

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.

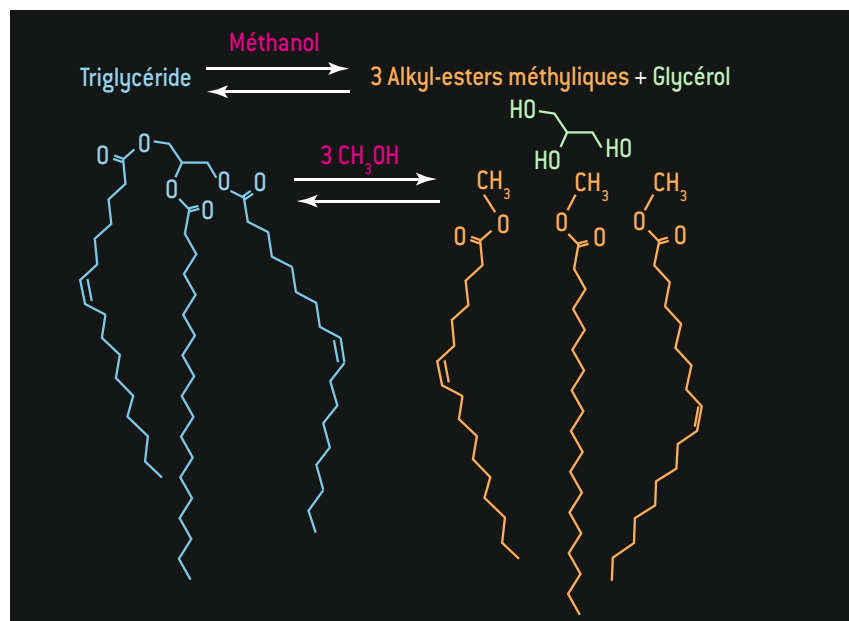
Nos travaux en génie génétique concernent aussi la cyanobactérie *Synechocystis* PCC 6803. Bien que les cyanobactéries « naturelles » ne fabriquent pas de triglycérides, nous élaborons actuellement une espèce qui en est capable. Pour cela, nous réorientons le métabolisme de la cellule pour lui faire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