

L'exploitation industrielle des micro-algues

Par Pierre CALLEJA*

Initiée dès les années 1960, l'exploitation industrielle des micro-algues a vraiment débuté dans les années 1970 avec l'aquaculture marine.

Les technologies actuelles entrouvrent la possibilité d'une production à grande échelle, à haut rendement et à faible coût de production de toutes les souches de micro-algues d'intérêt.

Le XXI^e siècle devrait être celui des micro-algues, et c'est une vraie révolution eu égard aux importantes opportunités qu'elles offrent dans les domaines de la nutrition, de la cosmétologie, de la santé, de la chimie verte et de l'énergie. Nous allons bientôt les retrouver dans tous les produits que nous utilisons au quotidien.

La colonisation par l'homme de la production industrielle des micro-algues va passer par plusieurs étapes successives dans la maîtrise de nouvelles générations technologiques.

L'édition française de l'*Atlas de biologie* de Günter Vogel et Hartmut Angenmann (parue chez Stock, en 1970) mentionne en page 41 : « Parmi les cellules isolées que l'on peut assimiler à des organismes complets et autonomes, celles qui présentent le degré d'organisation le plus élémentaire constituent la catégorie des protistes. Mais ces êtres présentant entre eux des différences notables, cette catégorie a été subdivisée en plusieurs groupes : le premier groupe, celui des procaryotes, comprend les bactéries et les cyanophycées ».

Vient ensuite le groupe des eucaryotes, qui est composé, d'une part, des flagellés qui regroupent les zooflagellés et phytoflagellés et, d'autre part, de nombreux autres protistes unicellulaires divisés entre protistes végétaux et protistes animaux.

Mais contre toute attente, le terme de *micro-algue* n'apparaît à aucun moment dans cet Atlas.

Aucune mention, non plus de cette notion dans l'édition 2013 du dictionnaire de la langue française *Le Robert*.

C'est Lopez Gomara, le secrétaire d'Herman Cortes, qui, pour la première fois, mentionne des micro-algues en 1552 dans son relevé d'expédition en Amérique du Sud à propos d'Aztèques. Il y raconte que ce peuple, basé à Tenochtitlán (aujourd'hui Mexico), la capitale aztèque bâtie sur une île située sur le lac (d'eau douce) disparu de Texcoco, ramassait, à la saison chaude, « une purée bleu-verte » à l'aide de filets à mailles très fines. Il s'avère que cette pâte colorée n'était autre que la cyanophycée *Spirulina maxima*, qu'ils faisaient sécher au soleil avant de la croquer comme un gâteau sec. Cyanophycée à paroi fine sans cellulose, diges-

te, la spiruline, connue pour sa grande valeur nutritive (75 % de protéines), offrait alors aux Aztèques une source importante d'acides aminés, de bêta-carotène et d'acide gamma-linoléique (GLA).



© Peter T. Furst, in *Human nature*, 1978

Photo 1 : Récolte de spiruline par les Aztèques dans la vallée de Mexico.

Toujours dans l'édition 1970 de l'*Atlas de biologie* de Günter Vogel et Hartmut Angenmann, les cyanophycées sont décrites (p. 43) comme des « algues bleues unicellulaires autotrophes ».

C'est à partir de ce classement général que l'on va commencer à considérer, à tort, sous le terme *micro-algues*, des protistes photosynthétiques [les protistes ne sont ni des plantes ni des animaux ni des champignons, et les algues se définissent comme des plantes sans floraison capables de vivre principalement dans l'eau, ndlr].

En réalité, la vision dichotomique qui consiste à partager les êtres entre animaux et végétaux ne peut pas s'appliquer aux protistes. Les protistes sont à l'origine de la séparation du règne animal et du règne végétal. Règne végétal que nous nous représentons surtout par les plantes, lesquelles ne vont apparaître que bien plus tardivement avec la sortie des eaux d'une algue verte chlorophycée.

D'un côté, les protistes purs autotrophes ne sont pas aussi nombreux que cela : les phytoflagellés et une bonne majorité des protophytes sont capables d'absorber, *via* un transporteur ou par simple osmose, le carbone organique présent dans le milieu où ils vivent ; de l'autre, les protozoaires et les zooflagellés, bien que dépourvus de chloroplastes, possèdent des plastes photosensibles qui sont capables de capter l'énergie lumineuse. En fait, au stade de l'évolution où sont apparus les protistes, il n'y avait pas encore de séparation tranchée entre les deux règnes (végétal et animal) et la plupart des protistes sont, de fait, mixotrophes.

Dans une nouvelle édition de l'*Atlas de biologie* de Günter Vogel parue en 1994, les cyanophycées ont été rattachées au monde des bactéries (cyanobactéries). Par conséquent, à ce jour, on peut considérer que le terme de *micro-algues* englobe donc *a minima* les phytoflagellés, les protophytes, des zooflagellés, voire des protozoaires.

Il n'existe pas encore de définition juste des micro-algues. Toutefois, on pourrait en proposer la suivante : « Les micro-algues sont des protistes eucaryotes autotrophes et/ou mixotrophes capables – en présence de lumière – de capter l'énergie lumineuse à partir de leurs plastes ».

Partant de cette définition, nous pouvons en déduire que les micro-algues peuvent être cultivées soit par autotrophie dans des bassins à ciel ouvert ou dans des photobioréacteurs, soit dans des fermenteurs hétérotrophes ou mixotrophes (cela, grâce à leur capacité photohétérotrophique).

La première génération

La toute première exploitation industrielle de micro-algues (ou plutôt d'une cyanophycée) apparaît, là encore, du côté des Aztèques, mais cette fois dans les années 1960. En effet, la société SOSA TEXCOCO, dirigée par le Français Hubert Durand-Chastel, exploitait, dans le reste de ce qui fut autrefois le lac aztèque Texcoco, le carbonate de sodium. Le lac Texcoco recevait alors l'eau des neiges fondues, qui drainait les sels des montagnes. La forte évaporation ainsi que les assèchements successifs réalisés par

l'homme aboutiront à une forte concentration en carbonate de calcium et donc à une forte alcalinité de l'eau du lac.

Mais chaque été, l'exploitation du carbonate de sodium était perturbée par une mystérieuse biomasse bleue-verte. C'est Madame Geneviève Clément, de l'Institut Français du Pétrole, qui, intéressée par les études du botaniste belge Jean Léonard, identifia lors d'un séjour au Mexique la spiruline dans le lac Texcoco. À la fin des années 1950, Jean Léonard, au retour d'une expédition au Sahara, avait confié à son confrère Pierre Compère un échantillon de galette verte séchée achetée sur un marché au Tchad. Lui-même l'avait identifiée comme de la spiruline.

La société SOSA TEXCOCO devint ainsi la toute première société dans le monde à exploiter industriellement la spiruline.

La production de micro-algues en milieu lacustre alcalin fut la première génération technologique de l'exploitation industrielle des micro-algues, basée sur la capacité de la spiruline à se développer en autotrophie, dans une eau salée au pH très basique empêchant ainsi le développement de compétiteurs ou de prédateurs. Ces conditions de culture extrêmes permettent d'atteindre une productivité de l'ordre d'un gramme de matière sèche par litre.

Ce mode de culture fut ensuite copié dans divers endroits du monde qui présentaient des conditions de culture similaires. Toutefois, il ne permettait que de produire des espèces extrêmophiles, telles que la spiruline ou *Dunaliella salina*, une micro-algue halophile capable de survivre dans des eaux saturées en sel, et qui fut d'abord cultivée par des Russes, à partir de 1966, pour la production de β -carotène. L'activité anti-oxydante des caroténoïdes, que ces micro-algues produisent pour protéger leur unique cellule contre la lumière intense et l'oxydation par des radicaux libres, est utilisée en complément nutritionnel et en cosmétologie.

La deuxième génération

C'est avec le démarrage, à la fin du XX^e siècle, de l'aquaculture marine, que l'homme va s'intéresser de plus près aux micro-algues. Durant les années 1970, deux pays, le Japon et la France, vont se lancer activement à la conquête de la production industrielle des poissons marins et des crevettes (de la famille des *Penaeidae*).

Avant cela, l'homme avait progressivement maîtrisé (dès l'Antiquité, en Asie, puis à partir du Moyen Âge, en Europe) la production en étang d'espèces d'eau douce, telles que les carpes et les poissons chats. Puis, au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, en France, se développa l'élevage des truites en bassins alimentés par des rivières. Les Norvégiens firent ensuite progresser ce modèle en évoluant vers la production de saumons dans des cages en mer (le saumon et la truite sont tous deux des salmonidés, qui sont proches dans leur mode d'élevage). Les premiers pas d'élevages en mer étant réalisés, il fallait poursuivre avec la production d'espèces marines.

Mais l'aquaculture d'espèces marines était une activité bien plus complexe que la pisciculture. En effet, la production était bloquée par deux verrous technologiques :

d'abord, la maîtrise de la reproduction en captivité et l'incubation des pontes des espèces marines, mais surtout le nourrissage des larves durant les premiers jours de leur phase trophique.

Dès que les premières pontes de poissons marins (induites par l'administration d'hormones et une fécondation manuelle) furent maîtrisées (BARNABÉ (G.), 1976 ; GIRIN (M.), 1979), on réussit à nourrir les larves, naturellement planctophages, en recréant dans les écloséries marines toute la chaîne alimentaire présente dans les océans, à savoir la production de micro-algues destinées à nourrir la production de zooplancton, zooplancton destiné à son tour à nourrir les larves de poissons marins et de crevettes *Penaeidae*s.

C'est le développement des techniques de production en masse des animaux proies *Artemia salina* et *Brachionus plicatilis*, qui permit le lancement à grande échelle des premiers élevages aquacoles de crevettes *Penaeidae*s et de poissons marins.

Les premiers aquaculteurs marins commencèrent donc à produire de façon très rudimentaire, dans des gaines en plastique suspendues le long de tubes néons, plusieurs souches de micro-algues. Cette biomasse fraîche servait d'aliment fourrage pour les proies vivantes. Les premières souches utilisées étaient particulièrement rustiques comme notamment *Tetraselmis suecica*, une chlorophycée marine flagellée qui présente de plus une balance équilibrée entre acides aminés et acides gras, ou encore une autre micro-algue robuste, elle aussi flagellée, *Isochrysis galbana* (une petite haptophyte, de couleur dorée [en grec, *chrysis* signifie « or »]).

La deuxième génération technologique de production industrielle des micro-algues est apparue au début des années 1980, avec l'invention du photobioréacteur (PBR). Cette fois, il ne s'agissait plus d'alimenter en biomasse fourrage les écloséries marines, mais de tenter l'aventure de l'exploitation industrielle des micro-algues pour en extraire de précieuses molécules.

L'intérêt des photobioréacteurs était d'optimiser la production photosynthétique des micro-algues en culture axénique continue, permettant ainsi un meilleur contrôle de la production et l'utilisation de bien d'autres espèces de micro-algues que celles croissant naturellement dans les espaces ouverts ou en gaines de plastique.

Le premier photoréacteur thermo-régulé par flottation sur une surface d'eau représentait 100 mètres carrés de surface déployée de photo-réception et permettait des productions contrôlées de biomasse sèche d'une teneur de 3 g/l, soit dix fois plus qu'en système lagunaire.

Les deux principales espèces cultivées furent le *Porphyridium cruentum*, une petite rhodophycée, micro-algue sphérique de couleur rouge pour obtenir des polysaccharides sulfatés, des phycobiliprotéines et des antioxydants comme la superoxyde dismutase (SOD) et l'*Haematococcus pluvialis* pour la production d'astaxanthine, un antioxydant.

En 1992, après de longues années de recherche et développement, le Commissariat à l'énergie atomique et aux

énergies alternatives (CEA), avec l'aide de Sofinnova (une société de capital-risque), décida de tenter l'industrialisation d'un photobioréacteur dans le cadre de la société Thallia Pharmaceuticals (Rhône). La société visait le marché à haute valeur ajoutée des nouvelles molécules thérapeutiques dérivées des micro-algues. Le réacteur fut construit en 1997 près de Tarbes, avec une première tranche de 1 000 m² de surface, et fonctionna d'une façon continue, sans incident, pendant un an. Le *Porphyridium* était l'espèce retenue.

Les coûts de production à ce stade étaient particulièrement élevés, mais c'est surtout la surévaluation du marché qui entraîna la mise en liquidation judiciaire de la société, en août 1999.

Cette deuxième génération, qui correspond bien à une première tentative de production industrielle hors plan d'eau, permit d'étudier plusieurs nouvelles espèces et de faire progresser considérablement les connaissances sur les micro-algues. Toutefois, les PBR ne permettaient de résoudre qu'une partie des problèmes. Bien que la productivité fût passée de 0,3 gramme par litre à 3 grammes par litre de matière sèche grâce à une meilleure gestion de l'énergie lumineuse, ce sont des questions relatives à la contamination et au coût de la biomasse qui ne permirent pas le démarrage de l'exploitation industrielle.

La troisième génération

Alors que les Européens se concentraient sur le métabolisme photosynthétique des micro-algues, apparaissait au Japon, puis aux États-Unis, la troisième génération technologique de production industrielle des micro-algues. Celle-ci allait faire figure de base à l'exploitation industrielle actuelle des micro-algues dans le monde.

Toujours pour alimenter en micro-algues les besoins de plus en plus importants des écloséries marines japonaises, qui multipliaient les succès en matière de maîtrise de la production de nouvelles espèces marines, la société Yakult Honsha avait réalisé que la *Chlorella*, une micro-algue très répandue dans les plans d'eau douce et bien connue depuis l'Antiquité pour sa haute teneur en protéines, pouvait être cultivée totalement dans le noir à partir d'apports carbonés, comme on cultivait déjà des bactéries et des levures. Le 2 septembre 1965, Yakult Honsha déposait un brevet intitulé *Method of industrial Cultivation of Unicellular Green Algae such as Chlorella*.

Ce dépôt est le tout premier brevet se rapportant à la production de micro-algues par hétérotrophie.

Au cours des années 1990, la maîtrise de l'hétérotrophie de *Chlorella* va enfin permettre de produire à faible coût et en grands volumes, la biomasse de micro-algues destinées notamment aux écloséries marines asiatiques, puis européennes.

L'hétérotrophie permit la résolution des principaux points de blocage attachés à la production des micro-algues en autotrophie, tant en bassins qu'en photobioréacteurs (PBR), à savoir :

- ✓ disparition de la problématique de contamination,

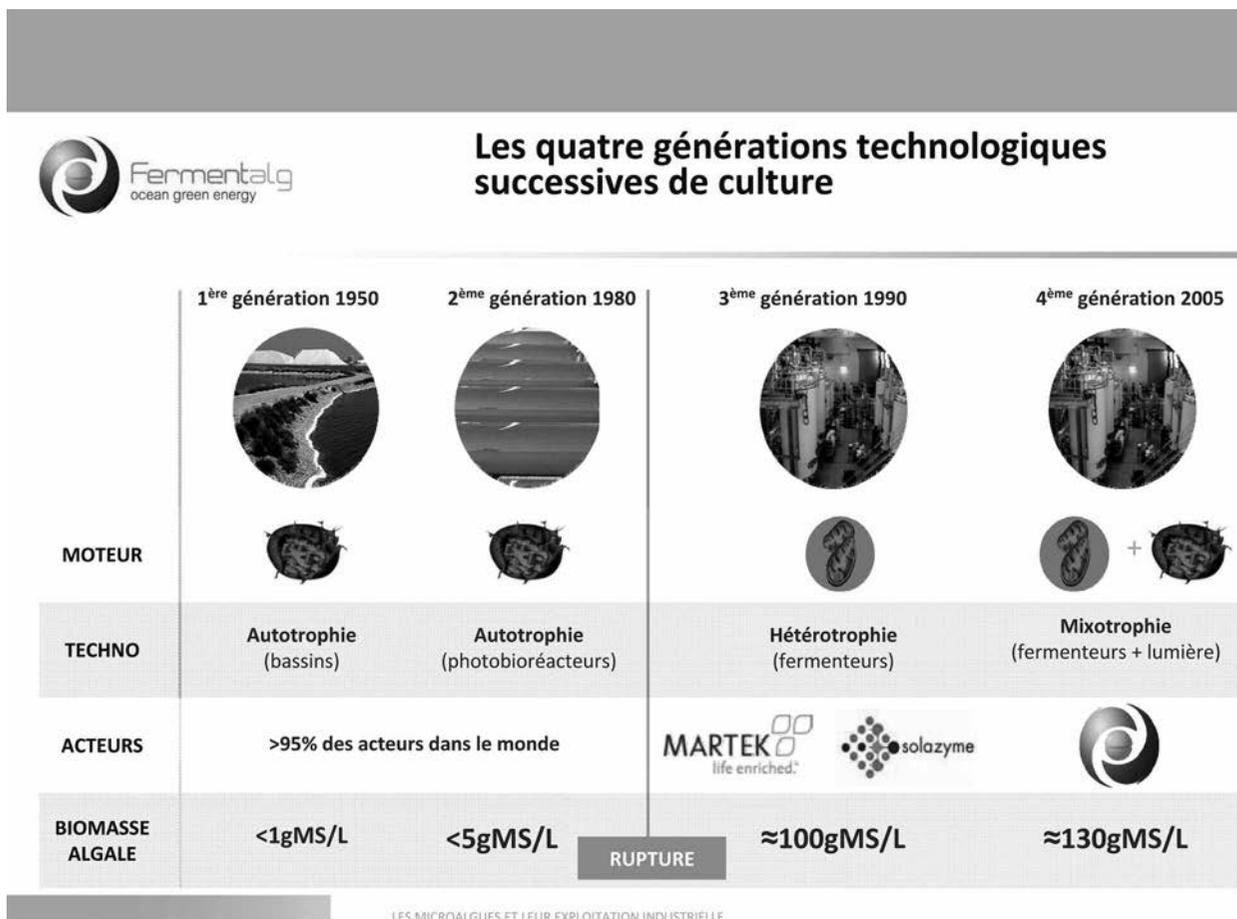


Figure 1 : Les quatre générations technologiques successives de culture.

© Fermentalg

- ✓ explosion des rendements (multipliés jusqu'à plus de 200 fois),
- ✓ réduction drastique du coût de production,
- ✓ modélisation et reproductibilité parfaite de la production permettant l'industrialisation.

L'hétérotrophie des micro-algues arrive aux États-Unis en 1985, avec la création de la société Martek Biosciences. Martek est une entreprise dont les fondateurs travaillaient pour la société Martin Marietta Corporation. Cette société opérait pour le compte de la NASA dans le cadre d'un programme pour la conquête de Mars, dont l'un des objectifs était de produire de l'oxygène à partir de micro-algues. Lorsque les programmes pour cette agence spatiale américaine se sont arrêtés, trois chercheurs, le Dr Richard J. Behrens, David Kyle et Paul Behrens, qui avaient pressenti le potentiel des micro-algues, essayèrent depuis Martin Marietta Corporation pour fonder la société Martek, grâce à leurs indemnités de licenciement.

Martek se spécialisera dans la production de souches fortement productrices d'acides gras polyinsaturés, les *thrautochytrides*, qui ne possèdent pas de chloroplastes. À noter qu'en 2012, Martek a réalisé plus d'un demi-milliard de dollars de chiffre d'affaires à partir des huiles produites par ses souches.

Récemment, les *thrautochytrides* ont été reclassés dans la famille des champignons. On les trouve en abondance dans le milieu marin, notamment en présence de décomposition de matière organique.

« Mangez du poisson, ça rend intelligent ! », ou « ingurangez une bonne cuillère d'huile de foie de morue ! », disaient nos grand-mères. Même si elles avaient bien raison, elles ne se doutaient pas que tout cela est avant tout affaire de micro-algues !... En effet, les micro-algues sont les seules productrices sur Terre de plusieurs acides gras polyinsaturés essentiels pour l'homme, des molécules que l'on retrouve en périphérie de nos neurones et qui ont pour rôle de faciliter la transmission de nos pensées.

La technologie de quatrième génération

Aujourd'hui, la grande majorité des acteurs du monde de la production industrielle des micro-algues évolue vers la mixotrophie [c'est-à-dire l'exploitation de la capacité de certaines micro-algues d'utiliser diverses sources de carbone, par autotrophie et par hétérotrophie, ndr]. Quasi inexistante au début des années 2000, cette technologie représentera plus de 80 % des volumes de micro-algues produits en 2020. La société Fermentalg est la première société en Europe à avoir

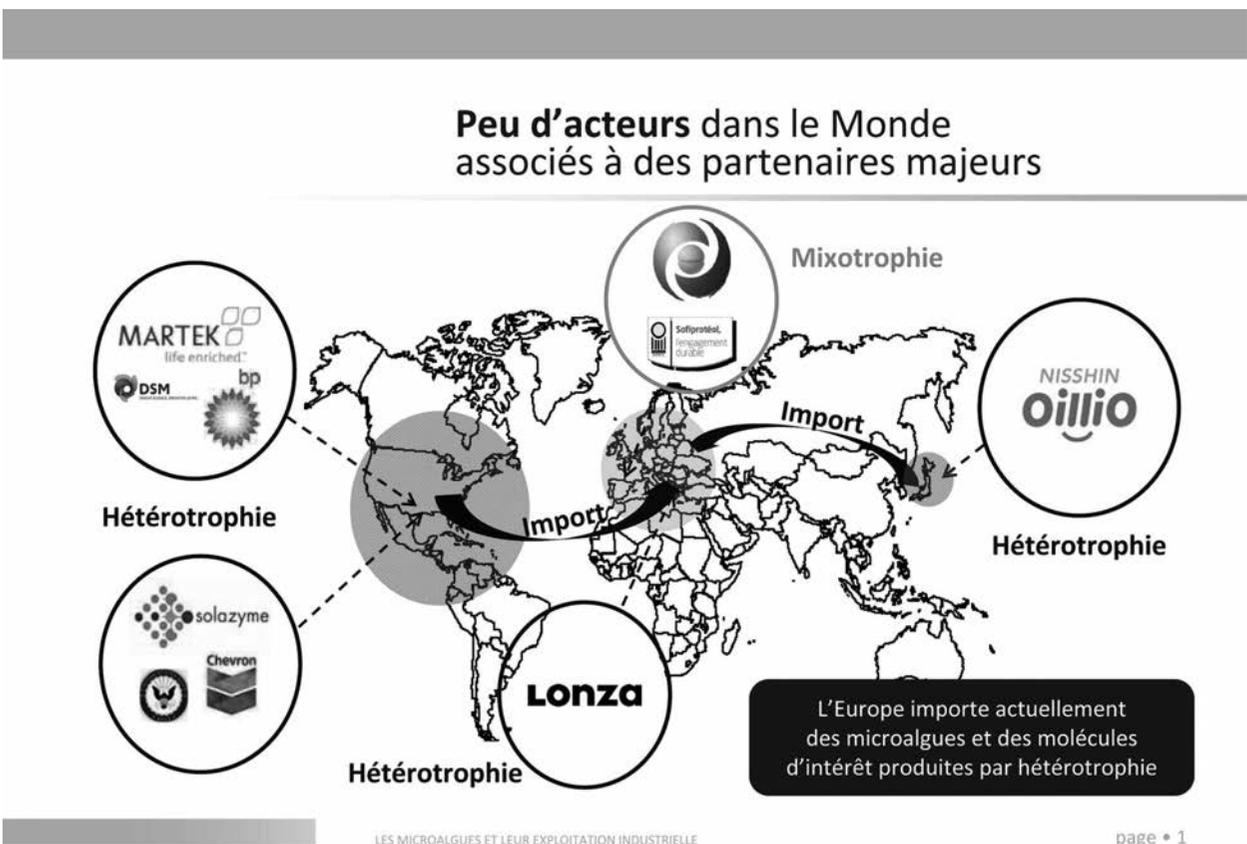


Figure 2 : Peu d'acteurs dans le monde, associés à des partenaires majeurs.

© Fermentalg

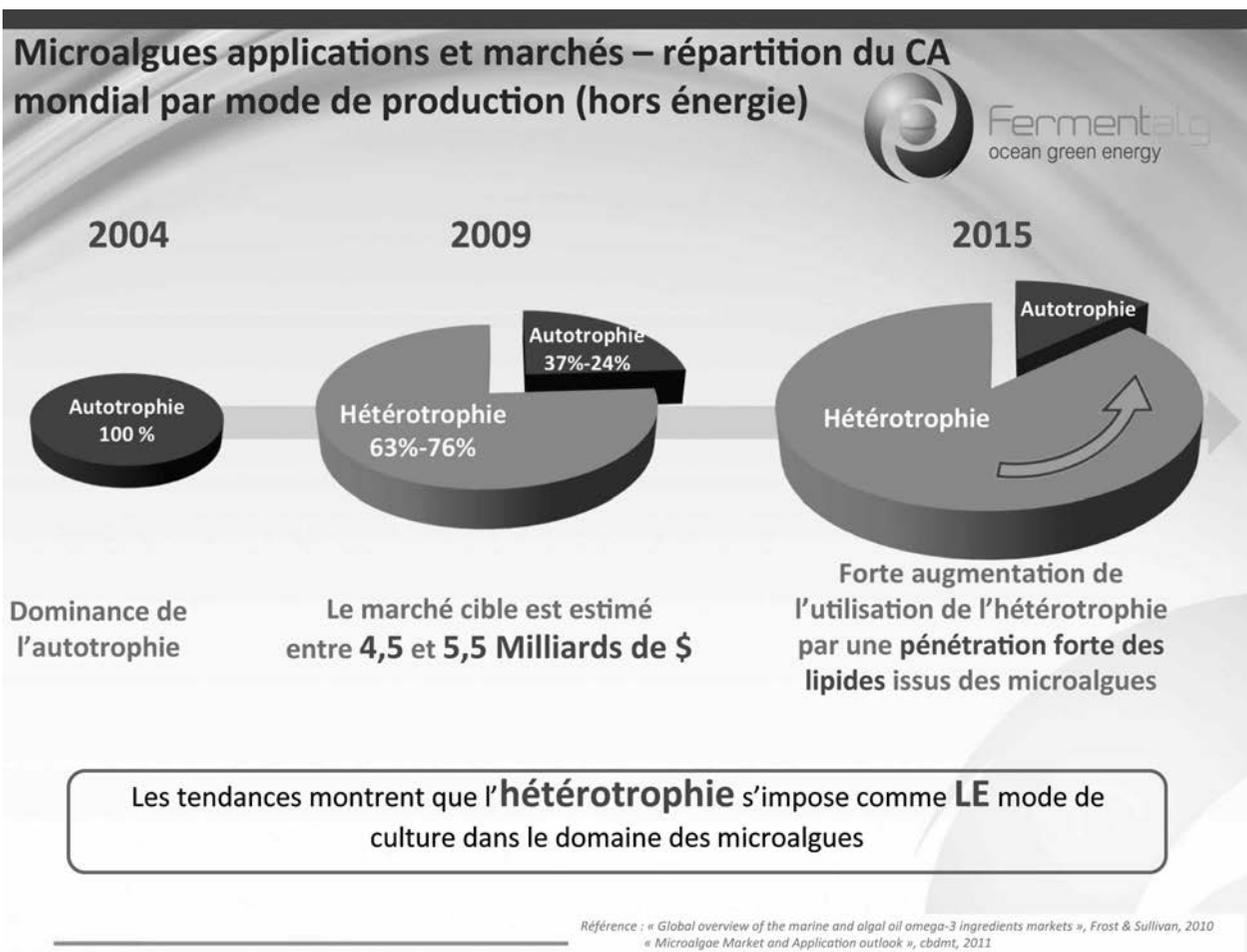


Figure 3 : Micro-algues : applications et marchés (répartition du CA mondial par mode de production).

© Fermentalg

développé et breveté une technologie de rupture, la mixotrophie à dominante hétérotrophe, et s'impose aujourd'hui comme le leader européen de la culture de micro-algues et le leader mondial sur la technologie de la mixotrophie.

Il s'agit là de la quatrième génération dans les technologies de production industrielle des micro-algues. Elle s'appuie sur les énormes acquis de la troisième génération, tout en activant la voie métabolique photosynthétique.

Dans la nature, les micro-algues ne peuvent capter l'énergie lumineuse qu'au gré du caprice des nuages, des mouvements de l'eau en surface, du vent et de la densité de la biomasse présente. En réalité, comme pour un panneau solaire, seul le plan d'eau, en surface, permet la captation, et les souches ne font que des micro-passages très brefs au contact de la lumière solaire.

Trois milliards d'années d'évolution ont permis aux micro-algues de développer une parfaite activité photosynthétique à partir de micro flash lumineux d'intensité

variable, tout en continuant à absorber à volonté le carbone organique éventuellement présent autour d'elles.

La mixotrophie, ou photohétérotrophie, découle de ces constats. Elle permet désormais de produire de façon industrielle – c'est-à-dire à grande échelle, à haut rendement et à faible coût de production – toutes les souches de micro-algues.

Briques primaires de la construction du vivant qui, par empilement de couches successives, ont évolué jusqu'à nous, les micro-algues représentent, de par les innombrables molécules qu'elles sont capables de synthétiser, un gisement exceptionnel à explorer. Le XXI^e siècle sera l'ère des micro-algues. Nous allons les produire abondamment pour satisfaire tous les domaines de nos activités.

Note

* Président directeur général et fondateur de Fermentalg.