

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

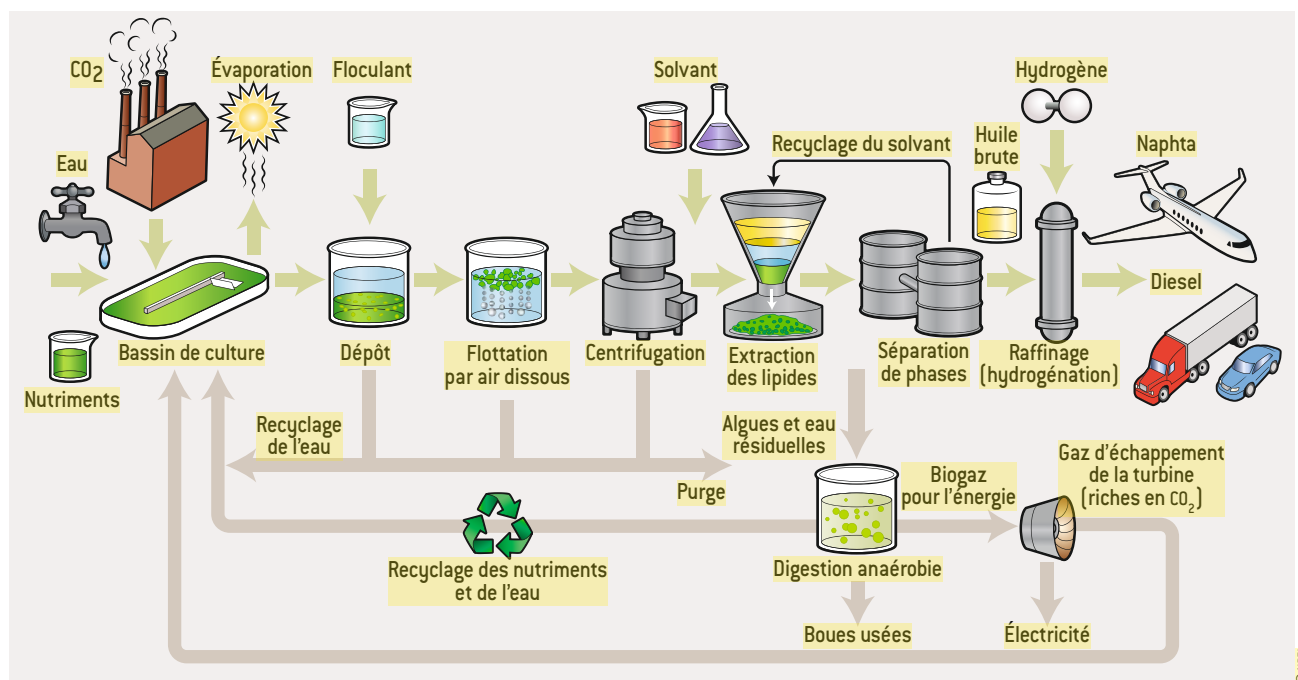
biocarburants, fondée sur la ligno-cellulose (bois, pailles, feuilles...) et qui en est à un stade préindustriel (caractérisé par le passage d'installations pilotes aux premières usines commerciales). Nous avons modélisé l'ensemble de la chaîne de production, pour les bassins ouverts comme pour les photobioréacteurs 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.

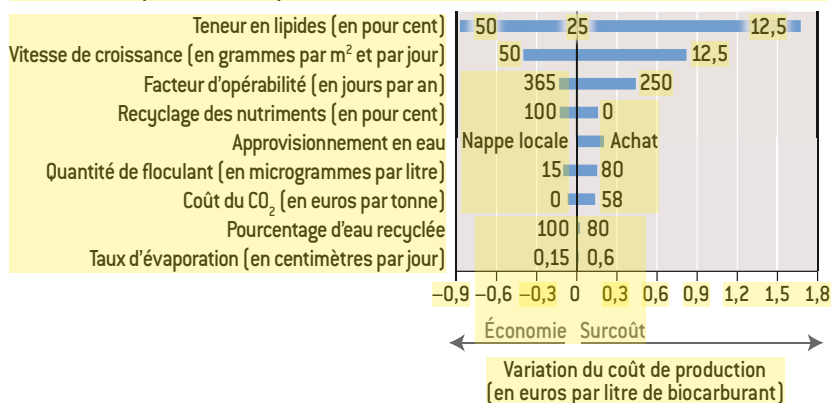
Des critères environnementaux à respecter

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

LES FACTEURS INFLUANT SUR LE COÛT DE PRODUCTION

Les coûts de production du carburant algal sont plus ou moins sensibles à différents paramètres, comme l'illustre le diagramme ci-dessous (calculé pour des cultures en bassins ouverts). Les nombres indiqués sur les barres bleues sont les valeurs extrêmes prises par les paramètres en ordonnée. Les deux paramètres les plus influents sont la teneur en lipides et la vitesse de croissance des algues : ainsi, lorsque la teneur en lipides passe de 25 pour cent (valeur de base) à 12,5 pour cent, le coût augmente de 1,7 euro par litre ; à l'inverse, si cette teneur passe à 50 pour cent, le coût diminue de 90 centimes par litre. Les mêmes changements provoquent des variations similaires en proportion dans les cultures en photobioréacteurs, mais ils ont un impact plus important sur les sommes absolues, le coût total du biocarburant produit étant plus élevé.



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

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

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.