placing microalgae on the biofuels priority list : A review of the technological challenges, *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 7, pp. 703-726, 2010.

LES CINQ PILIERS

La coopération est répandue dans le monde animal. Elle se serait imposée grâce à cinq stratégies distinctes que peuvent adopter les individus.

Martin Nowak

Avril 2011 : les réacteurs de la centrale nucléaire de Fukushima sont en train de fondre, à la suite du tremblement de terre et du tsunami qui ont ravagé la côte Nord-Est du Japon le 11 mars précédent. Un agent de maintenance, âgé d'une vingtaine d'années, se porte volontaire, avec d'autres, pour pénétrer dans la centrale et tenter d'en reprendre le contrôle. Il sait que l'air est contaminé et que cette décision l'empêchera d'avoir des enfants, de crainte qu'ils héritent de graves maladies. « Nous sommes peu à pouvoir faire ce travail », déclare cet homme, qui souhaite rester anonyme, au quotidien britannique *The Independent*. « Je suis jeune et célibataire, et il est de mon devoir d'aider à régler ce problème. »

Bien qu'ils n'atteignent pas toujours un tel degré d'héroïsme, les comportements altruistes abondent dans la nature. Au sein d'un organisme, les cellules se coordonnent pour éviter une prolifération incontrôlée, et donc un cancer. Chez de nombreuses espèces de fourmis, les ouvrières sacrifient leur reproduction pour servir leur reine et leur colonie. Les lionnes vivent en groupes, au sein desquels elles allaitent et élèvent les petits de leurs congénères. Et les humains s'entraident dans toutes sortes de situations : recherche de nourriture ou de conjoints, défense du territoire... Ceux

qui aident leurs congénères ne mettent pas nécessairement leur vie en jeu, mais ils risquent de réduire leur succès reproductif au bénéfice de ceux qu'ils assistent.

La coopération intrigue les biologistes depuis longtemps, car elle semble contredire le concept de « lutte acharnée pour la vie » proposé par Charles Darwin. Ce dernier expliquait l'évolution par la sélection naturelle : les individus dotés de caractéristiques avantageuses se reproduisent plus que les autres et leurs descendants sont les plus nombreux au sein de la génération suivante. Il en résulterait une compétition sans merci, où l'on pourrait croire plus pertinent de mentir et de tricher que d'aider un rival. Dans le poème *In memoriam* (1850), Alfred Tennyson s'est fait le chantre d'une conception extrême – encore largement partagée – de l'évolution, en décrivant une nature ayant « le rouge aux griffes et aux dents ».

Mais dans ce cas, pourquoi la coopération est-elle si répandue ? Au cours des 20 dernières années, j'ai étudié cet apparent paradoxe à l'aide de la théorie des jeux. J'ai montré que, loin d'être contradictoires, coopération et compétition ont œuvré ensemble pour faire évoluer la vie sur Terre. J'ai également précisé la façon dont la coopération émerge dans une population et les raisons pour lesquelles elle est particulièrement présente chez l'homme.

L'ESSENTIEL

- La coopération a été l'un des moteurs de l'évolution.
- Cinq stratégies font émerger ce comportement : l'individu aide soit ceux qui l'ont aidé, soit ses voisins, soit ceux qui portent les mêmes gènes que lui, soit ceux qui ont bonne réputation, soit tous ses semblables.
- Les humains constituent l'espèce qui coopère le plus, car leur langage perfectionné leur permet d'échanger des informations sur leurs semblables, et donc d'optimiser la stratégie fondée sur la réputation.

Norma Bar