

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

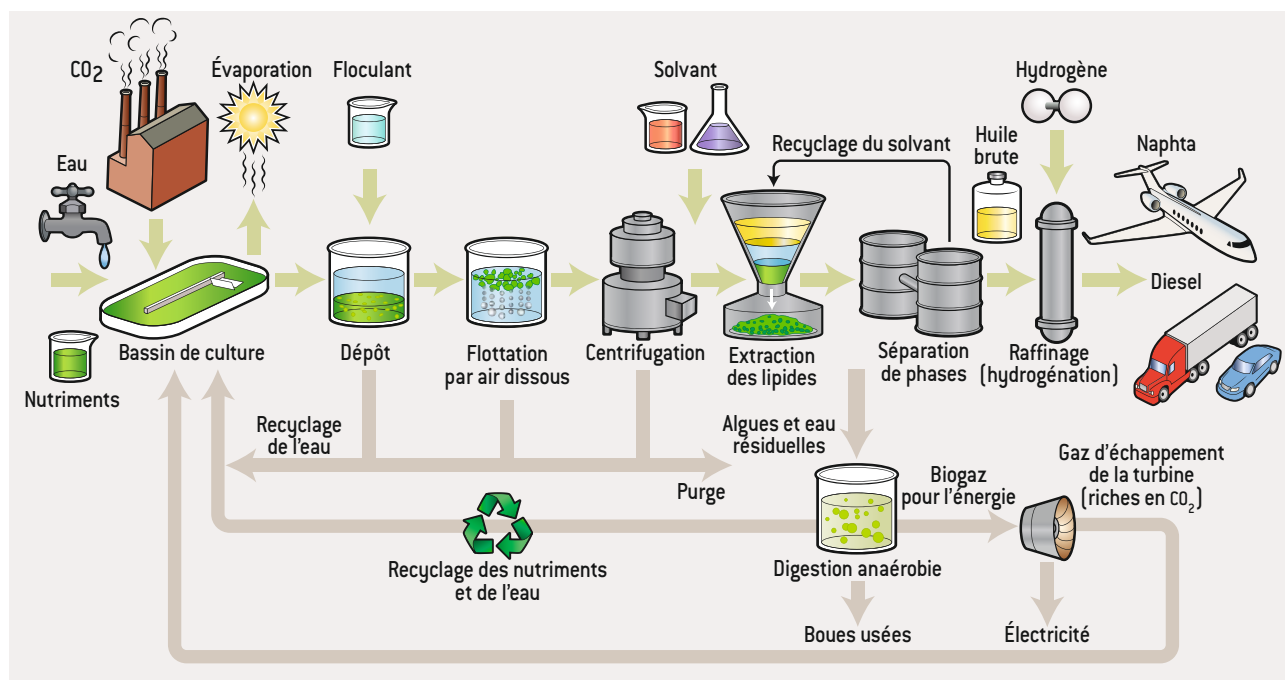
biocarburants, fondée sur la ligno-cellulose (bois, pailles, feuilles...) et qui en est à un stade préindustriel (caractérisé par le passage d'installations pilotes aux premières usines commerciales). Nous avons modélisé l'ensemble de la chaîne de production, pour les bassins ouverts comme pour les photobioréacteurs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