Institut océanographique
Fondation Albert Ier, Prince de Monaco

La valorisation des microalgues, défis et promesses

Auteur : Antoine SCIANDRA
Directeur de recherche au CNRS
Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-Mer – LOV
Institut de la mer de Villefranche

Les microalgues sont des organismes photosynthétiques unicellulaires qui utilisent l'énergie solaire pour convertir les composés minéraux dissous dans l'eau en matière organique cellulaire et en oxygène. Leur principal mode de multiplication par divisions binaires successives leur confère une croissance exponentielle. On les trouve dans tous les habitats terrestres, lacustres, marins, sous toutes les latitudes. Doués d'une formidable capacité d'adaptation, ces micro-organismes d'une dizaine de microns ont évolué en différentes familles capables de se développer dans des environnements divers marqués par des conditions extrêmes de température (glace, geyser) et d'acidité. De fait, les microalgues se présentent sous une multitude de formes, l'une des caractéristiques qui reflètent une biodiversité considérable dont l'étendue exacte reste encore à découvrir.

Le phytoplancton, qui désigne les unicellulaires photosynthétiques (dotés de chlorophylle) avec noyau (eucaryotes) et sans noyau (procaryotes cyanobactéries) vivant en suspension dans l'eau, est un objet d'étude ancien en raison du rôle qu'il joue dans les réseaux trophiques, les cycles biogéochimiques, et la régulation du climat. Mais plus récemment, de nombreux projets de recherche ont commencé à explorer différentes voies de valorisation des microalgues. Cet engouement tient d'une part à la diversité de leur composition qui offre une palette de biomolécules dont le potentiel commence seulement à être évalué à sa juste valeur, et d'autre part à leur vitesse de croissance que très peu de plantes terrestres ne peuvent égaler. En effet, une culture de microalgue peut doubler sa biomasse chaque jour.

Jusque dans les années 2000, l'exploitation des microalgues, qui remonte à des temps immémoriaux, est restée plus ou moins empirique. La spiruline est l'exemple emblématique d'une cyanobactérie d'eau saumâtre simplement récoltée ou bien cultivée pour sa richesse en protéines, depuis les Aztèques jusqu'à nos jours. Aujourd'hui, les contraintes de rentabilité inhérentes au type de marché ciblé nécessitent une optimisation des procédés de production, et leur adéquation avec le processus de valorisation. Pour être véritablement optimale, la recherche de solutions doit s'atteler simultanément à toutes les étapes interdépendantes de la chaîne de production : choix et domestication de l'espèce, mode et conditions de culture, récolte de la biomasse, extraction de la ou des molécules d'intérêt, et tests de performance[1]. En effet, en marge des problèmes suscités par l'optimisation de la croissance même, il subsiste des verrous d'ordre technologique qui grèvent encore considérablement la rentabilité de la filière microalgue. On citera à titre d'exemple les coûts énergétiques et environnementaux induits par l'agitation des cultures pour le maintien en suspension des microalgues, leur récupération par filtration, centrifugation ou floculation, ou encore l'extraction physico-chimique des molécules d'intérêt. À cet égard, l'analyse conjointe du cycle de vie[2] et des scénarios proposés par les modèles mathématiques constitue également de nos jours un outil d'aide à la décision, qui est en plein développement.

[1] SHAMASH (nom d'un dieu babylonien du soleil) a été à la fin des années 2000 un projet national, précurseur en France et en Europe dans la mesure où, en réunissant des experts de toutes les étapes du processus, il a cherché à évaluer le potentiel des microalgues à produire des biocarburants. Sur le papier, le prix élevé du pétrole ainsi que de nombreux indices suscitaient un intérêt généralisé pour cette filière (voir référence du film [1]).

[2] L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation normalisée, permettant de réaliser un bilan environnemental multicritère d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie. Son but est de connaître les impacts

Les espèces cultivées. Alors que le nombre d'espèces de microalgues répertoriées dans les environnements naturels se monte à quelques dizaines de milliers et que l'on estime que ce nombre pourrait être de 1, voire de 2 ordres de grandeur supérieur, seule une dizaine d'espèces sont actuellement exploitées industriellement. Cette disproportion illustre non seulement la difficulté de cultiver les microalgues en masse, mais aussi notre méconnaissance des espèces susceptibles de produire des molécules d'intérêt. À cet égard, on peut distinguer parmi les produits valorisables ceux qui, constitutifs de la cellule, sont mesurables car facilement identifiables (lipides, protéines, sucres, polymères, pigments, généralement utilisés en nutrition, nutraceutique, bioénergie), de ceux qui, moins abondants, voire à l'état de trace, peuvent n'être connus que par la mise en évidence empirique d'un effet bénéfique, recherché ou non, tels les principes actifs de plus en plus convoités en médecine, pharmacologie et cosmétique. Cette deuxième catégorie représente généralement des substances « à haute valeur ajoutée », lesquelles, produites en faibles quantités, sont néanmoins très rentables à la vente.

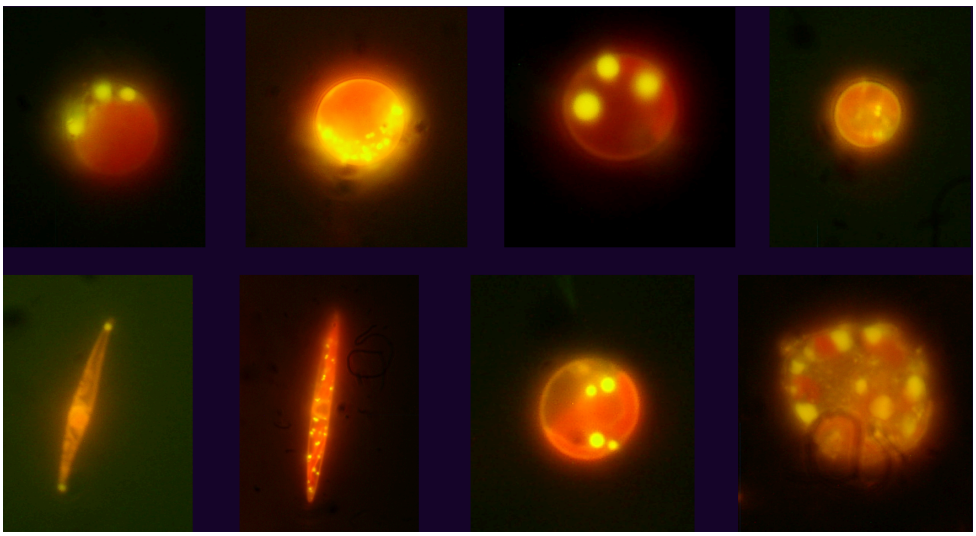

Photo 1. Différentes espèces de microalgues marquées au Rouge du Nil. Les parties colorées en jaune révèlent les zones où les triglycérides (précurseur de biocarburant) s'accumulent dans les cellules, en réponse à une limitation de leur métabolisme par l'azote. © Olivier Bernard.

Les dispositifs de culture. La culture du phytoplancton dans des milieux naturels relativement protégés (lagunes, lacs…) présente l'intérêt économique de laisser faire la nature, et se résume en fin de compte à la récolte d'espèces endémiques, comme la spiruline. La culture dans des structures implantées en mer a été envisagée, mais reste improbable en raison des risques liés à un environnement souvent agressif, une météorologie incontrôlable et à la dissémination d'espèces non endémiques. L'essentiel de la production se réalise donc dans des enceintes à terre qui sont soit closes, soit ouvertes, au sein desquelles les microalgues sont maintenues en suspension dans un milieu de culture enrichi et éclairé[3]. Enfin, mais pas

environnementaux tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication jusqu'à son traitement en fin de vie.

[3] Le premier type d'enceinte appartient à la famille des photobioréacteurs qui reçoivent une lumière artificielle ou bien naturelle. Très variés par leur conception et leur niveau de sophistication, ils sont généralement onéreux à la construction et à la mise en œuvre, mais, en isolant la culture de l'atmosphère, ils présentent l'avantage de réduire les risques de contamination et de contrôler les conditions de cultures pour une production intensive. Le second type d'enceinte appartient à la famille des raceways (ainsi nommés car ils ont la forme allongée d'un champ de course) qui, disposés en plein air ou sous serre et d'un volume beaucoup plus important, assurent grâce à l'énergie solaire gratuite une production extensive avec une occupation au sol très importante. Moins onéreux et plus facile d'emploi, ils n'offrent cependant pas les avantages des photobioréacteurs.

encore éprouvé au niveau industriel, la production de biofilms de microalgues se développant sur un substrat solide, et présentant donc l'intérêt d'une récolte facile de la biomasse par simple raclage, est un procédé de production émergent qui suscite de nombreuses recherches.

Photo 2. Production de microalgues en bassins ouverts de type raceway, à Hawaï. © CYANOTECH CORP.

Les conditions de croissance. Ces conditions sont définies par l'ensemble des facteurs dont la combinaison module le taux de division cellulaire, et qui sont pour l'essentiel l'intensité et le spectre de la lumière incidente, les nutriments, la température, le pH. On connaît pour plusieurs espèces cultivées les fonctions qui décrivent la réponse de leur taux de croissance ou de la synthèse d'un de leurs métabolites d'intérêt à chacun de ces paramètres ou à leur combinaison. Ce sont en somme les mêmes facteurs qui contrôlent la croissance du phytoplancton dans les milieux marins et dulcicoles, à ceci près que leur gamme et régime de variation sont complètement différents dans les dispositifs de production. Cette différence vient en grande partie du fait que les cultures de microalgues sont toujours extrêmement concentrées.

Valorisation, optimisation et recherche. La valorisation d'un composé algal s'accompagne nécessairement de la notion de rentabilité, elle-même liée à celle d'optimisation. Ainsi, les travaux de recherche menés sur le potentiel des microalgues doivent-ils permettre de déterminer l'ensemble des conditions qui maximisent la production du composé valorisable et en minimisent les coûts énergétiques et environnementaux[4]. L'optimisation du procédé ne peut trouver sa solution que si l'on considère simultanément le dispositif de culture, les facteurs de croissance, l'espèce de microalgue, le composé cible, et le marché, ces cinq entités

[4] Le coût énergétique est induit par la mise en œuvre du procédé lui-même, l'action mécanique nécessaire au brassage (par exemple les roues à aube dans les raceways), l'énergie lumineuse dans le cas de photobioréacteurs éclairés par une lumière artificielle, la centrifugation ou filtration pour la récolte de la biomasse, et éventuellement sa lyophilisation, les intrants nutritifs très énergétiques. La possibilité de recycler les intrants issus des stations d'épuration est actuellement à l'étude. Le coût environnemental est une notion plus vaste qui inclue également les flux de matière et d'énergie nécessaires à la production, les produits de dégradation issus du traitement de la biomasse (par exemple transestérification des triglycérides en biodiesel avec du méthanol).

étant inextricablement liées. Le dispositif de culture doit être conçu à la fois pour que les conditions de croissance favorisent la productivité du métabolite d'intérêt (conditions qui peuvent différer de celles qui optimisent la croissance de la microalgue), mais aussi pour minimiser les coûts énergétiques et environnementaux du procédé. Dans ce domaine, de nombreuses recherches sont conduites pour optimiser l'utilisation de la lumière, en jouant sur la source lumineuse, sa distribution, la géométrie des photobioréacteurs, la turbulence, etc. Les bassins peuvent aussi être placés dans des serres qui permettent, outre une réduction des risques de contamination, une certaine régulation des conditions prévalant à leur surface, notamment la température et l'évaporation. Une partie quantitative (intensité) ou qualitative (spectre) du flux de photons incident peut être dérivée de la photosynthèse par des panneaux photovoltaïques semi-transparents, capables de suppléer l'énergie nécessaire au procédé, de façon à tendre vers des systèmes intégrés dits « à énergie positive ».

Mais probablement les avancées les plus spectaculaires sont celles attendues dans l'amélioration des espèces elles-mêmes. Il est en effet possible d'aller puiser dans un vivier de biodiversité naturel encore sous-exploité, pour cribler des espèces soit particulièrement riches en composés d'intérêt, soit particulièrement adaptées aux conditions de culture artificielles. Mais il est également possible de modifier génétiquement les espèces naturelles pour les adapter aux conditions de culture. L'usage d'espèces génétiquement modifiées (OGM) étant encore interdit en France, notamment pour la nutrition, des recherches intensives sur la sélection variétale des espèces voient le jour. En exerçant des pressions de sélections susceptibles de modifier en profondeur l'expression du génome de populations de microalgues, il est désormais possible d'orienter leur métabolisme vers la synthèse de substances recherchées, sans avoir recours aux OGM.

Pour en savoir plus

Liens vers des supports grand public (en français)

• Film :

[1] Shamash : https://interstices.info/wp-content/uploads/jalios/docs/video/mp4/2015-07/shamash.mp4

• Livres :

[2] Gudin C. & Bernard O., 2013. *La culture de l'invisible : le rêve porté par les microalgues.* Ovadia, 160 p.

[3] Bonnefond H., Combe C., Cadoret J.-P., Sciandra A. & Bernard O., 2020. Potentiel des microalgues. *In : Chimie verte et industrie agroalimentaire – Vers une bioéconomie durable* (Ed., S. Baumberger). Lavoisier, Paris, France, 560 p.

Publications en français, relativement grand public

[4] Cadoret J.-P. & Bernard O., 2008. La production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis. *Journal de la Société de Biologie*, 202(3) : 201-211.

[5] Sialve B. & Steyer J.P., 2013. Les microalgues, promesses et défis. *Innovations Agronomiques*, 26 : 25-39.