
Microalgues: de petits végétaux aux grandes promesses !

Bougaran Gaël¹, Saint-Jean Bruno¹

¹ IFREMER, Ctr Atlantique, Lab Physiol & Biotechnol Algues, Nantes, France.

Abstract :

Pour nos sociétés modernes, en quête de nouveaux procédés et de molécules actives innovantes, les microalgues représentent un formidable potentiel. Leurs nombreuses espèces et leur biodiversité constituent un réservoir de métabolites et de propriétés biochimiques quasi-inexploré, pour le développement de nouvelles applications biotechnologiques.

Les microalgues sont des organismes unicellulaires photosynthétiques, à la base de la chaîne alimentaire en milieu aquatique. De par leur extraordinaire biodiversité – de 40 000 à 70 000 espèces – et leur grande faculté d'adaptation, elles sont présentes sur l'ensemble des surfaces du globe : des océans (soit $\frac{2}{3}$ de la surface terrestre) aux glaces arctiques, en passant par les lacs hyper-salés, les neiges éternelles, les forêts humides et les murs de nos maisons. Le phytoplancton, qui comprend les microalgues et les bactéries phototrophes, participe à 50 % de la production primaire mondiale et joue ainsi un rôle majeur dans la séquestration du dioxyde de carbone atmosphérique (1). À ce jour, une vingtaine d'espèces de microalgues sont cultivées à des fins de valorisation, majoritairement pour l'aquaculture et l'agro-alimentaire. Une partie des microalgues appartient à la « lignée verte » qui est à l'origine de l'ensemble des plantes terrestres et qui se caractérise par la présence d'un plaste vert. D'autres lignées originales (telles que les Diatomées, les Rodophytes et les Dinoflagellés) ont évolué exclusivement en milieu aquatique et présentent une diversité largement inexploitée au regard du potentiel biotechnologique qu'elles offrent. En comparaison avec les plantes terrestres et les bactéries, les microalgues sont à l'aube de biotechnologies dont les applications se révèlent aussi variées que prometteuses pour l'alimentation, la santé, l'énergie ou encore la bioremédiation (2).

Des applications agro-alimentaires

Majoritairement cultivées depuis plus de 30 ans pour la nutrition animale en aquaculture, mais aussi pour la cosmétologie et plus récemment pour leur intérêt dans les secteurs de la pharmacie et de l'énergie, les microalgues sont aussi un produit alimentaire. En nutrition humaine et animale, deux approches de valorisation existent : la première consiste à viser une consommation de la microalgue entière, la deuxième concerne l'extraction, la transformation et le conditionnement de molécules bioactives. En France, seules trois espèces de phytoplancton sont autorisées pour une consommation humaine sans transformation : la spiruline ou *Arthrospira platensis* (une cyanobactérie communément assimilée aux microalgues), probablement l'espèce la plus anciennement consommée, sous forme fraîche ou séchée, pour ses propriétés nutritionnelles (une forte teneur en protéines, entre 60 et 70 % de la matière sèche) et plus récemment comme alicament (en raison de son pigment naturel de

couleur bleue, la phycocyanine*¹) ; la microalgue verte *Chlorella* sp., riche en amidon, dont l'exploitation sous forme de complément alimentaire pour ses propriétés tonifiantes et détoxifiantes progresse ; et la diatomée *Odontella aurita*, également utilisée en complément alimentaire en tant que source d'acides gras polyinsaturés (ω 3 et ω 6). Le marché de ces produits est évalué, en 2012, à environ 300 millions de dollars avec une progression estimée de 30 % par an (3). Plusieurs espèces de microalgues riches en acides gras ω 3 (notamment les acides docosahexaénoïques, DHA, et eicosapentaénoïques, EPA) sont donc désormais transformées pour en extraire et commercialiser l'huile qu'elles contiennent. Parmi celles-ci, *Cryptocodinium cohnii*, *Isochrysis galbana*, *Phaeodactylum tricornutum* et *Schizochytrium* sp. sont couramment utilisées comme complément alimentaire et comme nutraceutique – c'est-à-dire un produit ou un aliment vendu sous forme de comprimé ou d'autre présentation pharmaceutique et ayant des effets positifs sur la santé. Enfin, d'autres microalgues riches en pigments originaux, tels que le β -carotène (*Dunaliella salina*, *Aphanizomenon flos-aquae*) et l'astaxanthine (*Haematococcus pluvialis*), sont également utilisées en tant que compléments alimentaires.

Concernant l'alimentation animale, les microalgues produites sont principalement destinées aux animaux élevés en aquaculture. Distribuées vivantes, elles constituent l'unique source d'alimentation des mollusques produits en éclosion (huîtres, moules, pectens) quel que soit leur stade de développement. Elles sont également utilisées pour nourrir les larves de crustacés, certains alevins de poissons et des échinodermes (tels que les holothuries, plus connues sous le nom de concombres de mer). Elles sont généralement distribuées aux élevages dans le cadre de régimes plurispécifiques.

Les microalgues sont par ailleurs une alternative intéressante à la farine de poisson, produit transformé d'une pêche non alimentaire. Cette pêche, dite minotière (petits poissons pélagiques*²) non destinés à la consommation humaine) – dont l'impact sur le renouvellement de la ressource halieutique pose problème – alimente principalement la fabrication de nourritures piscicoles. 62 % de la farine de poisson et 88,5 % de l'huile de poisson issus de la pêche minotière étaient intégrés, en 2006, dans la nourriture aquacole (4). Le développement rapide de l'aquaculture, et de la pisciculture en particulier, conduira à une augmentation des besoins en aliments, à laquelle la pêche minotière ne pourra plus répondre, puisque le renouvellement de ces stocks de poissons utilisés est déjà menacé par cette exploitation. La production de microalgues représente donc une source substitutive, qui n'impactera pas la biodiversité et le renouvellement des espèces vivant dans le milieu naturel (encadré page XX). Les microalgues possèdent des atouts supplémentaires : il est possible d'orienter et d'adapter leur composition biochimique et elles n'induisent pas de risques de transmission de pathogènes aux animaux nourris, puisqu'il s'agit d'une biomasse végétale.

Par ailleurs, 30 % de la biomasse algale produite sont aussi utilisés dans le cadre de la fabrication industrielle d'aliments pour les élevages d'animaux terrestres (volailles, porcs...) (5). Des recherches sont actuellement menées sur ce domaine d'application pour évaluer leurs propriétés anti-oxydantes, anti-prolifératrices, anti-inflammatoires, détoxifiantes et pour mesurer d'éventuels effets de préservation ou d'amélioration de la santé des cheptels (6).

Un réservoir de molécules pour la santé

À l'instar des plantes terrestres, la biodiversité des microalgues représente un véritable réservoir de molécules originales d'intérêt médical. D'autant que les microalgues appartiennent à des lignées évolutives parfois très distantes les unes des autres, alors que les plantes terrestres sont issues de la seule lignée microalgale verte. Cette chimiodiversité sous-jacente offre l'opportunité de développer la pharmacopée de demain au travers de molécules originales (7). Parmi les métabolites connus figurent les acides gras polyinsaturés de types ω 3

(EPA, DHA) et $\omega 6$ (acide γ -linoléique, GLA, et acide arachidonique, AA). Ces lipides auraient des effets protecteurs vis-à-vis de maladies cardiovasculaires et de cancers.

Les pigments, qui peuvent avoir des activités anti-oxydantes ou oxydantes, font également l'objet de nombreuses recherches portant sur la prévention et le traitement des cancers (lire pages 41-43). Certains exopolysaccharides sécrétés par les microalgues ont montré des capacités antivirales sur l'Herpes simplex virus type 1 (responsable d'infections buccales) ou bien le measles virus (responsable de la rougeole) ou encore le Influenzavirus A (responsable de grippe), et antiprolifératives sur lignées cellulaires cancéreuses (8). Ces composés insolubles pourraient également entrer dans la formulation d'hydrogels pour la reconstruction osseuse et la vectorisation d'agents ostéoinducteurs (9). Les microalgues font également l'objet de recherches pour leur utilisation comme système de bioproduction alternatif aux bactéries pour des molécules à haute valeur ajoutée, comme les anticorps monoclonaux, facteurs de croissance, interférons, insuline, enzymes diverses, etc... Cependant, de nombreux verrous scientifiques : tel que le faible rendement de production de protéines recombinantes actuellement rencontré, ou techniques (le développement de méthodes de transformation génétique efficaces), devront être levés avant d'utiliser pleinement le potentiel des microalgues comme « usines cellulaires » (10, 11).

Une source d'énergies renouvelables.

La raréfaction des ressources énergétiques fossiles et la pression anthropique sur le climat mondial conduisent à l'exploration de sources d'énergie renouvelables. Fortes d'une activité photosynthétique élevée, les microalgues peuvent capter et convertir l'énergie solaire en biomasse polyvalente et exploitable comme source d'énergie.

À partir de cette biomasse microalgale, deux voies de valorisation peuvent être envisagées : son utilisation directe pour la production de méthane par digestion anaérobie ou d'éthanol via un processus de fermentation alcoolique ; et la biosynthèse de molécules fortement énergétiques telles que les lipides et l'hydrogène.

Grâce à leur taux élevé en lipides – de 30 à 60 % du poids sec pour des espèces telles que *Chlorella* sp., *Neochloris oleabondans*, *Phaeodactylum tricorutum*, *Nannochloropsis* sp. – certaines microalgues se révèlent être de bonnes candidates pour la production de biocarburants de troisième génération, c'est-à-dire indépendants des produits ou déchets agricoles ou de la conversion d'autres formes de biomasse résiduelle (12). Différentes technologies de culture peuvent être mises en œuvre, depuis les bassins agités par des roues à aubes – peu productifs et relativement économiques – jusqu'aux photobioréacteurs – ultraperformants mais beaucoup plus onéreux. Les rendements lipidiques estimés pour les bassins agités sont fonction des températures et de l'ensoleillement et varient entre 12 000 litres par hectare et par an (L/ha/an) dans le nord de la France et 18 000 L/ha/an dans la région de Nice ; ces rendements sont ainsi de 2 à 12 fois supérieurs à ceux du palmier à huile et du colza (12).

Les microalgues se cultivent aussi sur des terres non arables, évitant ainsi une compétition directe avec les cultures céréalières. De plus, l'utilisation d'espèces marines évite également une pression sur les ressources en eau douce. Elles ne représentent pas une source de conflit pour l'approvisionnement alimentaire.

Cependant, des verrous subsistent. Les techniques actuelles de récolte et de traitement de la biomasse algale impliquent des coûts de production élevés, ce qui contrebalance sur le plan économique les forts rendements. Pour être compétitif avec le pétrole, le coût de production des microalgues devrait approcher 0,38 euro par litre (€/L) d'huile quand les estimations actuelles se situent plutôt aux environs de 2,24 €/L (13). En vue de réduire ces montants, des efforts de recherche importants et des investissements considérables de plusieurs milliards de dollars ont été consentis pour développer cette nouvelle filière énergétique respectueuse de

l'environnement (14). Un consensus se dégage quant à la nécessité de valoriser dans le même temps les nombreux autres constituants originaux des microalgues dans un contexte de bioraffinerie*³.

Des agents pour la bioremédiation

En raison de leur surface cellulaire spécifique étendue, les microalgues ont des capacités d'absorption particulièrement intéressantes pour la décontamination de milieux pollués et la lutte contre l'eutrophisation*⁴. Ces applications de bioremédiation sont largement documentées dans la littérature scientifique (15). Les taux de croissance élevés des microalgues, associés à leurs capacités d'absorption de l'azote et du phosphore, peuvent ainsi être mis à profit pour l'épuration des eaux urbaines ou industrielles (16) ou des effluents d'élevage (17). Elles sont utilisées depuis longtemps dans des procédés de lagunage – qui utilisent des végétaux aquatiques comme agents épurateurs. Dans ces environnements pollués, elles entretiennent des relations coopératives, voire synergiques avec les bactéries, ce qui augmente l'efficacité épuratoire du système. L'oxygène produit par les microalgues favorise une réduction de la dépense énergétique liée à son apport en continu dans les systèmes dits à boues activées (18).

L'utilisation de microalgues pour la dépollution des métaux lourds a également été envisagée et conduirait à des performances potentielles supérieures et à un coût moindre, par rapport aux technologies de traitement plus conventionnelles (19). Cette aptitude à concentrer les éléments métalliques par biosorption et par bioaccumulation*⁵ suggère non seulement des applications en détoxification des milieux pollués, mais également des procédés de récupération de métaux d'intérêt comme l'or, voire la séquestration d'éléments radioactifs.

En perspectives

Les microalgues possèdent un potentiel biotechnologique évident. La phyco-culture*⁶ est une activité jeune et pleine de promesses. Son essor doit être accompagné par un effort de recherche, afin d'en réduire les coûts de production et de fiabiliser les rendements des cultures à l'échelle industrielle.

Les technologies de culture sont déterminantes pour la rentabilité économique des productions phytoplanctoniques. La mise en œuvre de grandes masses d'eau conduit à une dépense énergétique élevée : l'agitation des cultures, qui garantit l'exposition régulière des cellules à la lumière et leur accès aux éléments nutritifs, est très consommatrice d'énergie ; la récolte des quelques grammes de matière sèche par litre d'eau est également coûteuse. Le développement de nouvelles technologies, réduisant ces dépenses, est donc une voie prometteuse pour une industrialisation à plus large échelle.

Aujourd'hui, les producteurs de microalgues utilisent des espèces sauvages, issues du milieu naturel. Des stratégies d'amélioration des espèces, notamment par évolution dirigée, se dessinent actuellement (**encadré page XX**). Elles devraient conduire – comme ce fut le cas en agriculture – à des gains substantiels de productivité et contribuer ainsi au développement de la filière.

La stabilité des performances des cultures constitue un dernier enjeu pour la phyco-culture industrielle. Elle nécessite d'approfondir notre connaissance de la physiologie des espèces cultivées, pour mieux comprendre leurs besoins en éléments minéraux – comme l'azote et le phosphore – et les interactions avec les *consortia* bactériens et les facteurs environnementaux. Les avancées techniques et scientifiques, dans leur dynamique actuelle, permettent d'envisager des progrès rapides sur ces axes biologiques et technologiques, qui conduiront à l'essor des cultures industrielles de microalgues au cours des prochaines années. La diversité et l'originalité de ces organismes, leur productivité élevée, la variété des domaines d'application envisagée reliée au concept de bioraffinerie, sont autant d'assurances d'un grand avenir pour ces microalgues.

*¹ La phycocyanine est un pigment de couleur bleue aux propriétés nombreuses : anti-oxydante, anti-inflammatoire, antiallergique, anti-cancérigène, immunomodulante et immunostimulante.

*² Un poisson est appelé pélagique lorsqu'il vit dans les eaux proches de la surface ou entre la surface et le fond.

*³ Installation industrielle visant à valoriser l'ensemble des constituants d'une biomasse dans une optique « zéro déchet ».

*⁴ Déséquilibre d'un écosystème, généré par un excès de nutriments et qui conduit à une croissance excessive des algues et à une baisse des taux l'oxygène dissous.

*⁵ Dans un milieu liquide, la biosorption est un mécanisme physico-chimique passif d'adsorption des éléments contaminants sur un support biologique. La bioaccumulation est un mécanisme actif d'absorption par la cellule d'un élément donné.

*⁶ Ensemble des procédés, techniques et savoir-faire liés à la culture des algues.

Références :

- (1) Raven JA, Falkowski PG (1999) *Plant Cell Environ* 22, 741-55
- (2) Cadoret JP *et al.* (2014) *Valorisation et économie des ressources marines*, ed. ISTE, 65–112
- (3) Ganesan B *et al.* (2012) *Crit Rev Food Sci Nutr* 54, 98-114
- (4) Tacon AGJ *et al.* (2006) *FAO Fisheries Circular* 1018, 99
- (5) Costa MRGF *et al.* (2011) *Pubvet* 154, art 1035, 17
- (6) Spolaore P *et al.* (2006) *J Biosci Bioeng* 101, 201-11
- (7) Kornprobst JM (2005) *Substances naturelles d'origine marine*, ed. Lavoisier, Paris
- (8) Laurienzo P (2010) *Mar Drugs* 8, 2435-65
- (9) Raposo MFJ *et al.* (2013) *Mar Drugs* 11, 233-52
- (10) Mimouni V *et al.* (2012) *Curr Pharm Biotechnol* 13, 2733-50
- (11) Cadoret JP *et al.* (2012) *Adv Bot Res* 64, 285-341
- (12) Cadoret JP, Bernard O (2008) *J Soc Biol* 202, 201-11
- (13) Chisti Y (2007) *Biotechnol Adv* 25, 294-306
- (14) Singh J, Gu S (2010) *Renew Sustain Energ Rev* 14, 2596-610
- (15) Razzak SA *et al.* (2013) *Renew Sustain Energ Rev* 27, 622-53
- (16) art nez E *et al.* (2000) *Bioresour Technol* 73, 263-72
- (17) Kim HC *et al.* (2014) *Appl Biochem Biotechnol* 174, 1668-82
- (18) Posadas E *et al.* (2014) *J Appl Phycol* 26, 2335-45
- (19) Wilde EW, Benemann JR (1993) *Biotechnol Adv* 11, 781-812
- (20) Bougaran G *et al.* (2012) *Biotechnol Bioeng* 109, 2737-45

Encadré 1 : 2006 signes

La Nouvelle Calédonie en exemple

Le programme Amical (Aquaculture de Microalgues en Nouvelle-CALédonie) est porté depuis fin 2011 par l'Adecal-Technopole (l'agence pour le développement économique de la Calédonie) et l'Ifremer. Son objectif est de développer, à l'horizon des années 2017-2018, une filière innovante de production de microalgues en Nouvelle-Calédonie afin de participer au développement économique du pays. Le Laboratoire d'étude des microalgues (LE A) et le Laboratoire technologique de microalgues (LTMA) ont ainsi été créés pour prendre en charge ce projet. Amical vise à isoler des espèces nouvelles_locales grâce à des bioprospections réalisées le long du littoral calédonien, à en caractériser les paramètres de culture optimaux et

leur composition en biomolécules, puis à produire de la biomasse en grands volumes. Les particularités potentielles de ces souches, qui peuvent être liées à l'originalité de l'espèce ou à son adaptation aux biotopes calédoniens, peuvent ouvrir des voies de valorisation originales ou adaptées au contexte économique calédonien.

Elles concerneront en premier lieu, sous forme vivante, l'alimentation aquacole (larves de crevettes, proies vivantes), mais aussi l'intégration de cette biomasse dans la formulation d'aliments aquacoles, dont la fabrication, bien que locale, est actuellement impactée par des frais d'importation et des taxes douanières très élevés liés à des ingrédients d'origine étrangère entrant dans leur composition.

La Nouvelle-Calédonie représente un terrain privilégié pour le développement d'une filière de production de microalgues. Le climat, les espaces disponibles, le savoir-faire des aquaculteurs locaux, le marché local demandeur pour pallier aux coûts des importations onéreux, l'endémisme potentiel des souches, la présence d'organismes de recherche spécialisés (Ifremer, l'IRD, les universités...), l'Adecal-Technopole porteuse de projets, tous ces éléments concourent à la mise en place d'une filière de production calédonienne à court terme.

Pour en savoir plus : www.adecal.nc/fr et wwwz.ifremer.fr/pba

Encadré 2 : 1831 signes

Vers l'amélioration des souches de microalgues

À ce jour, les cultures de microalgues reposent majoritairement sur des souches issues du milieu naturel, exploitées pour leurs performances de croissance et leurs caractéristiques biochimiques originelles. Contrairement aux programmes de sélection chez les plantes et les animaux qui ont débuté durant l'antiquité, la sélection de ces micro-organismes est très récente (depuis les années 2000). La marge d'amélioration des rendements en biomasse et en molécules d'intérêts est sans nul doute très importante et contribuera à consolider l'économie des cultures industrielles. L'amélioration de ces souches par génie génétique (obtention d'organismes génétiquement modifiés, OG) a permis d'augmenter significativement leur productivité pour des molécules d'intérêt (lipides, pigment etc.). Cependant, les réticences sociales vis-à-vis des OGM limitent fortement le potentiel de ces approches pour des cultures industrielles réalisées en milieu ouvert.

Parallèlement, l'exploitation de la diversité génétique naturelle ou induite par des techniques de mutagenèse et de sélection (évolution dirigée) a d'ores et déjà démontré des gains de rendement substantiels, sans nécessiter le recours au génie génétique (20). Pourtant, le déficit des connaissances sur la biologie des microalgues (illustré par la maîtrise imparfaite des cycles et des déterminants sexuels) ne permet pas de disposer actuellement des méthodes performantes de croisement génétique utilisées chez les végétaux supérieurs. Les efforts actuels de recherche devraient permettre d'acquérir de nombreuses données génomiques et physiologiques sur les espèces d'intérêt. L'ensemble de ces données, associé au transfert des méthodologies préalablement développées chez d'autres organismes, laisse envisager avec optimisme une sélection maîtrisée des microalgues au cours des prochaines décennies.

Légendes des figures :

Figure 1. Souche d'une microalgue verte : *Dunaliella salina*.

© SM-RR/mairie de Nantes

Figure 2. Photobioréacteur développé pour l'étude de la physiologie des microalgues.

© Michel GOUILLOU/Ifremer

Figure 1



Figure 2

