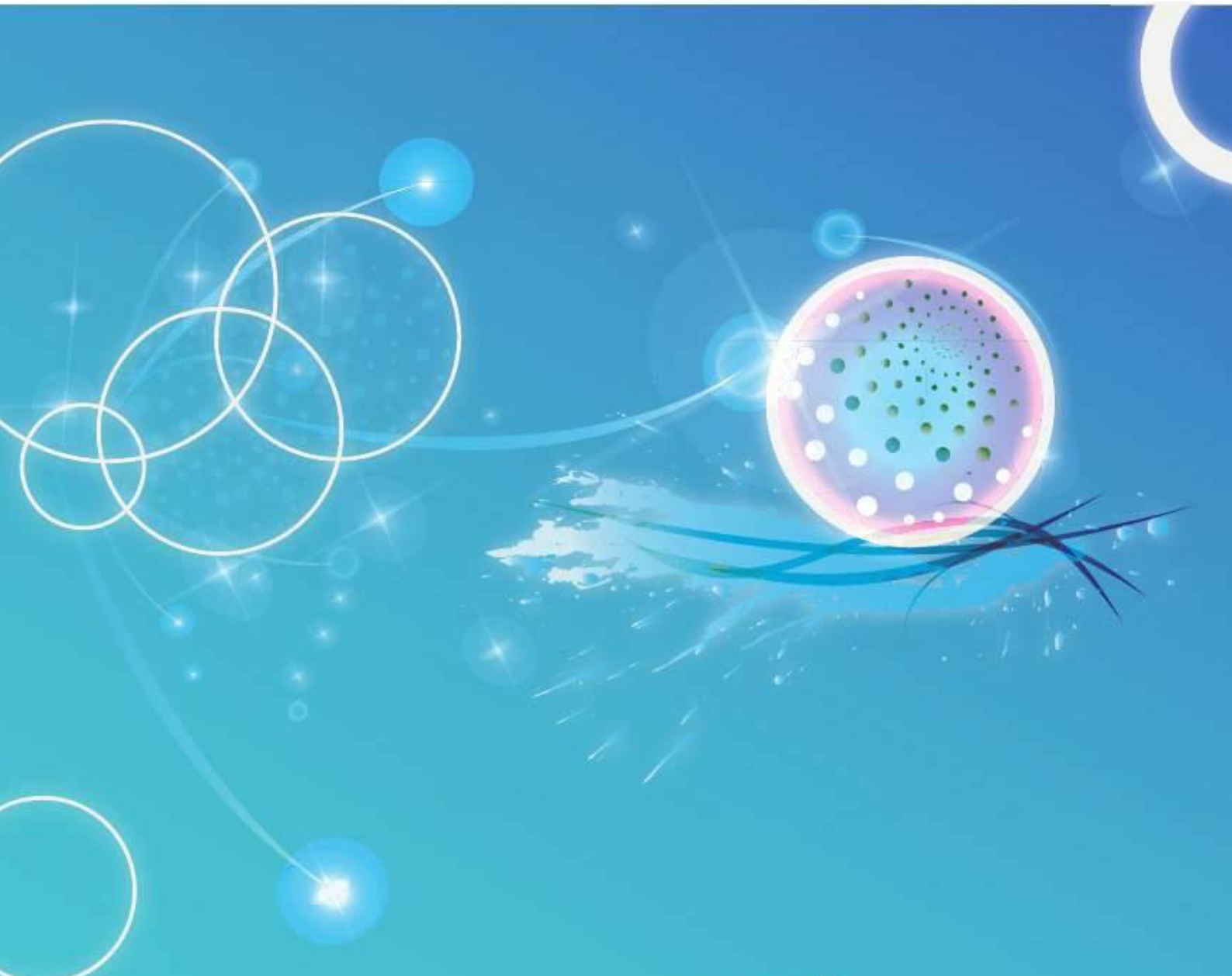




Algues, filiales du futur

Livre Turquoise

Édition Adebiotech – Romainville – Juillet 2011

Ce document est diffusé sous licence Creative Commons BY-NC-SA

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/fr/>

Selon cette licence vous êtes libres :

- De reproduire, distribuer et communiquer ce document au public.
- De le modifier.

Selon les conditions suivantes :

- Paternité : vous devez citer le nom des auteurs originaux de ce document ainsi que celui d'Adebiotech qui l'édite.
- Pas d'utilisation commerciale : vous n'avez pas le droit d'utiliser cette œuvre à des fins commerciales.
- Partage des Conditions Initiales à l'Identique : si vous modifiez, transformez ou adaptez ce document, vous n'avez le droit de distribuer la création qui en résulte que sous un contrat identique à celui-ci.

À chaque réutilisation ou distribution, vous devez faire apparaître clairement aux autres les conditions contractuelles de mise à disposition de cette création.

Chacune de ces conditions peut être levée si vous obtenez l'autorisation du titulaire des droits.

Ce qui précède n'affecte en rien vos droits en tant qu'utilisateur (exceptions au droit d'auteur : copies réservées à l'usage privé du copiste, courtes citations, parodie...).

LIVRE TURQUOISE

Algues, filières du futur

Colloque Algues : filières du futur !

17-19 Novembre 2010

Adebiotech, Romainville

Auteur

Julie PERSON *[Trimatec]*

Coordinateurs

Danielle LANDO *[Adebiotech]*

Daniel MATHIEU *[Trimatec]*

Comité de rédaction du Livre Turquoise

Daniel MATHIEU *[Trimatec]*

Jean-François SASSI *[CEVA]*

Laura LECURIEUX-BELFOND *[Trimatec]*

Robert GANDOLFO *[Pôle Mer PACA]*

Catherine BOYEN *[CNRS - SB Roscoff]*

Olivier LÉPINE *[Alpha Biotech]*

Jérémy PRUVOST *[CNRS - Université de Nantes]*

Philippe POTIN *[CNRS - SB Roscoff]*

Éric DESLANDES *[Pôle Mer Bretagne]*

Pierre CHAGVARDIEFF *[CEA-DSV]*

Antoine FINDELING *[Veolia Environnement]*

Jack LEGRAND *[CNRS - Université de Nantes]*

Jean-Paul CADORET *[IFREMER]*

Olivier BERNARD *[INRIA]*

Contributeurs financiers : DGCIS - Trimatec - Adebiotech

Éditeur Adebiotech

Comité de pilotage du colloque « Algues : filières du futur ! »

Pierre CALLEJÀ [<i>Fermentalg</i>]	Manuel GEA [<i>Adebiotech/BM Systems</i>]
Pierre CHAGVARDIEFF [<i>CEA-DSV</i>]	Florence HALLOUIN [<i>Atlanpole Blue Cluster</i>]
Sandrine DEREUX [<i>Pôle IAR</i>]	Danielle LANDO [<i>Adebiotech</i>]
Antoine FINDELING [<i>Veolia Environnement</i>]	Daniel MATHIEU [<i>Trimatec</i>]
Robert GANDOLFO [<i>Pôle Mer PACA</i>]	Rachel PORTAL-SELLIN [<i>Pôle Mer Bretagne</i>]

Comité scientifique du colloque « Algues: filières du futur! »

Catherine BOYEN [<i>CNRS-SB Roscoff</i>]	Jack LEGRAND [<i>CNRS-Université de Nantes</i>]
Jean-Paul CADORET [<i>IFREMER</i>]	A-Sophie LEPEUPLE [<i>Veolia Environnement</i>]
Laurent CURNAC [<i>CEA-DSV</i>]	Magali SIAUT [<i>Fermentalg</i>]
Éric DESLANDES [<i>Pôle Mer Bretagne</i>]	Daniel THOMAS [<i>IAR</i>]

Responsables des Ateliers de Réflexion Thématique

Catherine BOYEN [<i>CNRS - SB Roscoff</i>]	Frédéric BOUVIER [<i>Roquette Frères</i>]
Laurent CURNAC [<i>CEA-DSV</i>]	Éric DESLANDES [<i>Pôle Mer Bretagne</i>]
François-Yves BOUGET [<i>CNRS - OO Banyuls</i>]	Olivier BERNARD [<i>INRIA</i>]
Olivier LÉPINE [<i>Alpha Biotech</i>]	A-Sophie LEPEUPLE [<i>Veolia Environnement</i>]
Jack LEGRAND [<i>CNRS - Université de Nantes</i>]	Yannick LERAT [<i>CEVA</i>]
Alexis RANNOU [<i>Soliance</i>]	Pierre CALLEJÀ [<i>Fermentalg</i>]
Jean-Paul CADORET [<i>IFREMER</i>]	

Comité de rédaction du Livre Turquoise

Julie PERSON [<i>Auteur - Trimatec</i>]	Éric DESLANDES [<i>Pôle Mer Bretagne</i>]
Daniel MATHIEU [<i>Trimatec</i>]	Philippe POTIN [<i>CNRS - SB Roscoff</i>]
Jean-François SASSI [<i>CEVA</i>]	Pierre CHAGVARDIEFF [<i>CEA-DSV</i>]
Laura LECURIEUX-BELFOND [<i>Trimatec</i>]	Antoine FINDELING [<i>Veolia Environnement</i>]
Robert GANDOLFO [<i>Pôle Mer PACA</i>]	Jack LEGRAND [<i>CNRS - Université de Nantes</i>]
Catherine BOYEN [<i>CNRS - SB Roscoff</i>]	Jean-Paul CADORET [<i>IFREMER</i>]
Olivier LÉPINE [<i>Alpha Biotech</i>]	Olivier BERNARD [<i>INRIA</i>]
Jérémy PRUVOST [<i>CNRS - Université de Nantes</i>]	

Préface

Adebiotech, le « think tank » des biotechnologies en France, est un acteur important dans la promotion des biotechnologies par la création de réseaux et par des actions concertées entre acteurs publics et acteurs privés.

C'est ainsi qu'Adebiotech a souhaité initier une réflexion avec Veolia et Trimatec dans un premier temps puis d'autres acteurs importants du domaine, pour évaluer l'intérêt d'un colloque sur les algues, leurs potentiels industriels et les différents aspects économiques.

Dans ce secteur en pleine évolution, avec des retombées potentielles dans les domaines de la chimie fine, de la santé, de l'alimentation ou de l'énergie, la France avait-elle la capacité à être compétitive par rapport au reste du monde ? Pour essayer de répondre à cette question, nous avons réuni un grand nombre d'acteurs publics et privés du domaine, ainsi que plusieurs investisseurs en attente d'une vision claire de cette filière pour en comprendre les enjeux et envisager d'y investir.

Le colloque « Algues : filières du futur ! » a été la première manifestation d'une action fédératrice portée par Adebiotech, avec la participation de quatre Pôles de Compétitivité - Industrie et Agro-Ressources, Mer Bretagne, Mer PACA et Trimatec - la filière Atlanpole Blue Cluster, le CEA-DSV, et deux industriels - Fermentalg et Veolia - auxquels se sont joints Roquette, EADS, Ifremer et le CEVA (Centre d'Étude et de Valorisation des Algues). Les Ministères de l'Industrie, de la Recherche, de l'Alimentation et de l'Environnement (MEDDTL) ont également manifesté leur intérêt pour cette initiative et apporté leur soutien.

Cette manifestation a été un grand succès et le comité d'organisation tient à rendre hommage à tous les partenaires qui ont apporté leur soutien à cette action notamment les membres du Comité de Pilotage et du Comité Scientifique, les différents intervenants, que nous remercions chaleureusement pour nous avoir présenté leurs expériences et les perspectives qui peuvent en découler, ainsi que les responsables d'Ateliers de Réflexion Thématiques (ART) sans qui rien n'aurait pu être réalisé pour atteindre les objectifs que nous nous étions fixés :

- fédérer les acteurs,
- affirmer le positionnement de la France sur les filières algues,
- mettre l'accent sur les points forts et les points faibles de cette filière,
- lever les obstacles et verrous de toute nature,
- proposer des actions concrètes aux Pouvoirs Publics et aux investisseurs.

Ce colloque n'est pas une fin en soi mais une première étape, aussi avons-nous décidé de le valoriser en le restituant sous la forme d'un ouvrage. C'est l'ouvrage que vous avez entre les mains et que nous avons appelé « Livre Turquoise » pour rappeler la couleur de la mer qui fait rêver. Nous tenons à remercier Julie Person, rédactrice, pour sa ténacité et sa motivation pour ce travail, ainsi que tous ceux qui nous ont aidés à le mettre en forme.

Nous espérons que ce document apportera à tous ce qu'ils cherchent, et qu'il sera le point de départ pour que les filières algues en France soient encore plus présentes sur la scène internationale.

Danielle LANDO, Vice-présidente Adebiotech

Membre du Comité de Pilotage du colloque « Algues : filières du futur ! ».

Les pôles de compétitivité et les filières « Algues »

Depuis leur création les pôles TRIMATEC, Mer PACA, Mer Bretagne et Industries et Agro-Ressources (IAR) se sont intéressés à la thématique de production et d'utilisation de la biomasse algale, dont les grandes applications sont en adéquation avec les axes thématiques de ces quatre pôles : énergies renouvelables ; bioraffinerie, génie des procédés ; aquaculture et alimentation ; matières premières pour la chimie verte et enfin biotechnologies par la production d'actifs ou de molécules à forte valeur ajoutée destinées à la nutrition-santé, la pharmacie ou la cosmétique.

Ainsi les pôles ont labellisé depuis 2005 plusieurs projets de recherche à l'exemple de SHAMASH ou SYMBIOSE et de nombreux projets industriels SALINALGUE, EIMA, ALGOHUB, ECOKELP, AZOSTIMER, TOPLIPID... (Voir liste en annexes). 51 projets y ont été recensés pour plus de 350 millions d'euros de budget.

Les Pôles ont mis en place des actions spécifiques dédiées, visant la mise en réseau des acteurs industriels et de recherche, en vue de soutenir l'émergence de projets collaboratifs d'innovation autour des algues. En témoignent l'action Algasud au sein du pôle TRIMATEC, les programmes « Aquaculture durable et biotechnologies bleues » du pôle Mer PACA, la commission « Ressources biologiques marines » du pôle Mer Bretagne, le regroupement des acteurs locaux de la filière algues autour de l'Atlantopole Blue Cluster nantais, l'organisation de workshop entre les acteurs anglais et français par le Pôle IAR.

Par ailleurs, conscients des enjeux internationaux et de l'intérêt de développer une filière industrielle dans le domaine des micro-algues, les quatre pôles ont signé en 2009 une convention « production et valorisation des micro-algues » dont l'objectif est de contribuer à **l'organisation d'une filière française de production et de valorisation des micro-algues à usage industriel**, (bioénergie, remédiation du gaz carbonique, dépollution des eaux, chimie industrielle, provende pour animaux) en soutenant les projets de R&D et industriels jugés structurants pour la filière. IFREMER et le CEA sont les invités permanents des réunions organisées dans le cadre de cette convention. Le pôle réunionnais QUALITROPIC a lui-aussi rejoint la convention début 2011. D'autres acteurs du domaine des algues devraient être invités. L'un des rôles majeurs des pôles est de créer et d'animer des passerelles entre les secteurs public et privé de l'industrie, de la recherche et de la formation et soutenir l'émergence de projets collaboratifs d'innovation.

Les quatre pôles ont été parties prenantes dans l'organisation du colloque « Algues : filières du futur ! » qui s'est tenu fin 2010 à Romainville en Région parisienne, colloque qui a rassemblé la quasi-totalité des acteurs scientifiques et industriels du domaine. C'est à la suite de ce colloque qu'a été décidée la rédaction du présent « Livre Turquoise » comprenant un volet Actes du colloque et un volet Préconisations.

Les pôles, de par leur histoire et leur reconnaissance, pourront également être forces de proposition pour la filière auprès des ministères ou d'organismes comme l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, l'Agence Nationale de la Recherche, la Commission européenne via les comités de programmes, les GTN (Groupe Technique National),... et intervenir autant que de besoin dans l'élaboration des cahiers des charges des appels à projets lancés par ces dits organismes.

Les pôles sont également en relation directe avec l'EABA (European Algae Biomass Association) dont l'un des objectifs est d'établir une liaison permanente avec la Commission européenne et les institutions européennes. Les pôles, représentatifs de leurs réseaux d'acteurs agiront au niveau national sur les aspects normatifs.

Robert GANDOLFO, Pôle Mer PACA

Les Pôles : moteurs du développement des filières Algues.

Éditorial d'Alain Griot

La valorisation des algues est une thématique qui prend de l'ampleur depuis quelques années. Ainsi, Il ne se passe actuellement pas un jour sans qu'un article ne paraisse sur ce thème, que ce soit dans la presse généraliste ou dans la presse spécialisée en environnement ou dans les énergies renouvelables.

Certes, tous ces articles n'ont pas la même teneur : certains sont très positifs, vantent les avancées de la technologie et la nouvelle frontière que constituent ces découvertes pour apporter des solutions dans des domaines aussi variés que l'alimentation, la chimie verte et, désormais, le développement de carburants de substitution.

D'autres, moins optimistes, soulignent que les micro-algues notamment ne résoudront pas tous nos problèmes énergétiques et que, comme toute nouvelle technologie, celles relatives à la valorisation des algues ont encore un long chemin à faire pour constituer une alternative économiquement viable aux solutions actuelles.

Mais ce n'est pas une raison pour ne pas développer de nouveaux produits et de nouveaux procédés et réduire le temps de mise sur le marché de ceux-ci.

Et c'est bien pour cela que le travail mené par tous les scientifiques, industriels et décideurs réunis pour le séminaire organisé en novembre dernier par Adebiotech et ses partenaires, et qui sert de support à ce « Livre Turquoise » est si important. Il a permis en effet de faire le point sur l'avancée de ces technologies, sur leur degré de maturité, sur les espérances de commercialisation. Il a aussi permis de démontrer par ailleurs que le domaine des biotechnologies, longtemps concentré sur les seules applications liées à la santé, est aujourd'hui ouvert à un ensemble de marchés, dont celui relatif à la valorisation des algues.

Ce séminaire ne s'est pas concentré uniquement sur les applications des algues relatives à l'énergie, mais sur celles de l'ensemble de la filière : macro-algues, micro-algues, applications liées à la santé, à l'alimentation, à la chimie verte, et bien sûr, aux biocarburants.

Ceci présente d'autant plus d'importance que lorsque l'on regarde le modèle économique de la filière, il apparaît de plus en plus évident que son équilibre se fera certainement en créant une synergie entre applications à faible volume et forte valeur ajoutée et applications à fort volume générant moins de recette unitaire.

Le titre du séminaire « créer de la valeur ajoutée durable sur le territoire français dans l'utilisation des propriétés biologiques des algues » résume bien un certain nombre d'enjeux qui se posent à l'ensemble des acteurs de cette filière :

- Créer de la valeur ajoutée, c'est donner une valeur économique à partir d'une recherche française dynamique et reconnue depuis longtemps. Car il ne faut pas oublier que des équipes françaises sont à la pointe de la recherche dans ce domaine depuis de nombreuses années, même si pendant très longtemps, leurs travaux ont connu une exposition médiatique nettement moindre qu'aujourd'hui.

- Créer de la valeur ajoutée, c'est être capable, à partir de ces travaux scientifiques de première importance, de développer des applications industrielles économiquement viables.
 - Créer de la valeur ajoutée, c'est se positionner dans un contexte mondial dynamique (il n'est pour s'en convaincre que de regarder ce qui se passe aujourd'hui aux États-Unis ou en Australie).
 - Rendre durable cette valeur ajoutée sur le territoire français, cela suppose que celle-ci soit créée en France et donc que, dans ce domaine, comme dans d'autres, des entrepreneurs osent se lancer sur ce marché, et que des outils de financement publics, notamment par le biais d'Oséo, soient mis à leur disposition ; mais il faut également que les investisseurs privés croient en ces technologies et permettent la croissance de ces entreprises. Les dernières levées de fond effectuées par des entreprises de ce secteur semblent donner aujourd'hui un signal positif.
 - Rendre durable cette valeur ajoutée, cela suppose aussi que la relation entre les entreprises et les chercheurs soit la plus efficiente possible. Les pôles de compétitivité, créés il y a maintenant 5 ans, ont démontré leur pertinence dans la mise en œuvre de cette démarche de synergie au service de la compétitivité de l'industrie française, notamment par leur capacité à faire émerger des projets collaboratifs et à accompagner les porteurs tout au long de leur projet, y compris dans la phase de valorisation industrielle. La présence, en tant que co-organisateur des pôles MER BRETAGNE, MER PACA, INDUSTRIES ET AGRORESSOURCES, TRIMATEC démontre bien la volonté de ceux-ci de s'inscrire durablement dans l'accompagnement de cette filière.
- L'État a également bien évidemment son rôle à jouer dans le développement de cette filière :
- Tout d'abord en favorisant la mise en relation des acteurs. Ainsi, à la demande des pôles de compétitivité, le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) a réuni, en septembre 2010, l'ensemble des porteurs de projets afin de les faire échanger sur les moyens de générer encore plus de synergies sur leurs projets.
 - En mettant en place un certain nombre d'outils dont pourront bénéficier les acteurs de la filière pour réussir ce pari de la création de valeur ajoutée durable : programmes de recherche portés par l'ANR ; Fonds Unique Interministériel (FUI) en ce qui concerne les projets d'innovation portés par les pôles de compétitivité ; Investissements d'Avenir, avec notamment 5,1 milliards d'euros consacrés à la croissance verte (dont les démonstrateurs en énergie décarbonée et chimie verte portés par l'ADEME) ; mais également un certain nombre d'outils spécifiques : actions en faveur des biotechnologies, laboratoires d'excellence, équipements d'excellence, instituts d'excellence en énergie décarbonée, plateformes mutualisées d'innovation et projets structurants des pôles de compétitivité.

Des moyens importants sont ainsi mis aujourd'hui aux services des acteurs pour favoriser ce développement industriel et les acteurs de la filière algues se doivent, pour pouvoir en

bénéficier, de présenter les projets les plus pertinents et d'avoir pour cela une démarche cohérente.

Le ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement a lancé une réflexion sur les dix-huit filières industrielles stratégiques de l'économie verte. S'il n'y a pas dans ce travail de filière spécifique sur les algues, celles-ci sont des éléments importants de plusieurs des filières identifiées : biocarburants, biomasse énergie, chimie verte, valorisation du CO₂.

Ceci montre bien l'importance prise par les technologies objet de ce séminaire et du Livre Turquoise qui en découle. Mais au-delà, cela montre également la nécessité que les acteurs français de cette filière se structurent pour être encore plus visibles à l'international. Car ne nous trompons pas, cette visibilité, cette force collective qu'il convient de développer seront nécessaires pour exister dans une compétition mondiale qui devient de plus en plus forte.

C'est pour cela que le travail mené par ADEBIOTECH et ses partenaires pour le développement de cette filière est si important.

Alain GRIOT

Sous directeur de l'Innovation

Commissariat Général au Développement Durable

Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement

Introduction Générale

« *Er mor ez eus danvez* », « dans la mer il y a de la richesse » disent les Bretons

Les algues sont des végétaux beaucoup moins connus que les plantes terrestres, et beaucoup plus difficiles à appréhender. Elles occupent en grande partie les milieux aquatiques, en particulier marins et sous-marins et constituent un ensemble d'organismes extrêmement divers qu'il est fort difficile de présenter de manière univoque. Un grand nombre d'entre elles, pour ne pas dire une large majorité, sont des formes unicellulaires (micro-algues) dont la reconnaissance nécessite des techniques microscopiques parfois très élaborées. Sur le plan de la systématique, les algues sont également très diversifiées ce qui témoigne de leur très longue histoire génétique. Elles ne constituent pas au sein des végétaux un ensemble homogène, mais se répartissent entre plusieurs lignées évolutives complètement indépendantes les unes des autres. Ainsi, pour ce qui concerne les algues marines, on distingue essentiellement trois voies d'évolution : la lignée brun-jaunes avec les algues brunes, la lignée rouge avec les algues rouges et la lignée verte qui regroupe à la fois les algues vertes, les mousses, les fougères et les plantes à fleurs. Il y a en effet, malgré les convergences de forme, plus de différences génétiques entre une algue brune comme un *Fucus* (goémon de rive) et une algue verte de genre *Ulva* (laitue de mer), qu'entre cette dernière et un chêne ! Cette grande hétérogénéité explique la richesse et la diversité biochimique à l'origine de leur exploitation. Mais combien y a-t-il d'espèces d'algues ? Difficile de répondre à cette question, notamment pour les algues unicellulaires, tant leur nombre est grand, leur diversité inconnue et leur recensement et classification en constante évolution. La base de données internationale sur les algues AlgaeBase recense environ 127 000 noms d'espèces, dont la majorité de micro-algues. Il y aurait environ 9 000 espèces de macro-algues, dont 1 500 peuplent les mers d'Europe, et le nombre total de micro-algues, quant à lui, varie selon les estimations de 100 000 à plusieurs millions !

Concernant la valorisation de cette immense richesse, elle n'en est qu'à ses balbutiements. En effet, bien que certaines macro-algues soient exploitées depuis l'antiquité dans la plupart des pays maritimes, notamment dans les pays d'extrême orient, leur exploitation à l'échelle mondiale reste marginale par rapport à la production végétale terrestre : 15 millions de tonnes de macro-algues (dont 13,5 Mt de culture) et 7 à 10 000 tonnes de micro-algues ($\cong 100\%$ en culture), contre 4 milliards de tonnes pour la production agricole. La France, et l'Europe sont aujourd'hui en retard face aux pays asiatiques qui ont eux développés des techniques de production leur permettant aujourd'hui de satisfaire à leurs besoins qui sont énormes, notamment en termes de consommation alimentaire. Mais leur production permet également de pouvoir exporter de la matière première dans le monde entier. La France, et notamment la Bretagne, ont des savoirs faire importants, particulièrement en termes de production aquacole, de transformation et de formulation, ce qui leur permet d'exporter de plus en plus leurs produits.

Les micro-algues quand à elles ne pèsent aujourd'hui que 10 mille tonnes par an en culture contrôlée, c'est-à-dire en dehors des micro-algues utilisées pour le traitement des eaux résiduaires. Cette faible exploitation quantitative des algues, comparativement à la ressource potentiellement disponible en France, s'explique principalement par le manque de maturité industrielle d'une filière qui est en émergence. Elles jouent cependant un rôle important dans le domaine de l'agroalimentaire en fournissant des gélifiants comme les carraghénanes et les alginates, qui n'ont pas d'équivalents d'origine terrestre. Leur utilisation dans le domaine de la cosmétique et de la chimie est en plein essor, indiquant un renouveau dans leur valorisation à l'échelle industrielle.

Les micro-algues utilisées depuis longtemps comme source alimentaire au Tchad ou en Amérique latine (la Spiruline est en fait une cyanobactérie souvent assimilée à une micro-algue), ne sont cultivées et exploitées industriellement que depuis quelques dizaines d'années. Leur développement s'est fait en parallèle à celui de l'aquaculture de poissons et de coquillages bivalves. Leur usage principal est en effet de nourrir les larves d'aquaculture. Elles sont aussi cultivées pour produire du bêta-carotène ainsi que différentes autres molécules d'intérêt pour l'alimentation humaine, la cosmétique, la pharmacie. Leur usage à des fins énergétiques n'a été envisagé que depuis les années 1980, suite au premier choc pétrolier, et ce n'est que récemment qu'elles ont attiré à nouveau l'attention de la recherche et de l'industrie comme source de biocarburant, notamment pour l'aviation. En effet, la quantité de lipides qu'elles contiennent les prédispose à ce type d'usage, tout comme leur richesse en protéines et en acides gras polyinsaturés (oméga 3) en font de bonnes candidates pour l'alimentation aquacole. Mais, aujourd'hui, le pas important à franchir reste celui de leur exploitation à grande échelle afin qu'elles puissent jouer un rôle significatif sur le marché mondial dans les années à venir. Là est tout l'enjeu des travaux en cours dont ce rapport permettra de mieux appréhender les enjeux et les défis qui restent à lever.

En ce qui concerne les filières proprement dites, macro-algues et micro-algues se distinguent par de nombreux traits, conduisant à des filières de production et dans une moindre mesure de valorisation, singulièrement différentes. Ces principales différences portent à la fois sur les modes de culture : essentiellement en milieu maritime naturel pour les macro-algues, et en bassins ou en photobioréacteurs pour les micro-algues ; sur les techniques de récoltes : ramassage facile, proche de la pêche pour les macro-algues et séparation-concentration techniquement difficile, mais proche des techniques rencontrées dans les biotechnologies industrielles, pour les micro-algues ; transformation classique proche de l'agroalimentaire, mais aussi techniques d'extraction et de raffinage pour les macro-algues, et techniques de bioraffinage évoluées pour les micro-algues. Il en est de même pour les marchés relatifs à chaque filière qui sont intrinsèquement différents. Afin de répondre à cette disparité, nous avons choisi de traiter ces deux grandes filières dans deux chapitres différents en ce qui concerne l'état de l'art et de ne les rassembler que pour discuter des axes de recherche prioritaires à mettre en place à l'échelle nationale, en les regroupant selon la chaîne de la valeur commune pour leur exploitation.

Daniel MATHIEU, Pôle Trimatec

Avant propos

Methodologie

Ce livre s'articule en deux parties majeures pour lesquelles deux méthodologies différentes ont été utilisées.

La première partie, l'état des lieux des filières algues en France (macro et micro-algues) est un recueil d'informations issues de diverses sources. Parmi celles-ci, on y retrouve les présentations faites par les acteurs lors du colloque « Algues : filières du futur ! », complétées par un travail de recherche, de sélection et, parfois, de traduction de documents et d'études tant français qu'internationaux. Il est à souligner que l'absence de citation des sources écrites tout au long de ce chapitre est volontaire. Toutes les sources sont répertoriées à la fin du document dans la bibliographie.

La partie « Analyses et perspectives » issues de l'identification des verrous scientifiques, technologiques et réglementaires s'est construite avec la participation active des différents acteurs et experts dans le domaine français.

La feuille de route a fait l'objet d'une réunion physique permettant sa rédaction, issue d'un travail consensuel, elle reflète la vision de tous.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les équipes de Trimatec et d'Adebiotech pour m'avoir confié ce projet et pour m'avoir accordé leur confiance et leur soutien tout au long de cette mission.

Merci à Alain Griot, Martine Choquert (MEDDTL) et Jean-Marc Grognet et ses collègues, Marc Rico et Michel Aribart (DGCIS) pour leurs conseils et leur soutien.

Merci particulièrement à Danielle Lando et Daniel Mathieu du temps qu'ils ont consacré à la coordination de cet ouvrage.

Merci aux divers acteurs et experts, sollicités à plusieurs reprises, pour leur participation active et réactive nécessaire à la réalisation de ce livre dans les délais impartis. Je pense notamment aux membres des comités scientifiques et de pilotage du colloque, de comité de rédaction du livre, des responsables des ateliers de réflexion thématiques.

Un grand merci à Jean-François Sassi pour son accueil au sein du CEVA et pour le temps consacré au travail de relecture et de correction de l'ensemble du document.

Merci à Sophie Litzler, doctorante en géographie à l'université de Paris 1, pour sa collaboration et son aide dans la réalisation de la carte des acteurs français.

Merci à Jérémy Dutheil, Doctorant au CEA de Saclay pour avoir pris le temps de m'expliquer la production du dihydrogène photosynthétique et ses enjeux.

Enfin le dernier mais pas le moindre, merci à Clément Wagner, graphiste indépendant, qui a accepté de « designer » la couverture du livre turquoise à titre gracieux.

Ce fut un immense plaisir de s'investir et de travailler avec l'ensemble de ces personnes, merci à tous.

Julie PERSON, auteur du Livre Turquoise, Pôle Trimatec

Plan du document

Sommaire

ÉTAT DES LIEUX DES FILIERES ALGUES EN FRANCE ET DANS LE MONDE.....	1
I. INTRODUCTION	1
II. LES MICRO-ALGUES.....	3
A. <i>Introduction</i>	3
B. <i>Caractéristiques des micro-algues</i>	4
1. Diversité de familles et d'espèces	4
2. Biologie, mode de vie et reproduction	6
3. Composition biochimique	7
C. <i>Production de la biomasse</i>	8
1. En culture photoautotrophe	8
2. En culture hétérotrophe	11
3. Un aperçu de quelques grandes installations à l'international	12
4. Comparaison des systèmes de production	14
D. <i>Procédés de récolte et concentration</i>	19
1. Introduction	19
2. Sédimentation gravitaire par différence de masse volumique	19
3. Floculation-décantation	19
4. Flottation	20
5. Centrifugation, action sur le nombre de g	20
6. Filtration frontale : tamisage, séparation par exclusion de taille	21
7. Filtration tangentielle membranaire : séparation par exclusion de taille	21
8. Comparaison des différents systèmes de récolte	22
9. Conclusion	23
E. <i>Procédés de prétraitement et d'extraction</i>	23
1. Séchage	24
2. Broyage	25
3. Extraction	25
F. <i>Fins de process pour les biocarburants</i>	29
1. La transestérification	29
2. La méthanisation	31
3. Les traitements thermochimiques	31
G. <i>Applications, marchés potentiels</i>	32
1. Introduction	32
2. Produits à base d'algues pour la consommation humaine	34
3. Algues pour l'alimentation animale	38
4. Cosmétiques	41
5. Énergie	42
6. Environnement	49
7. Chimie verte	51
8. Conclusion	52
H. <i>Réglementation</i>	52
1. En alimentaire	52
2. En cosmétique	53
3. Plus généralement	54

III. LES MACRO-ALGUES.....	55
A. <i>Introduction</i>	55
B. <i>Caractéristiques des macro-algues</i>	57
1. Diversité de familles et d'espèces.....	57
2. Biologie, mode de vie et reproduction	58
3. Composition biochimique.....	59
C. <i>Production et récolte de la biomasse</i>	64
1. La récolte des algues dans les populations naturelles et en échouages	65
2. Cultures d'algues dans le monde et en France	69
3. Innovations dans les cultures d'algues	75
4. Comparaison des prix de vente	78
D. <i>Procédés de prétraitement et d'extraction</i>	78
1. Séchage - Stabilisation	78
2. Broyage	79
3. Extraction de composés d'intérêt	79
4. La digestion anaérobie des macro-algues.....	84
E. <i>Applications, marchés potentiels</i>	84
1. Introduction	84
2. Les phycocolloïdes	85
3. Alimentation humaine	88
4. Santé - pharmaceutique	91
5. Cosmétiques	92
6. Agriculture	92
7. Alimentation animale	93
8. Matériaux bio-sourcés	94
9. Bioénergies, bio-raffinerie	95
10. Environnement, dépollution	96
11. Conclusion	97
F. <i>Réglementation</i>	97
1. En alimentaire.....	97
2. En cosmétique	102
3. Autres secteurs	102
4. La filière « Algues marines » biologiques.....	102
ANALYSES ET PERSPECTIVES	103
I. RESTITUTION DES ATELIERS DE REFLEXION THEMATIQUE.....	103
A. <i>ART 1 : Les programmes de génomique fonctionnelle sur les algues : un atout pour les biotechnologies</i>	103
B. <i>ART 2 : Culture et récolte des algues</i>	105
C. <i>ART 3 : Gestion des flux et procédés industriels</i>	107
D. <i>ART 4 : Valorisation des algues sur les marchés à forte valeur ajoutée</i>	108
E. <i>ART 5 : Production d'énergie et applications environnementales</i>	111
F. <i>ART 6 : Chimie et Agro-matériaux</i>	113
II. MISE EN PERSPECTIVES.....	114
A. <i>Contexte français</i>	114
B. <i>Présentation des acteurs des filières algues en France</i>	116
1. Présentation géographique	116
2. Quelques chiffres	118
C. <i>Programmes et coopérations en cours</i>	119
D. <i>Analyse des filières algues en France</i>	121
1. Pour la filière micro-algues	121
2. Pour la filière macro-algues	124

FEUILLE DE ROUTE.....	127
I. REALISER L'ETAT DES LIEUX DES FILIERES ALGUES ET LES CARACTERISER EN IDENTIFIANT LES VEROUS TECHNICO-ECONOMIQUES	127
II. FAIRE AVANCER LE PROCESSUS D'INNOVATION POUR LEVER LES VEROUS TECHNOLOGIQUES.....	127
A. <i>Sélectionner les espèces puis les souches répondant aux besoins des filières</i>	<i>127</i>
B. <i>Comprendre les mécanismes d'accumulation de composés d'intérêt</i>	<i>128</i>
C. <i>Améliorer les procédés de culture, de récolte et d'extraction, en optimisant leur productivité et en limitant leurs impacts.</i>	<i>128</i>
D. <i>Scaling up des procédés, analyse technico-économique et analyse d'impact</i>	<i>128</i>
E. <i>Développer les synergies d'application : écologie industrielle et économie circulaire.....</i>	<i>129</i>
III. FAVORISER LE DEVELOPPEMENT DES ENTREPRISES EQUIPEMENTIERES	129
IV. TRAVAILLER SUR L'INSERTION DES ENTREPRISES AU SEIN DU PAYSAGE ENVIRONNEMENTAL ET SOCIETAL	130
A. <i>Identifier les contraintes réglementaires, les besoins en ressources et caractériser les verrous territoriaux</i>	<i>130</i>
B. <i>Évaluer et atténuer les impacts des entreprises</i>	<i>130</i>
C. <i>Sensibiliser les organismes de formation aux besoins des industriels en ingénieurs et en techniciens</i>	<i>130</i>
V. SOUTENIR LA STRUCTURATION DES FILIERES ALGUES	131
A. <i>Créer des outils de R&D mutualisés.....</i>	<i>131</i>
B. <i>Favoriser la mise en commun d'outils de veille et de benchmark</i>	<i>131</i>
C. <i>Identifier ou créer la structure adéquate qui représenterait les filières algues à l'European Algae Biomass Association (EABA)</i>	<i>131</i>
ANNEXES	133
I. LISTE DES PROJETS LABELISES PAR LES POLES DANS LES FILIERES ALGUES	133
II. PROGRAMME DU COLLOQUE (CONFERENCES ET ART)	144
A. <i>Mercredi 17 novembre 2010.....</i>	<i>144</i>
B. <i>Jeudi 18 novembre 2010.....</i>	<i>145</i>
C. <i>Vendredi 19 novembre 2010.....</i>	<i>147</i>
III. POSTERS SCIENTIFIQUES PRESENTES.....	148
IV. LISTE DES PARTICIPANTS AU COLLOQUE	151
V. ARTICLES PARUS DANS LA PRESSE SUITE AU COLLOQUE « ALGUES : FILIERES DU FUTUR ! ».....	158
BIBLIOGRAPHIE	161
I. LIENS INTERNET	161
II. DOCUMENTS	162
A. <i>Présentations des intervenants du colloque</i>	<i>162</i>
B. <i>Rapports et publications.....</i>	<i>162</i>

Table des illustrations

FIGURE 1 : SECHAGE DE SPIRULINE	3
FIGURE 2 : MICRO-ALGUES	4
FIGURE 3 : PHYLOGENIE DES ALGUES D'APRES "LA CLASSIFICATION GENETIQUE DU VIVANT"	5
FIGURE 4 : TUBES SOUCHES.	6
FIGURE 5 : SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D'UNE MICRO-ALGUE, INTRANTS, PRODUITS, APPLICATIONS.	7
FIGURE 6 : SYSTEME DE PRODUCTION OUVERT DE TYPE RACEWAY.	9
FIGURE 7 : REACTEUR TUBULAIRE.....	10
FIGURE 8 : REACTEUR TUBULAIRE BioFence.	11
FIGURE 9 : TECHNOLOGIE DE PRODUCTION HETEROTROPHE.....	12
FIGURE 10 : FERMENTEUR INDUSTRIEL.....	12
FIGURE 11 : LES MARAIS SALANTS DES SALINS DE GRUISSAN.....	13
FIGURE 12 : PHOTOBIOREACTEUR DE L'USINE ALLEMANDE DE KLÖTZE.....	13
FIGURE 13 : PRODUCTIVITE EN SURFACE DES DIFFERENTES CATEGORIES DE SYSTEMES DE CULTURE SOLAIRE.....	14
FIGURE 14 : PRODUCTIVITE EN VOLUME DES DIFFERENTES CATEGORIES DE SYSTEMES DE CULTURE.	14
FIGURE 15 : DIFFERENTS TEMPS DE SEDIMENTATION.....	19
FIGURE 16 : PRINCIPE DE LA FILTRATION TANGENTIELLE.	21
FIGURE 17 : COMPARAISON DES DEUX MODES DE FILTRATION.....	22
FIGURE 18 : COMPARAISON DES SYSTEMES DE RECOLTE EN FONCTION DE LEUR CONSOMMATION ENERGETIQUE.	22
FIGURE 19 : EXTRACTION PAR CYCLES SUCCESSIFS DE DIC	24
FIGURE 20 : DIAGRAMME DES DIFFERENTS ETATS D'UN CORPS.	27
FIGURE 21 : MOLECULES EXTRACTIBLES PAR LE CO ₂ SUPERCRITIQUE SEUL ET EN PRESENCE D'ETHANOL.....	28
FIGURE 22 : REACTION DE TRANSESTERIFICATION CHIMIQUE CLASSIQUE.	29
FIGURE 23 : LES MICRO-ALGUES, LE CHAMP DES APPLICATIONS POSSIBLES.....	34
FIGURE 24 : ARTHROSPIRA.	35
FIGURE 25 : SCHEMA DE CONVERSION POTENTIEL DES ALGUES DANS LEUR TOTALITE EN BIOCARBURANTS.	42
FIGURE 26 : SCHEMA DES DIFFERENTES STRATEGIES DE CONVERSION DES EXTRAITS D'ALGUES EN BIOCARBURANTS.	43
FIGURE 27 : L'ALGAEUS, LA PREMIERE VOITURE AU BIOCARBURANT ALGAL LEGALEMENT HOMOLOGUEE AUX USA.....	44
FIGURE 28 : LES DIFFERENTS METABOLISMES VITAUX DES ALGUES, DEPENDANTS DE LA PHOTOSYNTHESE, FAISANT « CONCURRENCE » A LA PRODUCTION DE DIHYDROGENE PHOTOSYNTHETIQUE.....	48
FIGURE 29 : PRINCIPE DU LAGUNAGE DE MEZE - LOUPIAN.	49
FIGURE 30 : ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION MONDIALE EN VALEUR MARCHANDE ET EN QUANTITE.	55
FIGURE 31 : FLUX D'IMPORT / EXPORT MONDIAUX 2008.	56
FIGURE 32 : SCHEMA DE L'ÉVOLUTION DES LIGNEES EUCARYOTES PHOTOSYNTHETIQUES.	57
FIGURE 33 : LE CYCLE DE REPRODUCTION DE L'ALGUE BRUNE <i>LAMINARIA DIGITATA</i>	58
FIGURE 34 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE MACRO-ALGUE BRUNE DE TYPE FUCALE.....	59
FIGURE 35 : DIVERSES ESPECES DE MACRO-ALGUES	60
FIGURE 36 : PRINCIPAUX COLLOÏDES PRESENTS DANS CHAQUE FAMILLE D'ESPECE.	61
FIGURE 37 : LA PECHE EMBARQUEE DE LAMINAIRES A L'AIDE DU SCOUBIDOU.	66
FIGURE 38 : RECOLTE DES ALGUES A LA FAUCILLE	67
FIGURE 39 : RAMASSAGE D'ALGUES VERTES ECHOUÉES.	67
FIGURE 40 : LA PECHE DE <i>GELIDIUM SP.</i> A HENDAYE AU PAYS BASQUE.....	68
FIGURE 41 : MAREE VERTE, ECHOUAGE D'ALGUES SUR LA PLAGES.....	68
FIGURE 42 : LA CULTURE D'ALGUES EN CHINE.	70
FIGURE 43 : SCHEMA DES ETAPES DE LA CULTURE SUR CORDES.....	71
FIGURE 44 : CULTURE DU WAKAME EN BRETAGNE.....	72
FIGURE 45 : LA CULTURE D' <i>UNDARIA PINNATIFIDA</i> EFFECTUEE PAR LE CEVA	73
FIGURE 46 : DIAGRAMME CONCEPTUEL D'UNE OPERATION D'AQUACULTURE MULTI-TROPHIQUE INTEGREE.....	75

FIGURE 47 : LES MULTIPLES USAGES DES PARCS ÉOLIENS OFF-SHORE POUR LA CO-CULTURE ALGUES ET FRUITS DE MER.	76
FIGURE 48 : METHODE « FINE » D'EXTRACTION DES CARRAGENANES UTILISES DANS L'INDUSTRIE.	83
FIGURE 49 : MARCHES EUROPEENS ET MONDIAUX: FAMILLES D'APPLICATION.	84
FIGURE 50 : MISE EN EVIDENCE DE LA PLACE DES PHYCOCOLLOÏDES PARMI LES COLLOÏDES UTILISES POUR EPAISSIR OU GELIFIER LES SOLUTIONS AQUEUSES.	85
FIGURE 51 : MARCHES D'APPLICATION DES ALGINATES.	86
FIGURE 52 : REPARTITION DES PRINCIPALES UTILISATIONS DES CARRAGENANES.	87
FIGURE 53 : LES LABORATOIRES DE RECHERCHE, LES ENTREPRISES DE MACRO-ALGUES ET DE MICRO-ALGUES PAR REGION FRANÇAISES.	117
FIGURE 54 : PROPORTION DES ACTEURS FRANÇAIS DANS LES FILIERES ALGUES.	118
FIGURE 55 : REPARTITION DES ACTIVITES DES LABORATOIRES SUR LA CHAÎNE DE VALEUR.	118
FIGURE 56 : REPARTITION DES PROJETS EN FONCTION DE LA FILIERE ALGUES, EN BUDGET ET EN NOMBRE.	119
FIGURE 57 : REPARTITION DES PROJETS EN FONCTION DES ACTIVITES, EN BUDGET ET EN NOMBRE.	120
FIGURE 58 : REPARTITION DES PROJETS EN FONCTION DES FILIERES ET DES ACTIVITES, EN BUDGET ET EN NOMBRE.	120
FIGURE 59 : MICRO-ALGUES, UN APERÇU DE LA FILIERE SUR LA CHAÎNE DE VALEUR.	121
FIGURE 60 : ANALYSE SWOT DE LA FILIERE MICRO-ALGUES EN FRANCE.	123
FIGURE 61 : MICRO-ALGUES, DELAIS D'ACCESSIBILITE DES DIFFERENTS MARCHES EN FONCTION DES VERROUS LEVES.	124
FIGURE 62 : MACRO-ALGUES, UN APERÇU DE LA FILIERE SUR LA CHAÎNE DE VALEUR.	124
FIGURE 63 : ANALYSE SWOT DE LA FILIERE MACRO-ALGUES EN FRANCE.	126

Table des tableaux

TABLEAU 1 : COÛTS DE PRODUCTION DE LA BIOMASSE MICRO-ALGALE.	15
TABLEAU 2 : COÛTS D'INVESTISSEMENT D'UN SYSTEME RACEWAY POUR UNE PRODUCTIVITE DE 30 G.M ⁻² .JOUR ⁻¹	16
TABLEAU 3 : COMPARAISON DES SYSTEMES ET MODES DE CULTURE DE MICRO-ALGUES.	18
TABLEAU 4 : COMPARAISON DES SYSTEMES DE RECOLTE EN FONCTION DE LEUR OBJECTIF D'HUMIDITE FINALE.	23
TABLEAU 5 : MICRO-ALGUES PRODUITES COMMERCIALEMENT, QUANTITES, LOCALISATIONS, APPLICATIONS ET VALEUR DU MARCHÉ EN 2004.	33
TABLEAU 6 : COMPARAISON DE QUELQUES BIOMASSES SOURCES DE BIODIESEL.	44
TABLEAU 7 : EXEMPLES DE NOMENCLATURE INCI D'EXTRAITS COSMETIQUES A BASE DE MICRO-ALGUES.	54
TABLEAU 8 : COMPARAISON DES PRIX DE VENTE DES MACRO-ALGUES EN 2009.	78
TABLEAU 9 : VALEUR GLOBALE ANNUELLE DES PRODUITS ISSUS DES ALGUES.	86
TABLEAU 10 : UTILISATIONS ACTUELLES DES CARRAGENANES K, I ET Λ.	88
TABLEAU 11 : MACRO-ALGUES AUTORISEES EN ALIMENTATION HUMAINE.	98
TABLEAU 12 : TENEURS MAXIMALES EN METAUX LOURDS ET EN IODE AUTORISEES EN FRANCE POUR LES ALGUES DESTINEES A LA CONSOMMATION HUMAINE.	99
TABLEAU 13 : CRITERES MICROBIOLOGIQUES A RESPECTER SELON LE CSHPF.	101
TABLEAU 14 : CODES EUROPEENS DES ADDITIFS ALIMENTAIRES DES COLLOÏDES ALGAUX.	101
TABLEAU 15 : MICRO-ALGUES, ATOUTS ET DIFFICULTES DANS LES MARCHES DE LA HAUTE VALEUR AJOUTEE.	122
TABLEAU 16 : MICRO-ALGUES, ATOUTS ET DIFFICULTES DANS LES MARCHES DE MASSE.	122
TABLEAU 17 : MACRO-ALGUES, ATOUTS ET DIFFICULTES DANS LES MARCHES DE LA HAUTE VALEUR AJOUTEE.	125
TABLEAU 18 : MACRO-ALGUES, ATOUTS ET DIFFICULTES DANS LES MARCHES DE MASSE.	125
TABLEAU 19 : PROJETS MACRO-ALGUES.	133
TABLEAU 20 : PROJETS MICRO-ALGUES.	137

État des lieux des filières algues en France et dans le monde

I. Introduction

Les algues au cœur du vivant : de la richesse d'une biodiversité exceptionnelle à l'existence de substances naturelles originales et utiles à l'homme.

Lorsque l'on parle de micro-algues ou de macro-algues dans cet ouvrage, il s'agit tout d'abord de rappeler que ces deux termes sont associés à la notion plus générale du terme « algues ». Les algues ne constituent pas un groupe évolutif unique mais désignent une série d'organismes pouvant appartenir à des groupes phylogénétiques très différents. Les « algues » constituent un vaste assemblage artificiel d'organismes phylogénétiquement éloignés, dont l'étude a donné naissance à une discipline : la phycologie.

Il n'est donc pas facile de traiter de ces végétaux dans leur globalité : par exemple la physiologie, la biochimie et la biologie moléculaire montrent que des groupes d'algues en apparence très homogènes en terme de morphologie n'ont pas pour autant une relation évolutive étroite (les macro-algues rouges sont par exemple plus proches des micro-algues que des macro-algues vertes).

On peut malgré tout tenter de définir une algue. Les « algues » peuvent être considérées comme des organismes généralement inféodés aux zones humides (d'eaux marines, d'eaux saumâtres ou d'eaux douces), le plus souvent photosynthétiques et possédant de la chlorophylle *a*. Les algues ne peuvent donc occuper que des niches écologiques permettant l'accès à la lumière quoiqu'il puisse exister parfois durant le cycle de vie un stade non photosynthétique. Pour le milieu marin qui renferme une large proportion des algues, il s'agit de la zone photique qui n'excède pas 100m de profondeur voire beaucoup moins selon la turbidité des eaux ; les algues sont donc limitées à la frange littorale, en particuliers celles qui sont fixées au substrat (macro-algues), et à la couche photique en eau libre (micro-algues). La vie des algues s'inscrit bien entendu dans la biosphère et contribue en tant que biomasse végétale au maintien des équilibres de celle-ci ; c'est particulièrement vrai en zone côtière riche en sels nutritifs pour les micro-algues (on parle de « bloom » phytoplanctonique) ainsi que pour les grands « champs » de macro-algues présentes sur le littoral breton. En zone océanique, dont les surfaces sont considérables, la richesse en plancton végétal est conditionnée par la remontée d'eaux profondes riches en nutriments. Les algues présentent aussi une grande diversité morphologique basée sur plusieurs niveaux d'organisation (unicellulaire et pluricellulaire) qui se manifeste au niveau de la taille : de 1 à 100 microns pour les cellules du phytoplancton à plusieurs mètres pour certaines macro-algues. Cette même diversité et complexité se retrouve aussi à travers les modes de reproduction sexuée et les divers modes de multiplication végétative.

Les algues et les voies métaboliques : métabolismes primaire et secondaire.

Quelque soit la biodiversité des algues, la plupart de ces organismes ont en commun un caractère universel : la photosynthèse. Un organisme photosynthétique apparaît comme un convertisseur d'énergie lumineuse en énergie chimique, la réaction étant catalysée par les

pigments photosynthétiques. L'énergie chimique est stockée sous forme de polysaccharides dont le devenir pourra être soit d'assurer un rôle de composé de réserve ou de soutien. L'étude biochimique de ces trois paramètres fondamentaux (pigments, polysaccharides de réserve et polysaccharides de soutien) est commune à toutes les algues et sert parfois comme critère simplifié de classification. On constate donc que des substances essentielles à la vie sont métabolisées (anabolisme et catabolisme) par l'ensemble des organismes de micro-algues ou de macro-algues : on parle alors de métabolisme primaire. Ces métabolites primaires traduisent ainsi l'unité du monde vivant, ainsi la fucoxanthine est le pigment majoritaire commun aux micro-algues diatomées et aux algues brunes macrophytes. Il est toutefois remarquable de noter que les particularités du milieu marin conditionnent parfois l'existence de métabolites primaires originaux et largement exploités (par exemple les polysaccharides polyanioniques chez les macro-algues). Ainsi les algues vivent et se développent grâce à un ensemble complexe de réactions biochimiques, certaines conduisent aussi à la synthèse de métabolites non essentiels au maintien de la vie - on parle alors de métabolites secondaires - dont la richesse en terme de familles de molécules chimiques est remarquable. Ces métabolites secondaires traduisent la diversité du monde vivant. Chez les algues, par exemple, il y aurait ainsi une corrélation directe entre le pourcentage de métabolites secondaires azotés et le degré d'évolution des algues. Ainsi, contrairement aux dinoflagellés, les diatomées ne contiennent que très rarement des toxines actives chez les êtres vivants. Le cas de l'acide domoïque est très intéressant puisque c'est l'un des rares métabolites secondaires azotés rencontrés chez les diatomées (par exemple chez *Pseudonitzschia*) que l'on retrouve aussi chez l'algue rouge macrophyte *Chondria armata*. Ce composé est utilisé en pharmacologie dans l'étude des maladies dégénératives du système nerveux central.

Ainsi l'ensemble de ces observations sur le métabolisme des algues nous permet de conclure à la similitude des approches expérimentales en ce qui concerne l'étude des molécules extraites des algues. Toutes les familles de composés chimiques actuellement connus dans le monde du vivant sont représentées chez les algues avec, en plus, des structures entièrement originales sans équivalent terrestre connu à ce jour.

Ce texte permet de mettre en évidence les points de convergences qui relient les micro-algues et les macro-algues notamment en termes d'approches scientifiques et de domaines de recherche fondamentale. C'est ainsi que le développement récent de la chimie des substances naturelles marines accompagne l'effort de développement des biotechnologies marines appliquées aux algues : par exemple, la culture en photobioréacteurs des micro-plantules de certaines algues rouges macrophytes devrait permettre la production de composés terpéniques halogénés. La technologie développée pour les micro-algues est transposable aux domaines des biotechnologies appliquées aux macro-algues. Plusieurs organismes de recherche (CNRS, INRA, IFREMER...) et quelques universités participent à cet objectif de mutualisation à travers diverses actions fédératrices telles que la création du GDR Biochimar, les réponses à des appels à projet réalisés dans le cadre des investissements d'avenir (IDEALG, IEED GREEN STARS...). Dans le contexte du LIVRE TURQUOISE, cette synergie intéresse bien entendu les champs d'applications et les marchés potentiels de molécules actives issues des algues et présente l'opportunité d'une offre commune au niveau économique et commercial.

Éric DESLANDES, Pôle Mer Bretagne.

II. Les Micro-algues

A. Introduction

Principaux composants du phytoplancton, les micro-algues (en incluant les cyanobactéries) sont des êtres photosynthétiques unicellulaires peuplant les océans et cours d'eau depuis plus de trois milliards et demi d'années. La consommation des algues remonterait à des millénaires. Les scientifiques ont découvert que le phytoplancton était consommé au Mexique depuis le temps des aztèques et que les tchadiens consomment la spiruline séchée depuis plusieurs décennies.



Figure 1 : Séchage de spiruline
(Source : Présentation M. Tredici)

En Europe, c'est dans un contexte de pénurie alimentaire que les chercheurs ont commencé à s'intéresser aux algues microscopiques en tant qu'aliment ou complément alimentaire, dès 1940 : leurs teneurs en protéines auraient permis de palier les problèmes de malnutrition. La première installation industrielle

de culture de chlorelle, développée pour l'alimentation des proies utilisées pour l'alimentation des juvéniles de poissons d'élevage, a vu le jour dans les années 1960, au Japon.

En France, les premières traces d'utilisation remontent à la fin des années 1970 avec l'apparition des premières écloseries de mollusques et la production d'algues fourrages pour l'aquaculture. Au cours du temps, les entreprises dédiées à la production de micro-algues, les micro-algoculteurs, ont fait évoluer leurs procédés de production et ont surtout ajouté de la valeur à leur production en commercialisant des extraits. D'autres applications ont ensuite émergé : les industries agroalimentaires associées à la nutraceutique, les industries cosmétiques également associées à la cosméceutique, puis d'autres acteurs sur le territoire français qui fabriquent des réactifs pour le diagnostic et le contrôle. Il existe notamment deux entreprises en France produisant et commercialisant des allophycocyanines sur le marché international : Alpha Biotech et Greensea.

La courbe de croissance de la production mondiale des micro-algues entre 1975 et 2000 est exponentielle passant de moins de 5 tonnes à 3 500 tonnes. En 2004, la production mondiale de micro-algues toutes espèces confondue était estimée entre 7 000 et 10 000 tonnes de matière sèche, pour une valeur marchande globale de plus de 4,5 milliards de dollars US. 276 entreprises étaient alors référencées dans ce domaine à l'échelle mondiale, un tiers d'entre elles produisant essentiellement les trois espèces dominantes : *Spirulina*, *Chlorella* et *Dunaliella*.

Aujourd'hui, avec seulement quelques dizaines d'espèces de micro-algues cultivées, la production mondiale plafonne à 10 000 tonnes chaque année. Cette valeur reste négligeable en comparaison à celle de la production mondiale de macro-algues (15 millions de tonnes).

Les espèces de micro-algues les plus cultivées sont par ordre décroissant : la cyanobactérie *Arthrospira* (la spiruline, qui représenterait 50% de la production mondiale), suivie par les micro-algues vertes *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus*, *Nannochloropsis* et la diatomée *Odontella*.

L'Asie est le premier producteur de micro-algues au monde, et représente à elle seule environ 50% de la production mondiale. Les principaux autres pays producteurs sont les USA, le Chili, l'Argentine, Israël, l'Australie. En Europe, l'Allemagne et les Pays-Bas sont les premiers producteurs avec environ 50 tonnes chaque année. La France quant à elle, a développé les premières unités de production de micro-algues plus tardivement – à la fin des années 80 – et l'on dénombre aujourd'hui une trentaine de sites de production sur le territoire et pour une production d'environ 10 à 15 tonnes par an.

De manière générale, en dehors de quelques espèces, les micro-algues n'ont pas encore atteint leur niveau de maturité industrielle. Des problématiques de constance de qualité et de coût de production se posent encore, ce qui limite leur accès à certains marchés.

B. Caractéristiques des micro-algues

1. Diversité de familles et d'espèces

Peuplant les eaux douces comme marines, les micro-algues présentent une diversité plus grande que celle de toutes les plantes terrestres. Il existerait sur le globe au moins 200 000 espèces différentes. Certains auteurs avancent même des chiffres supérieurs à un million d'espèces. Ces organismes constituent un groupe polyphylétique et très diversifié de procaryotes (les algues bleues ou cyanobactéries) et eucaryotes (où l'on retrouve les algues vertes, rouges et brunes). Le classement en divisions est basé sur diverses propriétés telles que la pigmentation, la nature chimique des produits de stockage issus de la photosynthèse, l'organisation des membranes photosynthétiques et d'autres caractéristiques morphologiques.

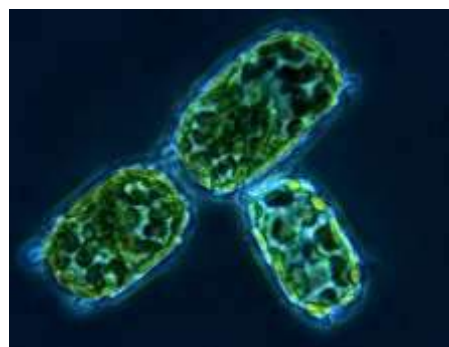


Figure 2 : Micro-algues
Source : IFREMER

Les algues rouges et vertes appartiendraient à une même famille (Plantae) et seraient apparues il y a deux milliards d'années. Les algues brunes et les diatomées seraient issues d'une association d'une micro-algue rouge et d'un organisme unicellulaire hétérotrophe, apparues il y a un milliard d'années elles forment la famille des Chromalvéolates. À noter que certains travaux rapprochent les algues rouges des algues brunes en prenant en considération des marqueurs biogénétiques différents.

Les cyanobactéries sont des algues bleues procaryotes dont la principale espèce cultivée est la spiruline. Apparues il y a environ 3,8 milliards d'années elles auraient permis la production d'oxygène dans l'atmosphère en réalisant la photosynthèse. Leurs cellules ont une structure procaryote typique des bactéries. La photosynthèse se produit directement dans le cytoplasme. Elles seraient à l'origine des chloroplastes des cellules eucaryotes, et auraient ainsi permis aux végétaux de réaliser la photosynthèse, à la suite d'une endosymbiose.

Chez les micro-algues eucaryotes la photosynthèse se produit dans des structures particulières, entourées d'une double membrane plastidiale, qu'on appelle chloroplastes. Ces organites cellulaires contiennent de l'ADN et sont similaires aux cyanobactéries validant l'hypothèse de l'endosymbiose.

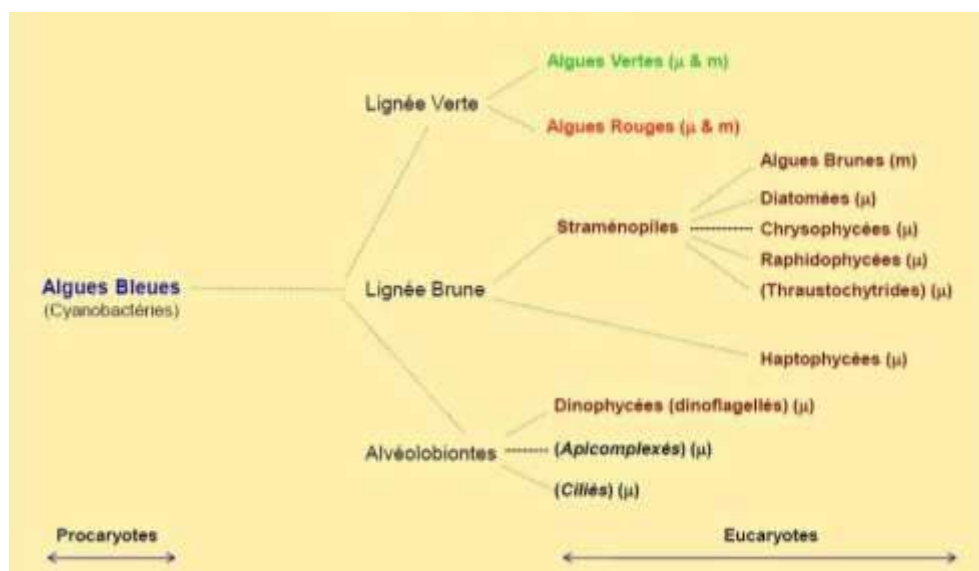


Figure 3 : Phylogénie des algues d'après "La classification génétique du vivant".

(Source : Présentation J.M. Kornprobst - Université de Nantes - d'après G. Lecointre, H. Le Guyader, 2001-2006)

Concernant les collections françaises, il convient de souligner la présence de la "Roscoff Culture Collection" (RCC <http://www.sb-roscoff.fr/Phyto/RCC>) à la station biologique de Roscoff. Cette collection internationale de micro-algues, créée en 1998 et entretenue depuis, a pour but de maintenir à long terme des souches et de les rendre accessibles pour la recherche fondamentale et appliquée et pour l'enseignement en France et au-delà. Cette souchothèque a également pour vocation d'isoler des nouvelles souches et d'assurer la qualité et la traçabilité des ressources biologiques qu'elle détient.

La RCC contient en 2011 plus de 1900 souches de micro-algues et cyanobactéries avec des représentants de plus d'une vingtaine de classes d'algues et de protistes provenant d'une grande diversité d'environnements : la Manche, l'Atlantique Nord, la mer du Nord, la mer Méditerranée, la mer Rouge, l'Océan Arctique, le Pacifique équatorial, l'Atlantique tropical, et l'Océan Indien. Récemment elle a incorporé des bactéries photohétérotrophes ainsi que des virus de micro-algues. **La RCC est l'une des 5 plus grandes collections de cultures de micro-algues marines au monde**, constituant une ressource biologique très importante pour cerner la diversité taxonomique du phytoplancton. Elle rend possible de nombreuses recherches fondamentales et appliquées.

Deux autres souchothèques conséquentes existent en France : l'Algobank à Caen qui comprend près de 400 espèces et la collection de culture de l'institut Pasteur spécialisé dans les cyanobactéries. Par ailleurs, un certain nombre de laboratoires (CNRS/UPMC LOV, IFREMER PBA, CEA/CNRS LB3M, ...) ont mis en place leur propre souchothèque pour gérer les diverses espèces et souches sur lesquels ils travaillent.

2. Biologie, mode de vie et reproduction

Plusieurs espèces de micro-algues sont capables de passer d'une croissance photoautotrophe (grâce à la lumière qui fournit l'énergie pour convertir le CO₂ en chaînes carbonées) à une croissance hétérotrophe (sans lumière) utilisant le glucose ou d'autres substrats carbonés utilisables pour le métabolisme du carbone et de l'énergie. Certaines algues peuvent également se développer par mixotrophie en combinant les deux modes.



Figure 4 : Tubes souches.
(Source : Greensea)

Les micro-algues présentent l'avantage d'avoir un cycle de division très court, de l'ordre de quelques heures, permettant la production rapide de biomasse (plusieurs grammes de matière sèche par litre).

Leur développement fait intervenir plusieurs facteurs de croissance et conditions de culture comme : l'eau, les nutriments, la lumière, le CO₂, la température et le pH de la culture, ainsi que l'agitation. En fonction des souches cultivées l'eau est douce, marine ou saumâtre.

L'apport en eau et sa qualité vont conditionner et influencer la culture des algues. Pour une croissance optimale en photobioréacteurs, il est souvent nécessaire de débiter la culture dans une eau stérile dépourvue de tout autre micro-organisme ou molécule pouvant inhiber ou concurrencer la croissance des algues, ou au moinsensemencer avec une quantité significative de biomasse.

Les nutriments nécessaires à la croissance des algues varient en fonction du mode trophique, de la souche cultivée et de la source d'eau choisie. Dans le mode autotrophe, les micro-algues sont capables d'utiliser des formes minérales azotées (nitrate, nitrite, ammonium), et phosphatées (phosphate). Quel que soit le mode de croissance, les algues nécessitent également du potassium, du fer et de la silice (pour les diatomées), du soufre, des métaux sous forme de traces, et des vitamines.

Il est à noter que certaines carences en nutriments sont appliquées volontairement dans le but de stimuler la production de certains métabolites. Par exemple, une carence azotée, phosphorée ou siliciée peut induire, chez certaines espèces, une forte accumulation de lipides.

Pour le mode hétérotrophe, une source de carbone organique est utilisée (sucres, acides organiques, glycérol, etc.).

Comme pour tout végétal chlorophyllien, la photosynthèse permet de fixer le dioxyde de carbone atmosphérique ou dissous dans l'eau à partir de l'énergie lumineuse pour produire de la biomasse. Les algues utilisent différents pigments chlorophylliens leur permettant de capter des photons de diverses longueurs d'onde.

En fonction des applications et des superficies de culture, la lumière naturelle (solaire) est utilisée ou bien les algues sont éclairées par une source lumineuse artificielle (néons, LED...).

La température, le pH, le carbone inorganique dissous et le taux d'homogénéisation de la culture sont des facteurs importants pour la culture. En effet, en fonction de la souche cultivée, il existe des gammes pour ces paramètres garantissant une croissance optimale. Les performances de la culture peuvent être significativement dégradées loin de ces conditions optimales.

Parmi les facteurs limitant la croissance il y a l'accumulation d'oxygène dans le milieu produit par la photosynthèse en système clos. Il faut par ailleurs veiller aux risques de contamination par d'autres microorganismes dont la croissance plus rapide pourrait l'emporter sur les souches recherchées, ou bien par des prédateurs qui peuvent rapidement consommer la biomasse. Des virus peuvent également être responsables de dysfonctionnements des procédés de culture. Ce problème est en grande partie résolu pour les algues croissant en milieu extrêmophile, comme les eaux hyper-salées (telle que *Dunaliella salina*) ou hyper alcalines (telle que la spiruline) qui limitent la croissance des prédateurs et des microorganismes concurrents.

3. Composition biochimique

Les micro-algues présentent une très grande diversité de molécules au sein de leurs cellules. Cette biomasse se différencie principalement des autres végétaux par sa richesse en lipides, en protéines, en vitamines, en pigments et en antioxydants.

Elles représentent une source importante de quasi toutes les vitamines essentielles : B1, B6, B12, C, E, K1, et possèdent un large panel de pigments, fluorescents ou non, pouvant aussi avoir un rôle d'antioxydants. En plus de la chlorophylle (0,5 à 1% de la matière sèche) qui est le pigment photosynthétique primaire chez toutes les algues photosynthétiques, on trouve toute une gamme de pigments supplémentaires de type caroténoïdes (0,1 à 0,2% de la matière sèche) et phycobiliprotéines (phycoérythrine et phycocyanine). Les pigments principalement exploités sont la phycocyanine de la spiruline (colorant bleu), la phycoérythrine (couleur rouge) de *Porphyridium purpureum*, l'astaxanthine d'*Haematococcus pluviialis* ou le bêta-carotène de *Dunaliella salina*.

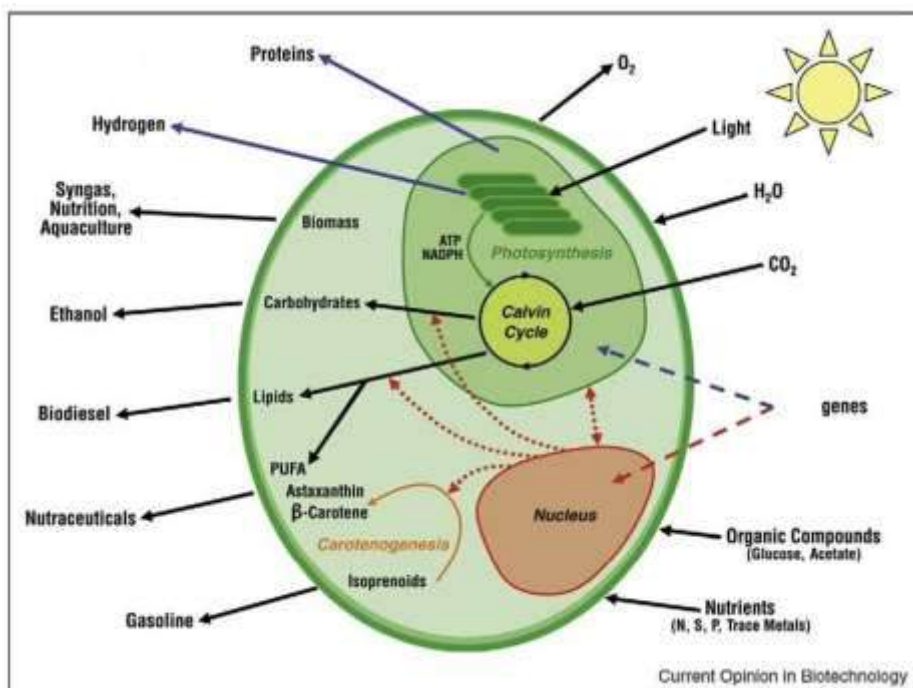


Figure 5 : Schéma de fonctionnement d'une micro-algue, intrants, produits, applications.
(Source : Rosenberg et al. , Current Opinion in Biotechnology ,2008, modifiée par nos soins)

Les micro-algues peuvent accumuler plus de 50% de leur poids sec en lipides. Ces derniers sont principalement constitués de triglycérides, de phospholipides, et de glycolipides. Ces lipides contiennent des acides gras saturés et polyinsaturés (AGPI) comme les oméga-3 : ALA, EPA, DHA, ou les oméga-6 : ARA.

Le contenu élevé en protéines, peptides et acides aminés (entre 12 et 65% de matière sèche) de plusieurs espèces de micro-algues est une des principales raisons pour les considérer comme une source non conventionnelle de protéines dans l'alimentation humaine et animale (pisciculture).

Certaines espèces présentent aussi une richesse en oligosaccharides et polysaccharides, d'autres encore peuvent produire des molécules à activité antivirales, antibiotiques, ou anti-prolifératrices chez l'homme.

Beaucoup de molécules restent probablement encore à découvrir et font l'objet de recherches dans beaucoup de laboratoires à travers le monde.

C. Production de la biomasse

La production de la biomasse algale a évolué au cours du temps, sur le territoire français les premiers producteurs d'algues sont apparus avec les premières écloseries à fin des années 1970. Les micro-algues étaient alors produites à ciel ouvert le plus souvent dans des bassins en mode discontinu et en conditions semi-contrôlées. Depuis, les techniques de production ont évolué pour arriver aujourd'hui à des productions en mode continu et contrôlé en photobioréacteurs ; les systèmes ouverts ayant également bénéficié d'optimisation et d'automatisation des cultures.

Dans certains cas, micro- et macro-algues sont cultivées conjointement, dans des conditions symbiotiques qui bénéficient aux deux productions (par exemple, cas d'*Odontella* et de *Chondrus* co-cultivés dans les mêmes raceways chez Innovalg, photo page 156).

Les micro-algues et cyanobactéries peuvent être cultivées en photoautotrophie, en systèmes ouverts ou fermés qui peuvent être de tailles et de géométries variées et utiliser la lumière solaire et/ou artificielle, ou par hétérotrophie, bien connue et maîtrisée depuis des années pour la culture des bactéries. Chacune de ces méthodes sont présentées ci-dessous. Leurs différents avantages et inconvénients ont été identifiés et les principaux sont présentés dans les tableaux 1 à 3 et figures 13 et 14 pour différents types de systèmes.

1. En culture photoautotrophe

Systèmes ouverts : écosystèmes naturels, lagunaires et étangs à haut rendement (Raceways)

Ce sont les systèmes les plus utilisés à ce jour pour la production de micro-algues commerciales, du fait de leur simplicité d'utilisation, de leur faible coût et de leur standardisation.

Les étangs à haut rendement sont des sortes d'étangs ouverts peu profonds, de 30 cm de profondeur maximum.

Ils peuvent être de forme circulaire ou allongée, uniques ou connectés les uns aux autres. L'eau est généralement maintenue en mouvement par des roues à aubes ou des structures en rotation, et un certain mélange peut y être accompli par des guides bien conçus. Les systèmes Raceway restent la technologie la plus utilisée.

Généralement fournis par des apports d'engrais minéraux agricoles, les nutriments peuvent aussi être fournis par les eaux de ruissellement provenant de zones à proximité des terres ou en canalisant l'eau provenant des eaux usées / traitement de l'eau. Les cultures d'algues peuvent être définies (une ou plusieurs souches sélectionnées), ou sont constituées d'un mélange indéfini de souches.



Figure 6 : Système de production ouvert de type Raceway.
(Source : <http://www.seambiotic.com/research/microalgae-speices>)

Les avantages majeurs des bassins ouverts restent leur construction facile et peu onéreuse et le fait qu'ils soient rapidement opérationnels. Systèmes peu coûteux en terme d'investissement, les cultures y sont, cependant, difficilement contrôlables, et présentent alors des productivités sensiblement plus faibles que pour des photobioréacteurs. Plusieurs facteurs pouvant en être la cause ont été identifiés :

- la profondeur élevée des bassins (20-50cm) limite la pénétration de la lumière. Par conséquent la concentration de la biomasse et la productivité volumique sont faibles,
- l'apport en CO_2 est soit dépendant de la concentration atmosphérique en CO_2 , soit assuré par bullage mais son transfert dans la phase liquide reste souvent médiocre compte tenu de la faible profondeur des bassins,
- la dépendance aux conditions naturelles du milieu, température, vent et intensité lumineuse non maîtrisées, engendre une productivité aléatoire et saisonnière,
- l'ouverture du système engendre la vulnérabilité des cultures aux contaminations : pouvant facilement être contaminées par des parasites ou prédateurs extérieurs, elles n'ont donc pas une productivité stable sur de longues périodes ; (Il est à noter cependant que ce genre de système de production est très bien adapté pour des cultures de micro-algues extrêmophiles comme *Dunaliella salina* et *Spirulina* qui se développent respectivement dans des milieux fortement salés ou présentant une alcalinité élevée),
- le manque de brassage du volume de culture ne facilitant pas l'exposition continue des algues à la lumière,
- un inconvénient supplémentaire identifié est le besoin important en eau pour compenser l'évaporation forte de ces systèmes de cultures.

Systèmes fermés PBR

Les photobioréacteurs (PBR) sont différents types de réservoirs ou de systèmes fermés dans lesquels les algues sont cultivées. Ce sont des systèmes particulièrement bien adaptés pour les micro-algues sensibles aux contaminations, ils permettent également la culture des algues extrêmophiles. La culture d'algues consiste, alors, en une seule ou plusieurs souches spécifiques optimisées pour la production du produit désiré. Pouvant fonctionner de manière continue ou discontinue, la productivité en biomasse est meilleure dans le cadre d'une culture continue.



Figure 7 : Réacteur tubulaire.
(Source : Microphyt)

L'eau, les nutriments nécessaires et le CO₂ sont fournis d'une manière contrôlée. Il est à noter que le transfert du CO₂ de la phase gazeuse vers la phase liquide est optimisé. Par ailleurs, du fait de la forte productivité des systèmes, l'oxygène doit aussi être éliminé en continu pour éviter des inhibitions de croissance.

Selon les objectifs de la production et les conditions climatiques, les systèmes fermés PBR peuvent être exposés à la lumière artificielle ou au soleil en extérieur.

Il est à noter que des systèmes de régulation thermique peuvent être nécessaires pour maintenir la culture à température constante, l'éclairage solaire provoquant un réchauffement de la culture qui n'est pas compensé par une évaporation de l'eau.

À l'inverse des systèmes ouverts présentés précédemment, les photobioréacteurs sont plus chers à construire et plus complexes à mettre en place (entretien plus contraignant et procédures de nettoyage nécessaires), mais assurent un meilleur contrôle de la culture, une production plus durable dans le temps et par conséquent des rendements sensiblement plus élevés. Il existe des technologies de design très variables dépendantes à la fois de la biologie des algues et de leur environnement de culture, on peut, cependant en dégager trois grands types :

- les photobioréacteurs « airlift » à colonne verticale, la conception est simple mais les larges diamètres (dizaine de centimètres) souvent employés mènent à des efficacités en volume souvent moyennes, un bullage est assuré en pied de réacteur pour assurer le brassage,
- les photobioréacteurs tubulaires, ils constituent une alternative aux photobioréacteurs à colonne. Ils peuvent former un réseau de tubes horizontaux, verticaux, obliques, coniques ou encore serpentins. Des diamètres de quelques centimètres sont employés menant à une productivité pouvant être élevée. L'inconvénient majeur est la perte de charge importante dans le réseau tubulaire. Pour les tubes longs, des gradients de pH, de CO₂ et d'O₂ dissous peuvent apparaître, ainsi que des phénomènes de fouling (encrassement), affectant la productivité du système,
- les photobioréacteurs plats, introduits par Milner en 1953, ils permettent d'offrir une large surface éclairée, avec des épaisseurs de culture pouvant être très faibles, de quelques centimètres, voire inférieur au centimètre (photobioréacteur AlgoFilm développé dans le programme ANR BIOSOLIS). Ils peuvent être installés à l'extérieur. L'accumulation de dioxygène dissous est relativement faible dans les photobioréacteurs plats par rapport aux photobioréacteurs tubulaires horizontaux. Ils sont néanmoins sujets au fouling.

Il faut également noter que pour résoudre les problèmes d'accès à la lumière dans la culture en photobioréacteur, des systèmes illuminés à l'intérieur du volume de culture par des lampes à fluorescence ou des fibres optiques pouvant être couplées à des systèmes de captation solaire (photobioréacteur DiCoFluV développé dans le programme ANR BIOSOLIS) ont été proposés. Une très forte productivité peut être obtenue, mais la technologie, les procédures de nettoyage et de maintenance sont plus complexes.



Figure 8 : Réacteur tubulaire BioFence.
(Source : Greensea)

Il importe également de mentionner des projets de photobioréacteurs immergés dans des bassins, voire en milieu marin, dont l'immersion assure à la fois, le support mécanique des tubes (généralement des manches souples, éventuellement micro ou nano-poreuses) et l'équilibre thermique de leur contenu tamponné par l'eau environnante.

Les inconvénients liés aux photobioréacteurs, en plus de leur coût élevé et leur complexité à mettre en œuvre sont les suivants :

- des accumulations d'oxygène à des niveaux inhibiteurs (formation de radicaux libres) peuvent limiter les productivités,
- des surchauffes importantes au maximum solaire (effet de serre) peuvent nécessiter des quantités importantes d'eau à brumiser pour maintenir la température en dehors de région létales pour les cellules,
- des pertes de charges liées à la circulation du fluide souvent importantes, ce qui induit une consommation énergétique forte pénalisante dans l'objectif de produire des bioénergies,
- en cas de contamination, ces systèmes peuvent s'avérer extrêmement délicats à nettoyer pour éliminer le contaminant.

2. En culture hétérotrophe

Il est possible de cultiver des micro-algues selon des procédés biotechnologiques classiques, en utilisant des algues hétérotrophiques (ou en les rendant hétérotrophiques) et en les produisant dans des fermenteurs au lieu de photobioréacteurs.

C'est un cas particulier de bioréacteurs où l'énergie lumineuse n'est pas utilisée comme source d'énergie : on s'affranchit notamment du problème de diffusion homogène de la lumière. L'énergie est alors fournie par un substrat carboné : dans ce cas, les algues ne photosynthétisent pas mais respirent.

Les avantages de ce système de production sont :

- une productivité volumique fortement augmentée (multipliée par 100 par rapport à un système ouvert, et par 10 par rapport aux PBR),
- des concentrations en matière sèche très importantes (des centaines de grammes par litre),
- des coûts de production faibles,
- des produits obtenus de très grande qualité,

- un milieu confiné donc pas de contamination,
- pas de contrainte de localisation,
- très industrialisable,
- une technologie totalement maîtrisée à l'échelle industrielle sur les levures et bactéries depuis plusieurs décennies, par différentes filières comme la chimie et l'agro-alimentaire.

Cependant, ce système nécessite des souches adaptées au mode de culture, des coûts d'installation et d'investissement importants dus aux réacteurs, et surtout des sources de carbone externes, stérilisées et en quantité équivalentes aux produits générés. Par ailleurs, cette technologie n'est pas adaptée à la production de bioénergie à partir d'énergie solaire.

Cette technologie est donc utilisée pour la production de produits de haute valeur ajoutée (molécules organiques), il est à noter que ce système ne permet pas la production de pigments.



Figure 9 : Technologie de production hétérotrophe
(Source : Fermentalg)



Figure 10 : Fermenteur industriel
(Source : Roquette)

3. Un aperçu de quelques grandes installations à l'international

- Parmi les démonstrateurs en plein air, la société israélienne Seabiotic possède un raceway pilote de 1 hectare (ha), rattaché à une centrale électrique, et envisage de s'agrandir à 5 ha.
- Le consortium Cellana opère un site d'un peu moins de 2,5 ha de raceways à Hawaï.
- Le SD-CAB (San Diego-Center for Algae Biofuels) pour sa part développe des raceways en plein air sur 16 ha, sous des conditions faibles d'automatisation. Des plateformes plus instrumentées, et sans doute plus innovantes, sont également développées, mais à des échelles plus limitées.
- Le plus grand pilote sous serre à ce jour - et probablement le mieux automatisé - est celui du consortium Synthetic Genomics-EMRE (Exxon Mobil) en Californie. La serre abrite des photobioréacteurs de divers types ainsi qu'une quinzaine de raceways.
- L'AlgaeParc, est un projet de l'Université de Wageningen (Pays-Bas), pour 4 modules de 25 m² combinant diverses technologies PBR et/ou raceways.
- Dans le sud de la France, le projet SALINALGUE qui regroupe un large consortium d'industriels et de laboratoires pilotés par La Compagnie du Vent envisage la culture à grande échelle d'un consortium d'algues dominé par *Dunaliella salina* dans des bassins reconvertis à partir de salines en bord de mer. Le milieu extrêmophile constitué par l'eau hyper-salée limite les contaminations et les diverses prédateurs.



Figure 11 : Les marais salants des Salins de Gruissan
(Source : Les Salins de Gruissan)

- L'usine allemande de Roquette située à Klötze en Allemagne dispose du plus grand photobioréacteur en Europe (500 km de tubes).



Figure 12 : Photobioréacteur de l'usine Allemande de Klötze.
(Source : Roquette)

- Cognis en Australie, récemment racheté par BASF, possède deux sites de production d'un total de 800 hectares. Ils y cultivent *Dunaliella Salina* dans de grands open pounds et sont les plus grands producteurs mondiaux de bêta-carotène à partir de *Dunaliella*.

4. Comparaison des systèmes de production

En productivité

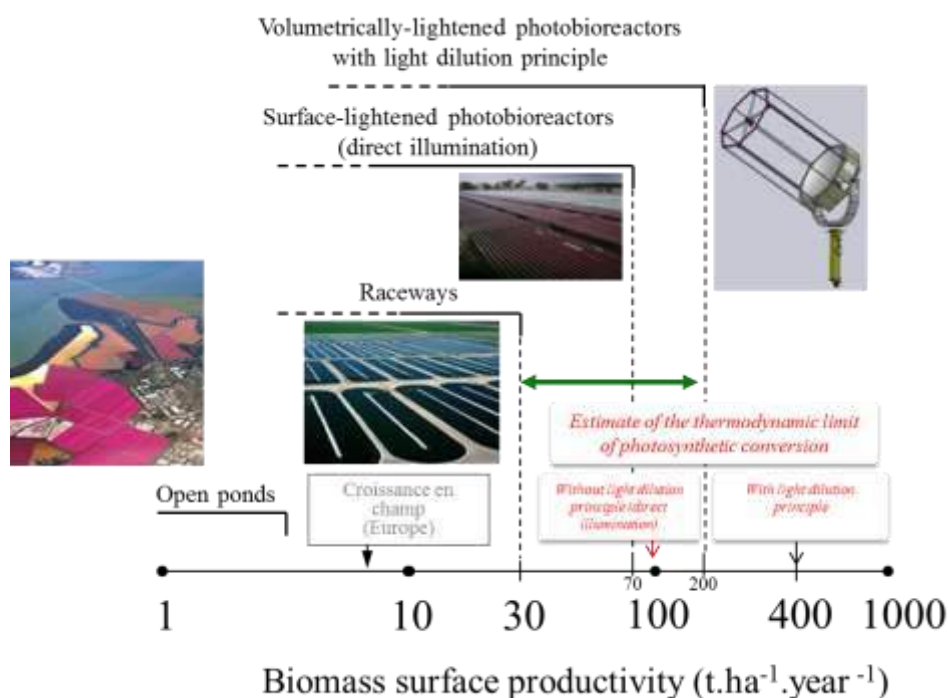


Figure 13 : Productivité en surface des différentes catégories de systèmes de culture solaire.
(Source ANR – BIOSOLIS)

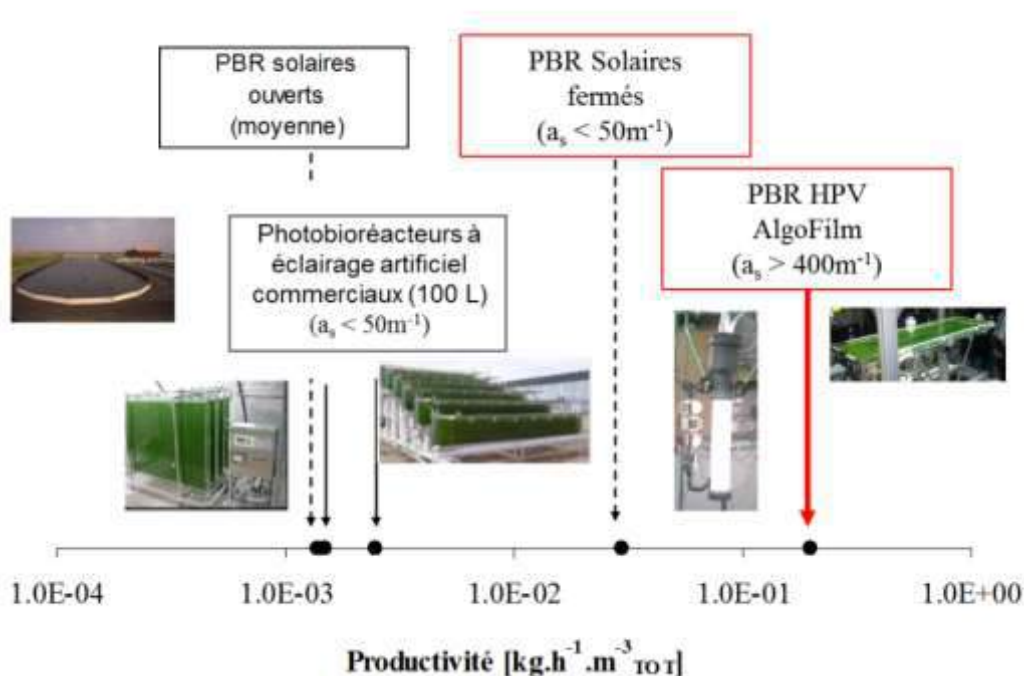


Figure 14 : Productivité en volume des différentes catégories de systèmes de culture.
(Source ANR – BIOSOLIS)

En coût de production

Tableau 1 : Coûts de production de la biomasse micro-algale.

(Source: MICRO- AND MACRO-ALGAE: UTILITY FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS - Outputs from the EPOBIO project - September 2007)

System	Operating costs (US\$ kg ⁻¹)	Capital costs (US\$ ha ⁻¹)	Total costs (US\$ kg ⁻¹)	Remarks	Source or reference
Agriculture			0.04		Cost of wheat straw (Germany 2007)
Forestry			0.04 – 0.055		Cost of fire wood (Germany 2007)
Macro-algae					
Ocean			0.045 – 0.31 (1981)		Bird (1987); Gao and McKinley (1994); Chynoweth (2002)
Raceway ponds					
Commercial raceway ponds		100,000	2 – 15	Based on discussions with producers	Benemann and Oswald (1996); Lee (2001); Reith et al. (2006); John Benemann, personal communication
50,000 m ² raceway pond	7 – 10	300,000	> 8 – 11 ¹	Costs at prod. sites in Thailand & USA	Vonshak (1997)
Raceway ponds	Not specified	Not specified	3.8	No calculations available	Chisti (2007)
Raceway ponds	0.14	100,000	0.24	Projected cost based on 110 t ha ⁻¹ y ⁻¹	Benemann and Oswald (1996)
Raceway ponds	€ 0.07	100,000	€ 0.21	Projected cost based on 100 t ha ⁻¹ y ⁻¹	van Harmelen and Oonk (2006)
Raceway ponds for phycoremediation			2 – 4	Main product is industry water	Reith (2004)
Photobioreactors					
PBR (<i>Chlorella</i>)	Not specified	Not specified	40-60 (selling price)	1.2 ha PBR in Klötze, Germany	Moore (2001)
PBR (<i>Haematococcus</i>)	Not specified	Not specified	> 30 ²	Minimum price to compete with synthetic astaxanthin	Olaizola (2003)
PBR (cost analysis)	19.4	12.6 (capital costs 11% per y)	32	Manpower 13% Raw materials 17% Overall capital charge 34%	Molina Grima et al. (2003)
PBR (cost analysis)	Not specified	Not specified	2.95	Based on Molina Grima et al. (2003), with assumptions on scale-up benefits	Chisti (2007)

1 - Les coûts totaux n'ont pas été donnés ; ici un facteur d'exigence de fonds propres de 15% a été utilisé pour obtenir approximativement les coûts totaux, ce qui pourrait être considéré comme une redevance annuelle pour la technologie mature requise pour payer l'installation en 20 ans.

2 - Pour produire l'astaxanthine au prix de l'astaxanthine synthétique (2 500 \$US kg⁻¹), la biomasse des algues doit être disponible pour moins de 30 \$US.kg⁻¹. L'astaxanthine naturelle se vend maintenant à 7 000 \$US.kg⁻¹.

Le tableau 1, fourni à titre d'information, présente une comparaison des coûts de production de la biomasse algale en fonction des systèmes de production utilisés et par rapport aux coûts de production d'autres biomasses terrestres. Le coût de production en système Raceway est bien moindre que celui en photobioréacteurs.

Il est à noter que les chiffres ne prennent pas en compte l'inflation, de plus les données sont facilement discutables dans le sens où la base de calcul et les valeurs fournies sont propres à chaque étude. Chaque auteur possède sa propre méthode d'évaluation des coûts, et il est fort possible que certains ne prennent pas en compte dans leur calcul les frais généraux et d'immobilisation. Les valeurs de coûts données par la littérature peuvent donc être discutées, de plus il en ressort que ce genre de production présente une économie d'échelle. En effet le coût de production de micro-algues est une fonction sensible à l'échelle.

Tableau 2 : Coûts d'investissement d'un système raceway pour une productivité de 30 g.m⁻².jour⁻¹.
(Source: MICRO- AND MACRO-ALGAE: UTILITY FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS - Outputs from the EPOBIO project - September 2007)

Item	Remarks	Cost US\$ ha ⁻¹
Land preparation, grading, compaction	Percolation control by natural sealing	2,500
Building of pond walls & levees		3,500
Paddle wheels for mixing		5,000
CO ₂ transfer sumps & carbonation		5,000
CO ₂ supply (pipelines and scrubbers)	Assuming flue gas	5,000
Harvesting and processing equipment	Settling	7,000
	Flocculation	2,000
	Centrifugation and extraction	12,500
Anaerobic digestion and nutrient recycling	Lagoon	3,250
Other capital costs	Water and nutrient supply	5,200
	Waste treatment	1,000
	Building, roads, drainage	2,000
	Electricity supply & distribution	2,000
	Instrumentation & machinery	500
Subtotals of above		59,450
Engineering, contingencies	15% above	8,900
Total direct capital		68,350
Land costs		2,000
Working capital	25% operating cost	3,800
Total capital investment		74,150
Inflation corrected	2.5% inflation, 11 years	97,300

Sur la base de discussions avec des producteurs commerciaux une gamme de prix de 8 à 15 \$US.kg⁻¹ a été signalée. Selon certains, les prix rendus actuels aux États-Unis pour des importations de conteneurs de 20 tonnes en provenance de Chine sont de 5 \$US kg⁻¹ pour *Spirulina* et deux fois plus élevé pour *Chlorella*, d'autres revendiquent une fourchette de prix de production de 2 à 5 \$US kg⁻¹ possible. *Spirulina* et *Chlorella* sont toutes deux destinées à des produits nutraceutiques de prix relativement plus élevés.

D'une manière générale, il en ressort que les données et renseignements sur les coûts de production de la biomasse micro-algale sont plutôt disparates. Une étude de comparaison des coûts de production en fonction des systèmes utilisés utilisant une base fiable, commune et équivalente, de calcul de données s'avère nécessaire.

En fonction du devenir de l'algue et de sa valorisation future, les coûts de productions sont plus ou moins importants. Ces derniers sont très importants dans le domaine de l'aquaculture car les algues servent de fourrage, mais si elles sont valorisées dans les domaines de la nutraceutique, de la cosméceutique, de la pharmaceutique, elles possèdent alors une haute valeur ajoutée qui permet de les cultiver à des frais plus élevés. Le prix de vente régule et conditionne les coûts de production.

Le tableau 2 est fourni à titre d'information, il présente une étude ayant répertorié et évalué les coûts d'investissements nécessaires pour un hectare de production de biomasse algale en systèmes raceway en prenant une productivité de 30 g.m⁻³ et par jour. On en déduit un investissement d'au moins 100 000 \$US par hectare. Pour ce même scénario les coûts d'exploitation de 21 300 \$US par hectare ont été calculés. En somme, dans ce scénario, le coût de la biomasse algale pourrait atteindre au moins 0,72 \$US.kg⁻¹.

Il semble intéressant de signaler qu'en 1991, un colloque international sur la culture de micro-algues pour l'aquaculture avait classé les coûts associés à la production de micro-algues par ordre d'importance. Ces derniers sont : 1 - la main d'œuvre, 2 - les approvisionnements (eau...) et produits chimiques, 3 - les installations, 4 - l'énergie nécessaire.

En conclusion, le choix du système sera fait en fonction de différents critères :

- pour répondre à un souhait de produits de qualité à haute valeur ajoutée et pour une productivité élevée, ou encore pour la culture de souches sensibles aux contaminations ou posant des problèmes de dissémination (OGM) on choisira plutôt des PBR et fermenteurs,
- à chaque espèce, un système est préféré,
- si les conditions environnementales du lieu de production sont favorables en extérieur, on s'orientera plus facilement vers les open ponds, les lagunes ou les salines,
- l'échelle de production, si large : open pond ; si petite : PBR,
- la capacité d'investissements, si faible : open ponds ; si conséquente : PBR.

On peut souligner que le coût des installations n'est pas standardisé car il dépend des conditions environnementales et de la proximité des ressources énergétiques, nutritionnelles et aquatiques.

Des approches opportunistes sont aussi possibles, et à mentionner, comme par exemple combiner traitement d'effluents (aqueux et/ou gazeux) et production de biomasse.

Notons que la culture en hétérotrophie présente l'avantage de produire de la biomasse très concentrée permettant ainsi de réduire l'étape de concentration et les volumes d'eau engagés pour produire une quantité de biomasse donnée.

Avantages /inconvénients

Tableau 3 : Comparaison des systèmes et modes de culture de micro-algues.
(Source : National algal biofuels technology roadmap page 29 – modifiées par nos soins)

		AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Culture Photoautotrophe	PBR fermés	· Moins de pertes d'eau qu'en open ponds · Maintien des cultures sur le long-terme supérieur · Plus grand rapport surface sur volume permettant de supporter des concentrations volumiques de cellules plus importantes	· Coût élevé et procédés complexes · Problèmes d'échelles · Nécessitent un maintien de la température puisqu'ils ne possèdent pas de refroidissement par évaporation · Peut demander un nettoyage régulier dû à la formation de bio-film
	Open ponds	· Maintien de la température grâce au refroidissement par évaporation · Coûts d'investissements moins onéreux · Culture de masse sur des surfaces importantes	· Sujet aux changements de température quotidiens et saisonniers · Difficile de conserver des monocultures de par sa nature · Faibles concentrations en matière sèche
Culture Hétérotrophe		· Plus facile de maintenir les conditions de production optimales et la prévention de contamination · Possibilité d'utiliser pour la croissance des substrats tels que le glycérol ou des acides organiques (acétiques...) · Atteint des concentrations élevées en biomasse	· Coût et disponibilité des matières premières telles que les sucres · Rivalité des matières premières et des organismes avec d'autres technologies de biocarburants (issus de levures ou de bactéries)

D. Procédés de récolte et concentration

1. Introduction

L'étape de récolte et/ou concentration est à présent reconnue comme étant un point critique dans la filière autotrophie : elle peut représenter 20 à 30% des coûts de production de la biomasse algale. Elle est conditionnée en amont par le choix de l'espèce et le mode de culture. Mais elle conditionne, en outre, toutes les étapes en aval (extraction, purification, recyclage..). La problématique de cette étape est d'autant plus marquée qu'il existe une grande diversité des souches, présentant des cellules de petite taille pouvant aller de 1 à 100 micromètres et des suspensions très diluées allant de 0,1 à 10 grammes par litre. Ces dernières sont autant de paramètres à prendre en considération pour le choix de la technologie.

Il existe aussi certains cas particuliers de production où la biomasse micro-algale n'est pas récoltée physiquement, mais où l'on récupère simplement les substances d'intérêt produites par les cellules avant de redémarrer un cycle de culture. On parle alors de « milking » (littéralement « traite », comme pour des vaches laitières...). Ce mode de production a été exemplifié pour la production de lipides. Dans ce cas, les algues sont mises en contact avec un solvant organique d'extraction, et on procède à une opération d'extraction liquide / liquide, suivie d'une séparation de phases. Les algues traitées sont ensuite remises en culture, avec dans certains cas des taux de survie proches de 100%.

Plusieurs moyens de récolte sont alors possibles, ils répondent à deux principes de séparation bien distincts :

- le principe de séparation par différence de masse volumique des cellules par rapport à celle du milieu : les techniques de sédimentation, de floculation-décantation, de flottation et de centrifugation,
- le principe de séparation par exclusion de taille : le tamisage, les procédés à membranes pouvant utiliser la micro- ou l'ultrafiltration.

2. Sédimentation gravitaire par différence de masse volumique

Certaines souches d'algues présentent une tendance naturelle à sédimenter dès l'arrêt de toute forme de brassage du milieu. Cela facilite alors leur récolte, puisqu'il est possible de travailler sur des volumes moins importants. Le temps de décantation dépend de trois paramètres : la différence de densité entre le milieu de culture et les micro-algues, la taille des micro-algues, et la viscosité du milieu de culture (loi de Stokes).



Figure 15 : Différents temps de sédimentation.
(Source : Université de Wageningen)

3. Floculation-décantation

Le phénomène de floculation est provoqué en agissant sur l'état d'agrégation des cellules, ce qui facilite la décantation des micro-algues. De nombreuses formes de floculations forcées sont utilisées.

La floculation chimique se réalise au moyen d'additifs chimiques liant les algues ou modifiant les interactions physico-chimiques entre elles. On peut procéder soit à l'ajout de sels de Fer (FeCl_3 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, ...) ou d'Aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), soit à l'ajout de polymères (anioniques ou cationiques; synthétiques ou naturels).

La biofloculation peut être déclenchée par un changement des conditions environnantes (pH, lumière, température, carence en nutriments) entraînant un stress cellulaire générant la synthèse d'exsudats agrégeants. Elle est plus précisément appelée dans ce contexte auto-floculation. La biofloculation peut aussi être entraînée par l'utilisation de populations microbiennes engendrant la synthèse d'exsudats agrégeants.

L'électrocoagulation et l'électrofloculation présentent toutes deux l'avantage de ne pas utiliser d'additifs chimiques. La première se réalise au moyen d'électrodes à base de Fer ou d'Aluminium parcourues par un courant générant la libération d'ions métalliques par oxydoréduction. La seconde présente deux voies, soit par l'utilisation d'électrodes (deux électrodes sont placées dans la suspension, anode et cathode, au contact de l'anode (+), les cellules (-) perdent leur charge et peuvent s'agglomérer) soit par ultrasons (les ultrasons génèrent des champs acoustiques, les cellules se concentrent dans les zones où le potentiel est minimum, provoquant ainsi leur agrégation).

4. Flottation

Certaines souches peuvent avoir une tendance naturelle à flotter, en particulier celles riches en lipides. Pour les autres le phénomène de flottation est produit par une action sur la différence de masse volumique et le diamètre des cellules. Pour cela, deux modes de fonctionnement sont possibles, l'électroflottation et la flottation par air dissous (DAF).

L'électroflottation permet aux particules en suspension, ici les algues, d'être entraînées à la surface par l'action des microbulles d'hydrogène provenant de l'électrolyse des molécules d'eau. Il en résulte une couche dense à la surface contenant les algues en suspension. En plus de présenter une consommation énergétique élevée, cette méthode peut être problématique pour la récolte des algues marines avec la tenue des électrodes en milieu marin compte tenu de la présence de l'ion chlorure (présent dans le sel de mer).

Mise au point pour le traitement des eaux usées, ce n'est que bien plus tard que la méthode DAF fut considérée pour la récolte des algues. Elle consiste à faire buller de l'air tout au long de la suspension algale, permettant ainsi aux algues de flotter à la surface. La floculation peut être utilisée pour favoriser le processus de récolte. En plus de l'efficacité du flocculant, la remontée dépend en grande partie de la taille et de la distribution des bulles d'air au travers de la suspension. La couche supérieure enrichie en algues est alors mise de côté dans un container pour des traitements ultérieurs.

Ces deux méthodes permettent de récupérer en sortie un concentré présentant 1 à 6% de matière sèche.

5. Centrifugation, action sur le nombre de g

La centrifugation est une technique utilisant la force centrifuge, c'est à dire l'action sur le nombre de g : l'intensité gravitationnelle, pour séparer des particules solides en suspension dans

un fluide, ici les algues en suspension dans leur milieu de culture. L'appareil utilisé pour réaliser cette séparation est nommé centrifugeuse. Elle permet de séparer les éléments du mélange en le faisant tourner à grande vitesse.

Les caractéristiques des cellules (taille, concentration...), le temps de séjour (contrôlé par le débit d'alimentation), et l'accélération (nombre de g) sont autant de paramètres opératoires à prendre en compte pour le bon déroulement de cette technique de récolte.

Plusieurs systèmes utilisant cette technique ont été développés : la centrifugeuse à bol, le séparateur à assiettes, le décanteur centrifuge et l'hydrocyclone.

Reconnue comme étant, à l'heure actuelle, une des techniques les plus utilisées, la centrifugation est également l'une des plus coûteuses en termes d'investissements et de consommation énergétique.

6. Filtration frontale : tamisage, séparation par exclusion de taille

La filtration frontale, la plus connue, consiste à faire passer le fluide à filtrer perpendiculairement à la surface du filtre. Ce type de technologie est valable pour des « grosses » cellules, soit une taille des particules supérieure à 40 μm . C'est certainement le procédé le plus simple à mettre en œuvre. En effet il est possible d'utiliser de simples toiles ou tamis pour la récolte de spiruline par exemple. Il est aussi envisageable de se servir d'un tamis vibrant avec une épaisseur de maille inférieure à la taille des algues.

Ce procédé de récolte fonctionne sous de faibles gradients de pression (ou à vide) et présente la nécessité de racler le gâteau d'algues (ou de le structurer par ajout d'auxiliaires de filtration comme des fibres de cellulose ou de la terre de diatomées) formé à intervalles réguliers pour maintenir les débits de filtration, en effet cette technique est limitée par l'accumulation des particules à sa surface, qui finissent peu à peu par le boucher (colmatage).

En fonction de la nature de la souche cultivée une pré-concentration préalable ou une pré-couche filtrante peuvent être nécessaires. Le taux de matière sèche et la consommation énergétique sont quant à eux dépendant de la nature du tamis utilisé.

7. Filtration tangentielle membranaire : séparation par exclusion de taille

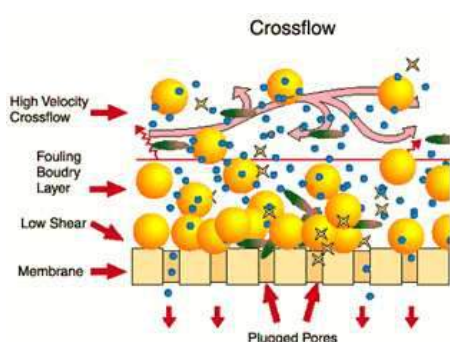


Figure 16 : Principe de la filtration tangentielle.
(Source : Présentation M. Frappart / Massé / Jaouen - GEPEA-CNRS)

La filtration tangentielle, au contraire, consiste à faire passer le fluide tangemment, c'est-à-dire parallèlement, à la surface du filtre. C'est la pression du fluide qui permet à celui-ci de traverser le filtre. Les particules, dans ce cas, restent dans le flux de circulation tangentielle, et le colmatage s'effectue ainsi beaucoup moins vite. Cependant, cette technique est réservée aux très petites particules, dont la taille est inférieure à 40 μm , soit la plupart des micro-algues unicellulaires.

Dans ce contexte de récolte, une bonne rétention nécessite le recours à des membranes de micro (MF) ou d'ultrafiltration (UF) avec des pores allant de 0,5 μm à 0,02 μm (≈ 50 kDa).

Ces systèmes présentent une différence de pression et une vitesse tangentielle limitées, et une forte consommation liée au pompage et à la pression. Ils peuvent être une alternative plausible à la centrifugation. Des systèmes similaires, mais avec des membranes minérales, sont utilisés depuis des décennies pour rendre potables des eaux de consommation réfractaires aux traitements classiques (cas par exemple de la station de pompage de Méry sur Oise).

Le mode tangential est souvent privilégié mais des études expérimentales en mode frontal sont actuellement en cours au GEPEA.

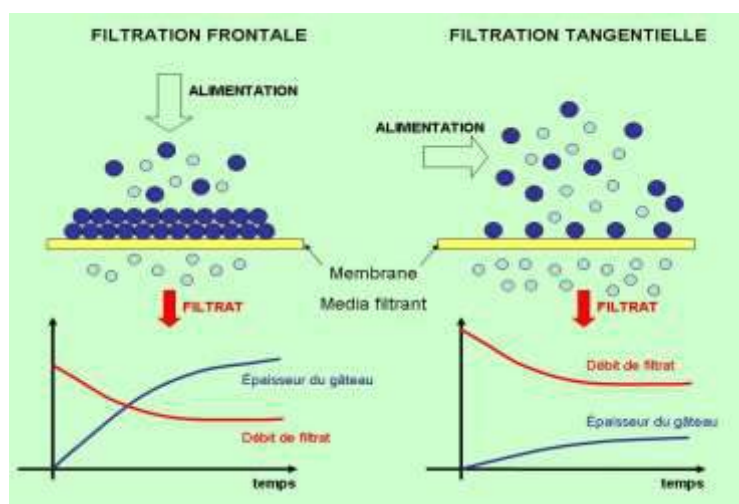


Figure 17 : Comparaison des deux modes de filtration
(Source : Présentation M. Frappart / Massé / Jaouen - GEPEA-CNRS)

8. Comparaison des différents systèmes de récolte

Notons que les deux systèmes peuvent être utilisés en cascade : récolte puis concentration (harvesting & dewatering).

Notons aussi que les technologies sont souvent utilisées de façon combinée. Par exemple, floculation puis flottation ou décantation, floculation puis centrifugation, floculation puis filtration (moins courant).

En fonction de leur consommation énergétique

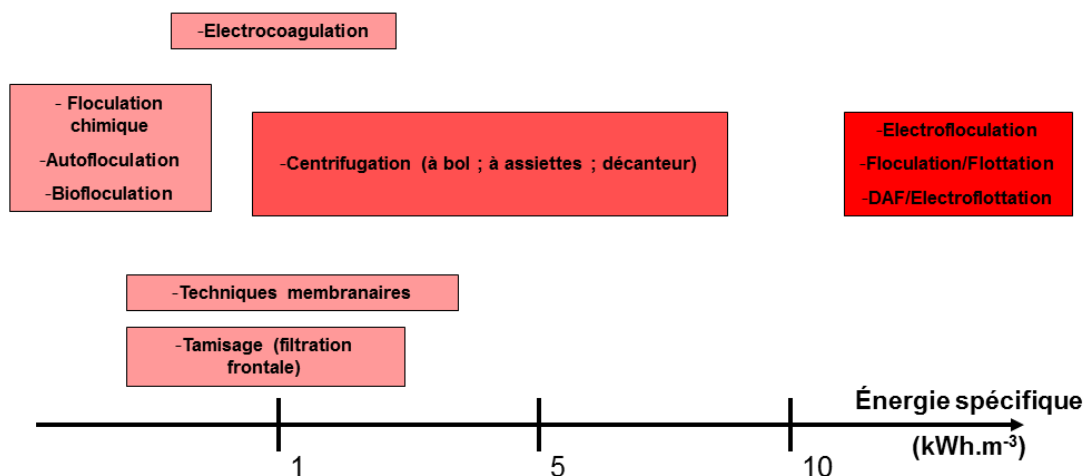


Figure 18 : Comparaison des systèmes de récolte en fonction de leur consommation énergétique.
(Source : Présentation M. Frappart / Massé / Jaouen - GEPEA-CNRS)

En fonction de l'objectif d'humidité finale de la biomasse.

Tableau 4 : Comparaison des systèmes de récolte en fonction de leur objectif d'humidité finale.
(Source : Présentation M. Frappart / Massé / Jaouen - GEPEA-CNRS)

Biomasse très humide < 5 % MS	Biomasse Humide 5 - 30 % MS
•Sédimentation naturelle • Flottation • Flocculation chimique • Bioflocculation • Electrocoagulation • Electroflocculation • Techniques membranaires (micro ou ultrafiltration)	•Tamisage • Filtration • Centrifugation

9. Conclusion

Il n'existe pas de procédé universel concernant la récolte des algues, le choix se fera en fonction de plusieurs paramètres clés : la souche de micro-algue utilisée, ses propriétés morphologiques, dimensionnelles et physiologiques associées peuvent imposer le choix d'un système de récolte plutôt qu'un autre.

Le débit de culture à traiter, l'efficacité du traitement (taux de rétention...), la siccité finale, l'impact sur la qualité de la biomasse et sur son traitement ultérieur, la stabilité du procédé, les dérives de performances (évolution du milieu, développement bactérien, débris cellulaires, relargage d'exopolymères...), le matériel (matériau des appareillages/milieu) et les coûts (investissement, énergie, main d'œuvre, consommation de réactifs...) sont autant de facteurs à prendre en considération dans le choix de la technologie de récolte.

On observe, cependant, que pour une souche donnée, un procédé de récolte efficace à petite échelle ne sera pas forcément techniquement et économiquement viable à grande et très grande échelle.

La concentration finale de la pâte dépendra de la méthode de récolte employée et aura un impact direct sur la quantité d'énergie consommée et sur les procédés de traitement et d'extraction en aval. Globalement, l'ensemble de ces étapes reste fortement consommatrice d'énergie.

E. Procédés de prétraitement et d'extraction

Pour valoriser les molécules d'intérêt au sein des cellules algales, une étape d'extraction est nécessaire.

La particularité de la biomasse micro-algale est de présenter un taux d'humidité très élevé qui est problématique pour la conservation et aussi pour l'extraction des produits à valoriser. Une étape de séchage supplémentaire en amont de l'extraction est souvent pratiquée.

Par ailleurs, les molécules d'intérêt sont pour la plupart localisées à l'intérieur des cellules, il faut donc réussir à passer la barrière naturelle que représentent les différentes membranes pour atteindre les molécules cibles et les extraire : une étape de broyage (mécanique, ultrasons...) peut permettre de résoudre ce problème.

Différents procédés d'extraction existent et ont été mis au point, certains jusqu'à l'échelle industrielle. Le choix du procédé d'extraction va notamment dépendre des exigences du marché cible, mais aussi de la nature des molécules d'intérêt à extraire, qui elles-mêmes dépendent de la souche d'algue cultivée et de ses conditions de croissance.

Les différents procédés de récoltes abordés précédemment sont eux aussi susceptibles d'affecter les procédés d'extraction en aval (teneur en eau).

1. Séchage

Il existe différents procédés de séchage, le choix du procédé dépend de l'application future de la biomasse algale. Le plus ancien est le séchage solaire mais il est possible de sécher par d'autres moyens comme le séchage en sécheur convectif ou conductif, ou encore par atomisation, par lyophilisation ou par DIC (Détente Instantanée Contrôlée).

Le séchage **solaire** consiste à étendre sous serre ou à l'air libre les algues récoltées et concentrées et à faire évaporer l'eau par l'action du soleil.

Le séchage par **atomisation** est une méthode de déshydratation d'un liquide (jus, lait, ...) sous forme de poudre par passage dans un flux d'air chaud. Lors de la déshydratation par atomisation, le liquide est pulvérisé en fines gouttelettes, dans une enceinte cylindrique verticale au contact d'un courant d'air chaud afin d'évaporer l'eau. La poudre obtenue est entraînée par le flux de chaleur jusqu'à un cyclone ou un filtre à manche qui va séparer l'air de la poudre.

Le séchage par **lyophilisation** consiste à ôter l'eau d'un produit liquide, pâteux ou solide, à l'aide de la surgélation puis une évaporation sous vide de la glace sans la faire fondre (sublimation). La vapeur d'eau quitte le produit puis est capturée par congélation à l'aide d'un condenseur, ou d'un piège à froid. Cette technique permet de conserver à la fois le volume, l'aspect et les propriétés du produit traité. Elle est la plus consommatrice en énergie.

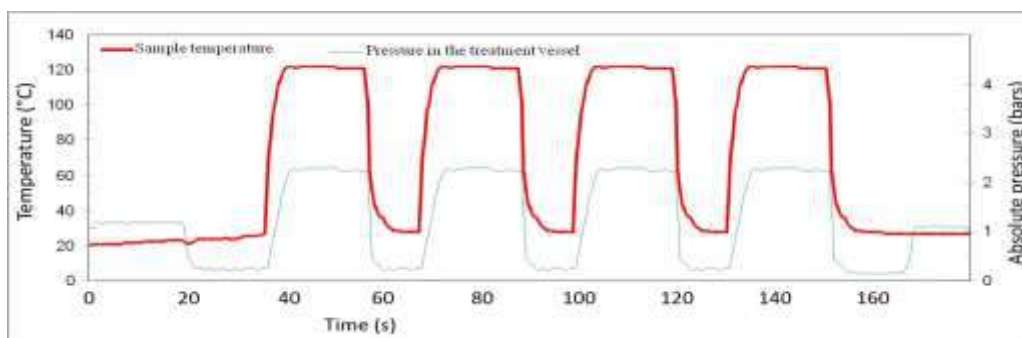


Figure 19 : Extraction par cycles successifs de DIC
(Source : présentation K. Allaf – Université de la Rochelle LEPTIAB)

Lors du colloque, le "Laboratoire d'Etudes des Phénomènes de Transferts et de l'Instantanéité : Agro-industries et Bâtiment" de l'Université de La Rochelle a présenté la technologie de **Détente Instantanée Contrôlée** (DIC) comme une innovation dans le traitement des micro-algues à

plusieurs niveaux. Elle a pour principe le traitement de la biomasse à haute température et haute pression sur une courte durée avec une chute abrupte de pression vers de vide provoquant une auto-vaporisation instantanée pouvant engendrer en plus d'un refroidissement instantané une texturation des matières. Il est possible de réaliser plusieurs cycles successifs. Les applications de cette technologie sur la biomasse micro-algale sont le séchage, la décontamination et l'extraction de lipides.

Pour la plupart, ces étapes de séchage restent coûteuses en énergie. L'intérêt, à ce jour, est de diminuer leur consommation énergétique, voire de pouvoir s'en affranchir.

2. Broyage

Pour qu'un solvant puisse extraire avec succès il doit être capable de pénétrer la matrice enfermant les molécules d'intérêt, puis d'entrer physiquement en contact avec ces molécules et les solvater.

Pour tout procédé d'extraction, les membranes cellulaires peuvent représenter des barrières importantes pour le solvant. Cela nécessite pour certaines algues un broyage de la biomasse avant extraction. Un broyage mécanique efficace peut supprimer le besoin d'utiliser des procédés à températures et pressions élevées, permettant au solvant d'entrer directement en contact avec les molécules cibles.

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour broyer la membrane des cellules en amont d'une application de solvants extractifs.

Le broyage mécanique peut se réaliser au moyen de plusieurs technologies : l'homogénéisation de cellules, le broyage à billes, les ultrasons, et l'autoclavage.

Les méthodes non mécaniques de destruction des parois incluent des procédés tels que : la congélation/décongélation, l'utilisation de solvants organiques, les chocs osmotiques et des réactions acido-basiques ou des lyses enzymatiques.

L'utilisation de micro-ondes ou la sonication (ultrasons) sont des méthodes étudiées et présentant un fort intérêt.

Un broyage efficace peut, chez certaines algues, suffire pour s'affranchir de l'étape d'extraction et passer directement à une étape de purification par filtration.

3. Extraction

L'extraction repose sur l'identification des composés biologiques à extraire, ils dépendent de l'espèce d'algue et de leur état de croissance. Beaucoup de techniques d'extraction efficaces nécessitent des substrats concentrés, voire totalement asséchés. Par conséquent, un degré de concentration élevé peut être nécessaire avant de procéder à l'extraction.

L'extraction par solvants organiques

Le solvant organique est choisi en fonction de sa polarité et de son affinité avec les molécules d'intérêt à extraire. Parmi eux on retrouve l'hexane, le chloroforme, l'éthanol, l'isopropanol, le butanol, les cétones, les esters, voire des huiles végétales, pour extraire des molécules comme les lipides ou les caroténoïdes. Il est possible de mélanger certains solvants pour modifier et

améliorer leur capacité à extraire les molécules cibles (notamment les molécules polaires) : on obtiendra ainsi une extraction plus ou moins sélective.

La présence d'eau en plus ou moins grande quantité constitue un facteur limitant pour certaines extractions, une étape de séchage ou de déshydratation au préalable s'avère alors nécessaire.

Ce type d'extraction existe déjà à l'échelle industrielle pour différentes applications, notamment l'extraction du bêta-carotène de *Dunaliella salina* en Inde.

La macération de micro-algues sèches dans des mélanges hydro-glycoliques est utilisée pour extraire et valoriser des actifs cosmétiques.

Extraction à l'eau subcritique

Ce procédé est basé sur l'utilisation de l'eau à des températures juste en dessous de la température critique, et à une pression suffisamment élevée pour maintenir l'eau dans son état liquide ($T_c=376^\circ\text{C}$ et $P_c=221$ bars).

L'intérêt de cette extraction est que l'eau, sous ces conditions, devient moins polaire et les composés organiques plus solubles qu'à température ambiante. Elle présente de surcroît l'avantage de l'accessibilité du solvant dans la matrice de la biomasse qui apparaît dans d'autres cas à des températures bien supérieures.

De plus, puisque l'eau d'extraction est refroidie ensuite jusqu'à température ambiante, les produits miscibles à température et pression élevées deviennent non miscibles à des températures inférieures et peuvent alors facilement se séparer. Les avantages les plus importants décrits pour l'extraction à l'eau subcritique sont des temps d'extraction plus courts, des extraits d'une qualité supérieure, des coûts moindres en agent extractant, et une bonne compatibilité environnementale (absence de solvants).

L'un des aspects les plus attractifs dans le cas des algues est l'utilisation de l'eau comme solvant d'extraction, on peut alors s'affranchir du besoin de l'étape de séchage ou de déshydratation.

Cependant, une contrainte majeure est la difficulté à extrapoler le système à grande échelle. Par ailleurs, une charge importante en énergie est nécessaire pour chauffer le système jusqu'aux températures subcritiques. Un process à grande échelle nécessitera d'une part un système de refroidissement pertinent pour refroidir les produits à température ambiante et ainsi éviter leur dégradation, et d'autre part, la réduction de la consommation énergétique.

Extraction avec des fluides supercritiques

L'extraction par fluide supercritique utilise le pouvoir de solvation renforcé des fluides au dessus de leur point critique. Une alimentation solide ou liquide peut être utilisée pour la mise en œuvre de ce procédé.

L'extraction par fluide supercritique est le plus souvent employée en mode batch, mais le procédé peut aussi opérer en continu. L'un des points les plus attractifs de l'extraction par fluide supercritique est qu'une fois la réaction d'extraction faite et les matériaux d'extraction dissous dans le fluide supercritique, le solvant et le produit peuvent être facilement séparés en aval une fois la température et la pression revenues aux conditions atmosphériques. Dans ce cas, le fluide

retourne à son état gazeux original pendant que les produits extraits restent dans un état liquide ou solide.

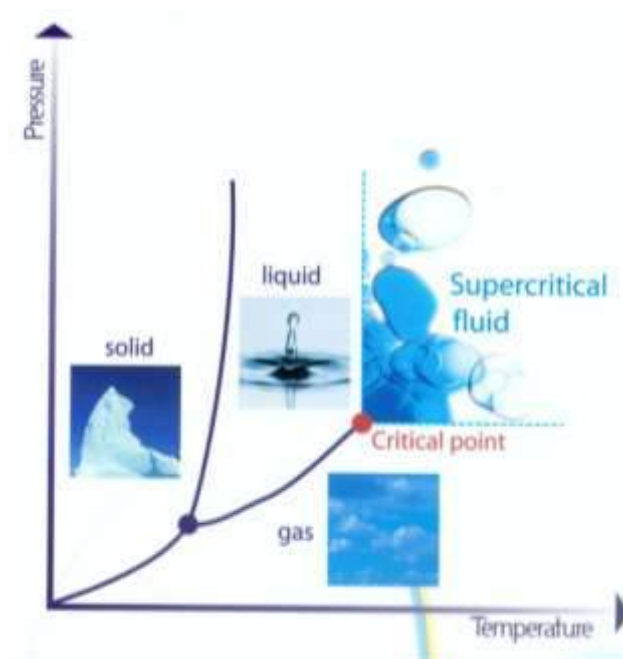


Figure 20 : Diagramme des différents états d'un corps.
(Source : Présentation F. LAIMAY – HITEX)

Les techniques d'extraction par fluide supercritique sont utilisées pour l'extraction commerciale de substances à partir de substrats solides, exemple : la caféine des grains de café depuis plus de 20 ans. La majorité des applications utilisent le CO_2 ($T_c=31^\circ\text{C}$ et $P_c=74$ bar), mais d'autres fluides utilisés peuvent inclure des solvants comme l'éthane, l'hexane, l'eau ($T_c=376^\circ\text{C}$ et $P_c=221$ bars), le méthanol, l'oxyde nitreux, l'hexafluorure de soufre aussi bien que le n-butane et le pentane.

Remarque

Le traitement supercritique est capable de simultanément extraire et convertir des huiles en biocarburants. Cette technique a été démontrée comme étant extrêmement puissante dans l'extraction d'autres composés présents dans les algues. L'approche transestérification supercritique peut également être appliquée pour les extraits d'huile algale. Les fluides supercritiques sont sélectifs, offrant ainsi une grande pureté et concentration du produit. En outre, il n'y a pas de résidus de solvants organiques dans l'extrait ou dans la biomasse traitée. L'extraction est efficace à des températures de fonctionnement modeste, par exemple, à moins de 50°C (CO_2), assurant une stabilité et une qualité maximale du produit.

L'extraction au CO_2 supercritique

L'état supercritique confère au CO_2 un excellent pouvoir d'extraction, pouvoir modulable à volonté en jouant sur la température et la pression de mise en œuvre. Le CO_2 présente la caractéristique d'être un bon solvant à l'état supercritique, et un mauvais solvant à l'état gazeux.

Les avantages de ce procédé sont les suivants :

- le CO₂ est totalement inerte chimiquement, il est naturel, non toxique et peu coûteux,
- on utilise des basses températures et des pressions modérées pour sa mise en œuvre, température critiques modérée de 31,1°C pour une pression de 73,9 bars,
- en fin de cycle, la séparation entre le solvant d'extraction et le soluté pour obtenir l'extrait est facile (simple détente qui ramène le CO₂ à l'état gazeux), avec une récupération quasi-totale et peu coûteuse,
- les frais de fonctionnement, à l'échelle pilote ou de laboratoire, sont réduits (le CO₂ est continuellement recyclé).

L'extraction au CO₂ supercritique est une technique intéressante mais elle nécessite une faible teneur en eau au sein de la biomasse algale (Travaux du M2P2, Université Aix-Marseille dans le cadre du projet SHAMASH) et son installation industrielle reste onéreuse.

Il est possible d'apporter un co-solvant d'extraction au CO₂ supercritique pour améliorer son pouvoir d'extraction et élargir la gamme de molécules extractibles. Le schéma présenté ci-dessous illustre les possibilités d'extraction supplémentaires au CO₂ avec l'éthanol comme co-solvant sur les molécules extractibles des micro-algues.

De part sa sélectivité contrôlée, le CO₂ supercritique peut être utilisé pour séparer des composés, après extraction par autre solvant (éthanol, etc.).

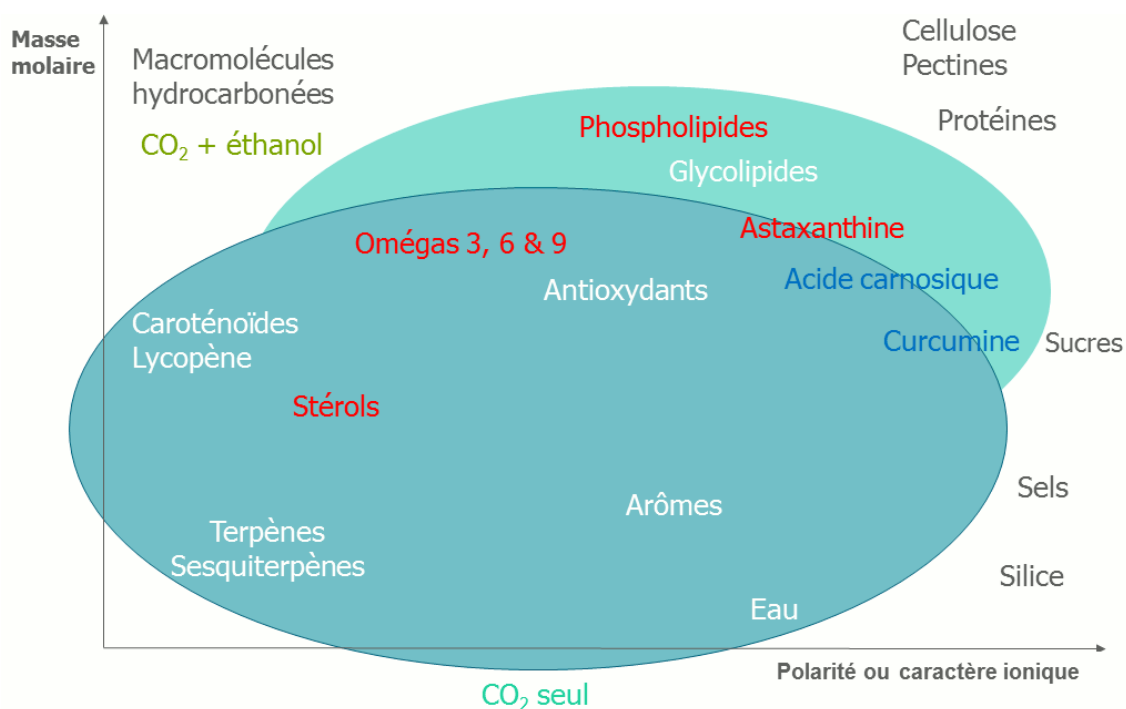


Figure 21 : Molécules extractibles par le CO₂ supercritique seul et en présence d'éthanol.
(Source : présentation F. LAIMAY - HITEX)

F. Fins de process pour les biocarburants

Figures 25 et 26, pages 42 et 43.

1. La transestérification

La réaction de transestérification est utilisée pour convertir les triglycérides extraits des algues en esters méthyliques d'acides gras (EMAG) utilisables en biodiesel. Cette réaction est un processus simple de remplacement d'un groupe alcool sur un ester par un autre alcool, on peut aussi dire qu'elle transforme un ester et un alcool en un autre ester et autre alcool. La transestérification peut être effectuée via des systèmes de réaction catalytique ou non, elle utilise différents systèmes de chauffage nécessaire pour initier la réaction. Un acide ou une base est souvent utilisé comme catalyseur. Cette réaction produit une molécule de glycérol pour trois molécules d'acide gras.

Cependant, il est important de mentionner ici les inconvénients des lipides contenus dans la plupart des micro-algues : présence de longues chaînes carbonées, et de polyinsaturations, qui sont deux obstacles dans la production de biodiesel par transestérification. En effet cela pose des problèmes de viscosité et de formation de goudrons. Le colza présente un profil d'acides gras beaucoup plus adapté au biodiesel.

Transestérification Chimique

Cette technologie est relativement mature et sert de référence dans la transformation des huiles végétales en biodiesel. En plus de l'approche du méthanol catalysé par une base classique, il a été démontré que la transestérification de l'huile d'algues peut être obtenue avec de l'éthanol et du sodium éthanolate agissant comme catalyseur. Les produits de ces réactions sont généralement séparés par addition d'éther et d'eau salée à la solution sous agitation conséquente. Le biodiesel est ensuite séparée de l'éther par un vaporisateur sous un vide poussé.

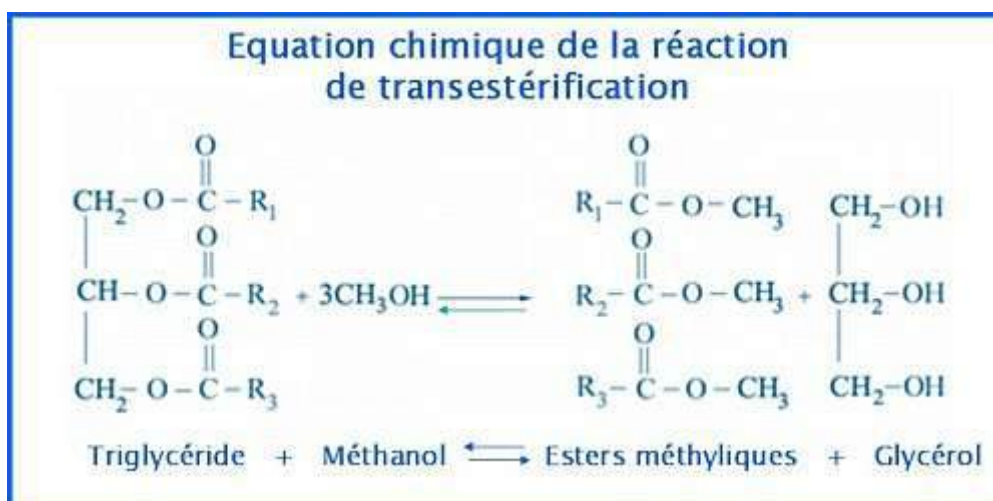


Figure 22 : Réaction de transestérification chimique classique.
(Source : <http://tpe-biodiesel.over-blog.com/article-conclusion-41195584.html>)

Conversion biochimique (enzymatique)

Les procédés chimiques fournissent une conversion élevée des triglycérides en leurs esters correspondants, mais présentent certains inconvénients tels qu'une forte consommation énergétique, une difficulté à enlever le glycérol, le retrait exigé du catalyseur alcalin du produit et le traitement des eaux usées alcalines. L'utilisation de biocatalyseurs (lipases) dans la transestérification des triglycérides pour la production de biodiesel limite ces problèmes en offrant de surcroît une option environnementalement plus attractive que les procédés classiques. Bien que les approches enzymatiques soient devenues de plus en plus attrayantes, elles n'ont pas été démontrées à grande échelle principalement en raison du prix relativement élevé de la lipase. Cette dernière présente une courte vie de fonctionnement causée par les effets négatifs du méthanol en excès et des coproduits du glycérol. La maîtrise de ces facteurs est incontournable pour qu'un processus de conversion biochimique commercialement viable puisse être réalisé.

Craquage catalytique

Les catalyseurs pour la transestérification présentés ci-dessus sont très puissants et relativement matures dans le domaine de la production de biocarburants. Bien que très efficaces et relativement économiques, ces catalyseurs nécessitent toujours une purification et une élimination du flux de produits, ce qui augmente les coûts globaux. Une solution potentielle à cela est le développement de catalyseurs immobilisés hétérogènes et / ou homogènes qui sont très efficaces et peu coûteux. Les catalyseurs acides de Lewis, comme AlCl_3 ou ZnCl_2 , ont fait leurs preuves comme un moyen viable de convertir les triglycérides en esters méthyliques d'acides gras.

Les catalyseurs acides et basiques peuvent être classés en tant que catalyseurs de Brönsted ou de Lewis. Cependant, dans de nombreux cas, les deux types de sites peuvent être présents et il n'est pas facile d'évaluer l'importance relative des deux types de sites dans la réaction globale en termes d'efficacité et de coût. La présence d'un co-solvant, tel que le tétrahydrofurane, peut jouer un rôle vital dans l'obtention de rendements de conversion élevés allant jusqu'à 98%.

L'hydrogénation

La transestérification permet de convertir efficacement les triglycérides en acides gras directement utilisables comme biodiesel. Ce procédé est notamment utilisé à l'échelle industrielle pour la production de biocarburants à partir d'huiles végétales.

La qualité des produits obtenus est cependant insuffisante pour la production de bio-kérosène pour l'aviation qui nécessite des spécifications très strictes en matière de point de congélation et de tenue dans le temps des produits finaux.

L'alternative envisagée pour ce marché est celui de l'hydrogénation pour enlever les doubles liaisons (Huile végétale hydro-traitée ou HVO). Les hydrocarbures issus de cette technologie présentent d'excellentes qualités pour les kérosènes : chaînes carbonées de bonne dimension, cétane élevé, absence de soufre et d'hydrocarbures aromatiques, propriétés à froid ajustables, bonne tenue au vieillissement.

2. La méthanisation

La méthanisation est un processus de digestion anaérobie transformant les matières organiques en biogaz. Ce dernier contient environ 60% à 70% de bio-méthane, le reste étant principalement du CO₂, qui peut être recyclé pour la production des algues. Les principaux avantages de ce procédé sont : l'utilisation de la biomasse humide, réduisant ainsi la nécessité du séchage, et la possibilité de recycler les nutriments contenus dans la biomasse digérée à l'état liquide et solide. Dans le cas d'espèces marines, des problématiques supplémentaires se posent, notamment la question du soufre et de son devenir ; ainsi que l'inhibition par le sodium et les chlorures.

Le biogaz comme produit principal n'est pas économiquement viable, mais ce processus peut être appliqué judicieusement pour traiter les restes de la biomasse après l'extraction des produits à forte valeur ajoutée (projet SALINALGUE par exemple) ou dans des procédés combinant le traitement de déchets organiques végétaux avec la culture de micro-algues (projet SYMBIOSE). À titre d'exemple concret et éprouvé, il existe à Sunnyvale (Californie, USA) une station de traitement d'effluents aqueux et de déchets qui pratique l'épuration des eaux par lagunage à micro-algues en étangs à haut rendement, puis récolte et méthanisation de la biomasse planctonique générée, en cosubstrat avec des déchets solides, pour faire de la cogénération.

3. Les traitements thermochimiques

Le traitement biologique des matières organiques d'algues possède un homologue non-biologique, avec l'avantage de ne pas impliquer les organismes vivants, des conditions extrêmes peuvent alors être utilisées. La biomasse subit une transformation chimique sous des conditions à haute température, avec souvent la présence de catalyseurs métalliques dans le procédé, ce qui peut poser des difficultés car ces catalyseurs sont fragiles et sensibles aux contaminations. En fonction de la teneur en eau et des conditions thermiques, la biomasse est décomposée en molécules carbonées en phase gazeuse, liquide ou solide ; ces molécules peuvent être raffinées pour une utilisation comme biocarburant. L'apport d'énergie de ce type de traitement est nettement plus élevé par rapport à celui nécessaire à la production de biogaz.

La pyrolyse

La pyrolyse a pour principe la décomposition chimique d'une substance condensée sous l'action de la chaleur. Elle ne fait pas intervenir de réactions avec de l'oxygène ou tous autres réactifs. Le traitement thermochimique des algues, ou de toute autre biomasse, peut avoir pour résultat une vaste gamme de produits, selon les paramètres de la réaction. Le rendement en produit liquide tend à favoriser les courtes durées de séjour, des taux de chauffage rapides, et des températures modérées. La pyrolyse a un avantage majeur sur les autres méthodes de conversion, du fait qu'elle soit extrêmement rapide, avec des temps de réaction de l'ordre de quelques secondes ou minutes.

La gazéification

La gazéification est un procédé qui permet de convertir des matières carbonées, comme le charbon, le pétrole, ou de la biomasse, en monoxyde de carbone et en hydrogène par réaction de la matière première avec une quantité contrôlée d'oxygène à des températures très élevées. Le mélange carboné obtenu, appelé syngaz, est lui-même un carburant. La gazéification est une

méthode très efficace pour l'extraction d'énergie à partir des différents types de matières organiques, et trouve également des applications dans l'élimination des déchets verts.

La gazéification de la biomasse algale peut constituer une façon extrêmement flexible pour produire différents combustibles liquides, principalement en passant par la synthèse de Fischer-Tropsch (FTS) ou la synthèse d'alcools mélangés à du syngaz en résultant. La synthèse d'alcools mélangés utilisant la gazéification de la ligno-cellulose est un procédé relativement mature, et il est raisonnable de s'attendre à ce, qu'une fois le problème de la teneur en eau réglée, la gazéification des algues pour l'obtention de ces biocarburants soit relativement simple. La synthèse de Fischer-Tropsch est aussi une technologie relativement mature où les composants du syngaz (CO , CO_2 , H_2O , H_2 , et impuretés) sont nettoyés et améliorés par un changement eau-gaz et une hydrogénation du monoxyde de carbone (CO) pour obtenir des carburants liquides utilisables.

La liquéfaction

La liquéfaction hydrothermale directement dans l'eau sous-critique (définie comme une eau maintenue à l'état liquide au-dessus de 100°C en appliquant une pression) est une technologie qui peut être utilisée pour convertir la biomasse algale humide en un éventail de combustibles liquides. Cette technologie est une représentation, réalisée sur des échelles de temps très réduites, des processus naturels géologiques connus pour être impliqués dans la formation de combustibles fossiles à base de pétrole. Ces technologies exploitent la forte activité de l'eau en milieu sous-critique étant capable de décomposer la biomasse algale en molécules plus petites de densité énergétique supérieure ou en plusieurs produits chimiques de plus grande valeur. Le principal produit de ce procédé de liquéfaction est un "bio-brut" représentant généralement 45% en poids de la matière première sur une base libre de cendres sèches et possède un contenu énergétique comparable au diesel.

G. Applications, marchés potentiels

1. Introduction

La diversité d'espèces en micro-algues et leur richesse en métabolites permet un vaste panel d'applications et peut s'adresser à de nombreux secteurs industriels (figure 23 et tableau 5 ci-après).

Il est possible de valoriser la biomasse brute, ou bien de l'utiliser comme vecteur pour la production de molécules d'intérêt.

La biomasse brute, vivante ou non, se valorise sur les marchés de la nutrition humaine, de l'alimentation animale avec en particulier le secteur de l'aquaculture, et dans les domaines de l'énergie et de l'environnement.

Les composés d'intérêt essentiellement identifiés sont les lipides, les vitamines, les polysaccharides, les protéines, les pigments, les antioxydants et d'autres composants cellulaires. Ces produits issus des micro-algues et cyanobactéries sont commercialisés pour les secteurs de la santé et du bien être avec l'alimentation humaine (additifs et colorants alimentaires), la nutraceutique, la cosmétique et la pharmaceutique (actif biologiques et thérapeutiques). On les

retrouve aussi dans les domaines de l'alimentation animale (tourteau protéique potentiel et colorants), de l'énergie, et de la chimie verte (intermédiaires et matériaux bio-sourcés).

Le domaine de l'environnement sera abordé plus sur des notions d'utilisation des algues en culture pour leurs actions dépolluantes.

Tableau 5 : Micro-algues produites commercialement, quantités, localisations, applications et valeur du marché en 2004.

(Source : Brennan & Owende 2010, traduite par nos soins)

Micro-algue	Production annuelle	Pays producteurs	Application et produits	Prix
<i>Spirulina</i>	3 000 tonnes de matière sèche	Chine, Inde, USA, Birmanie, Japon	Nutrition humaine Nutrition animale Cosmétiques Phycobiliprotéines	36 €/kg 11 €/mg
<i>Chlorella</i>	2 000 tonnes de matière sèche	Taïwan, Allemagne, Japon	Nutrition humaine Cosmétiques Aquaculture	36 €/kg 50 €/L
<i>Dunaliella salina</i>	1 200 tonnes de matière sèche	Australie, Israël, USA, Japon	Nutrition humaine Cosmétiques B-carotène	 215-2150 €/kg
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	500 tonnes de matière sèche	USA	Nutrition humaine	
<i>Haematococcus pluvialis</i>	300 tonnes de matière sèche	USA, Inde, Israël	Aquaculture Astaxanthine	50 €/L 7150 €/kg
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	240 tonnes d'huile de DHA	USA	Huile de DHA	43 €/kg
<i>Shizochytrium</i>	10 tonnes d'huile de DHA	USA	Huile de DHA	43 €/kg

Si l'on fait abstraction des difficultés de production des micro-algues à l'échelle industrielle, le potentiel marché des produits issus des micro-algues évolue favorablement au même rythme que le marché mondial des produits chimiques renouvelables évalué à 45 milliards d'euros en 2009 et à 59 milliards d'euros pour 2014. *Pulz and Gross* ont quant à eux estimé le marché mondial dédié aux micro-algues proche des 5 à 6,5 milliards de dollars US. (*Étude TecKnowMetrix pour Algasud – 2010*)

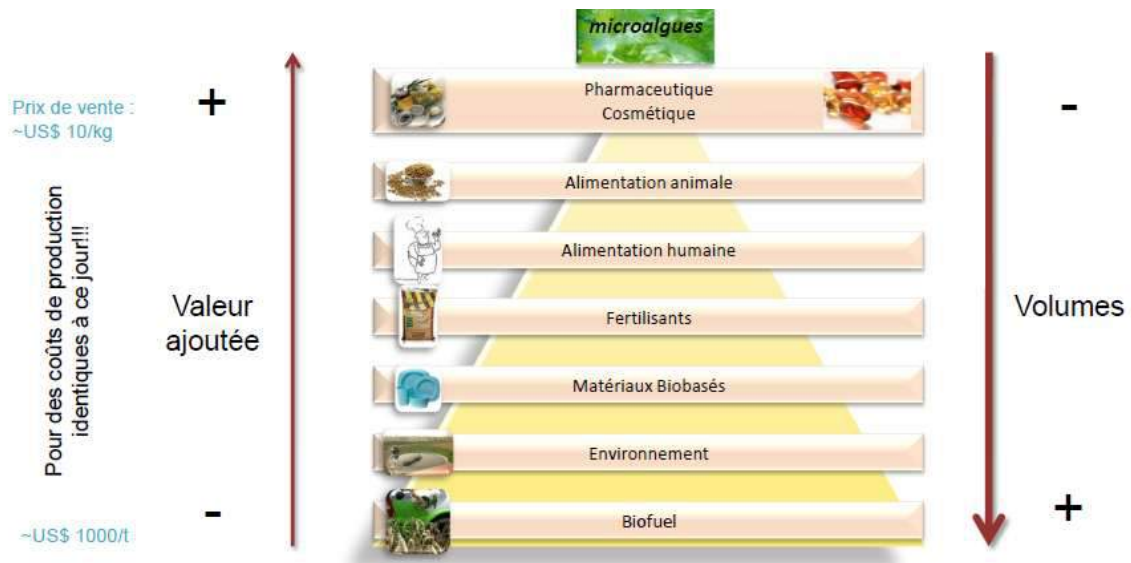


Figure 23 : Les micro-algues, le champ des applications possibles.
(Source : Étude TecKnowMetrix pour Algasud – 2010)

2. Produits à base d'algues pour la consommation humaine

Plusieurs parties du monde sont bien connues pour consommer les algues directement, certains peuples autochtones d'Afrique, d'Amérique du Sud et du Mexique en consomment de petites quantités d'origine naturelle principalement pour un apport en vitamines et éléments nutritifs.

Moins connue du grand public, quelques ingrédients dérivés d'algues sont utilisés dans la préparation des aliments. On y retrouve généralement des acides gras polyinsaturés, des pigments comme colorants naturels, des antioxydants, et des composés bioactifs.

Les micro-algues pour la nutrition humaine sont aujourd'hui commercialisées sous différentes formes : comprimés, capsules, suspensions et extraits solubles en ampoules. Elles peuvent également être incorporées dans les pâtes, aliments à grignoter, friandises ou pâtes à mâcher, dans les boissons, les céréales du petit déjeuner, les barres nutritives ou les biscuits.

Le marché mondial des aliments fonctionnels et nutraceutiques représentait 138 milliards d'euros en 2007 ; 175 milliards d'euros sont attendus pour 2012 avec 1 à 2 milliards en faveur des micro-algues. (*Étude de marché TecKnowMetrix pour Algasud*)

Selon la *National Algal Biofuels Technology Roadmap*, la consommation mondiale de biomasse algale sous forme de complément alimentaire représentait en 2010 un marché d'environ 2.5 milliards de dollars, soit environ 1.8 milliards d'euros. (*Projet IEED Green Stars*)

Aliments de base

Les protéines sont d'une importance majeure dans la nutrition humaine : leur carence est l'un des principaux facteurs de malnutrition. Certaines algues contiennent jusqu'à 60% de protéines. La cyanobactérie *Arthrospira* est une algue célèbre, actuellement cultivée pour sa forte teneur en protéines elle est plus communément désignée sous le nom de *Spirulina* ou encore spiruline. On retrouve des signes de consommation de spiruline par les Aztèques au cours du XVI^e siècle au Mexique et par la tribu Kanembou au Tchad depuis plusieurs décennies.

La raison pour laquelle la spiruline est la micro-algue la plus cultivée est qu'en plus de sa forte teneur en protéines, elle est facile à cultiver en monoculture. Cela s'explique par le fait qu'elle est l'une des rares espèces se développant à un pH élevé et par le fait qu'elle forme des groupes pluricellulaires en forme de spirale, d'une taille plus grande qu'une simple cellule algale facilitant ainsi sa récolte.

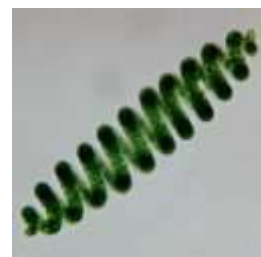


Figure 24 : *Arthrospira*.
(Source : M. TREDICI)

Suite à une résolution intitulée «Utilisation de la spiruline pour combattre la faim et la malnutrition et contribuer à la réalisation du développement durable » et menée par cinq pays en voie de développement à l'Assemblée Générale des Nations Unies, la FAO a publié un rapport complet sur cette micro-algue. En référence à la consommation humaine, ce dernier signale de nombreux effets bénéfiques sur la santé, mais avertit aussi que certaines espèces peuvent produire des toxines du groupe des microcystines.

La spiruline est connue pour contenir plus de 60% de protéines brutes, des vitamines, des minéraux et de nombreuses substances biologiquement actives. Sa paroi cellulaire, composée de polysaccharides, présente une digestibilité de 86%, et peut être facilement absorbée par le corps humain. En général, les quantités destinées à la consommation de spiruline oscillent autour de 15 grammes par jour. Ce qui représente une petite partie de l'apport quotidien en protéines pour un adulte.

Il est à noter que la coproduction à des fins bioénergétiques n'est pas une option envisageable si la totalité de la masse cellulaire de la spiruline est utilisée comme aliment. Il existe deux principaux extraits de spiruline : les phycobiliprotéines (seul colorant alimentaire bleu d'origine naturelle), et un extrait de protéine de couleur blanc-jaune insipide et inodore pouvant avoir plusieurs applications alimentaires. La biomasse restante après l'extraction pourrait être utilisée pour d'autres produits.

La spiruline est le principal exemple de culture de micro-algues à petite échelle avec des moyens rudimentaires dans différentes parties du monde, notamment dans les pays en voie de développement pour l'apport protéinique. Elle possède également d'autres applications comme l'alimentation des chevaux de course ou l'aquaculture.

D'autres espèces d'algues comme la chlorelle sont connues pour avoir aussi des teneurs élevées en protéines, d'une qualité comparable à des sources de protéines classiques. En dépit de leur forte teneur en protéines, les algues n'ont pas encore acquis une importance significative en tant que substitut dans l'alimentation. La réglementation stricte d'approbation et d'acceptation des nouveaux aliments sur le marché représente une étape importante à prendre en considération. Le manque de texture, de consistance et de cohérence de la biomasse sèche, sa couleur vert foncé et sa légère odeur de poisson sont aussi autant de caractéristiques indésirables pour l'industrie alimentaire.

Aliment-santé et produits pharmaceutiques

En plus de la nourriture, les algues fournissent une grande variété de vitamines, nutraceutiques et autres nutriments. Les produits alimentaires pour la santé dominent actuellement le marché des micro-algues. Une grande variété d'algues et de produits issus des algues ont montrés des applications médicales ou nutritionnelles. En 1996, au Japon seulement, la consommation d'aliments pour la santé issus de micro-algues s'élèverait à 2 400 tonnes.

- Les Pigments

Les micro-algues contiennent une multitude de pigments associés au captage de la lumière incidente. En plus de la chlorophylle (le principal pigment photosynthétique) les plus pertinents sont les phycobiliprotéines (qui améliorent le rendement d'utilisation de l'énergie lumineuse) et les caroténoïdes (qui protègent les algues contre le rayonnement solaire excessif et les effets connexes).

Les caroténoïdes issus des micro-algues présentent déjà de nombreuses applications sur le marché. Le β -carotène de *Dunaliella* est valorisé dans les aliments pour la santé en tant que précurseur de la vitamine A ; la lutéine, la zéaxanthine et la canthaxanthine servent elles à la coloration de la peau des poulets, ou à des fins pharmaceutiques. L'astaxanthine de *Haematococcus* se retrouve en complément alimentaire dans l'alimentation humaine, le même pigment de synthèse chimique est utilisé en aquaculture pour fournir la couleur rouge naturel de la chair de certains poissons comme le saumon.

Les phycobiliprotéines comme la phycocyanine et la phycoérythrine (qui sont propres aux algues) sont déjà utilisés pour des applications alimentaires, cosmétiques et même pharmaceutiques avec le diagnostic de contrôle par exemple.

Le marché mondial des colorants, toute application confondue, représentait 14 milliards d'euros en 2004.

BASF Health & Nutrition estimait le marché mondial des caroténoïdes à plus de 900 millions de dollars US en 2005. Frost & Sullivan estimait que la part européenne de ce marché atteindrait 419 millions de dollars US en 2010, soit la moitié du marché mondial. Parmi les différents caroténoïdes dont sont riches les micro-algues, la **lutéine** connaît l'une des progressions les plus importantes (+ 6,1% entre 2005 et 2009), tout comme l'**astaxanthine** (+1,9%) qui est majoritairement synthétisée et dont le marché mondial est estimé à 150 millions d'euros. Les **β -carotènes** (qui sont les plus répandus et qui peuvent représenter jusqu'à 12% de la masse sèche de *Dunaliella salina*) sont produits à hauteur de 1 450 tonnes par an dans le monde avec un prix de vente compris entre 300 et 3 000 €/kg. En 2003, le marché européen des beta-carotènes représentait 268 millions d'euros avec comme leaders DSM (54% de part de marché) et BASF (20%).

Avec la demande croissante de molécules d'origine naturelle, et les prévisions de suppression de certains colorants de synthèse, le marché des caroténoïdes issus des micro-algues offre des perspectives commerciales élevées. (*Étude TecKnowMetrix pour Algasud – 2010*). (*Projet IEED Green Stars*)

- Acides gras polyinsaturés (AGPI)

Les AGPI sont des acides gras essentiels qui doivent être fournis par des sources externes puisqu'ils ne peuvent pas être produits par l'organisme lui-même. Les AGPI les plus connus comprennent les acides gras n-3 (communément connus sous le nom d'acides gras ω -3 ou d'acides gras oméga-3). La source la plus connue d'acides gras polyinsaturés est l'huile extraite des poissons. Cependant, les poissons ne produisent pas les AGPI mais les accumulent en consommant des algues (ou d'autres organismes mangeurs d'algues, rotifères, artémia...). Les micro-algues sont la véritable source de ces nutriments essentiels. La production d'AGPI à partir d'algues a été développée seulement dans la dernière décennie et présente des avantages non négligeables sur les huiles de poisson qui sont : l'absence d'odeur de poisson caractéristique et désagréable, la réduction des risques de contamination chimique et un meilleur potentiel de purification. Les AGPI sont connus pour jouer un rôle important dans la réduction des maladies cardio-vasculaires, l'obésité, le métabolisme des cellules comprenant la régulation de la fluidité membranaire, le transport des électrons et de l'oxygène, ainsi que la capacité d'adaptation thermique.

Certains des AGPI méritent une attention particulière :

- le DHA (acide docosahexaénoïque) est un acide gras oméga-3 présent par exemple dans la matière grise du cerveau et dans la rétine. Il est une composante majeure du tissu cardiaque. Il a été démontré comme important pour la santé cardiovasculaire chez les adultes et le développement du cerveau et des yeux chez les nourrissons. Le DHA se trouve dans un choix limité d'aliments tels que les poissons gras et certaines viandes. Il est naturellement présent dans le lait maternel, et absent dans le lait de vache. Depuis 1990, son introduction dans les préparations pour nourrissons prématurés et nourrissons à terme a été recommandée par un certain nombre d'organisations de la santé et de la nutrition, ce qui a dopé son marché.
- l'EPA (acide éicosapentaénoïque) est normalement estérifié (par la cyclo-oxygénase et des activités de la lipo-oxygénase) pour former des molécules lipidiques complexes. Il joue un rôle important chez les animaux supérieurs et chez les humains en étant le précurseur d'un groupe d'eicosanoïdes, substances semblables aux hormones comme les prostaglandines, des thromboxanes et des leucotriènes, qui sont cruciales dans la régulation du développement et le contrôle physiologique.

Le marché global des acides gras représentait 4 milliards d'euros en 2003 et 5 milliards d'euros en 2005.

Le marché mondial des oméga-3 (principalement, **EPA** et **DHA**) est en pleine croissance : estimé à 4,6 milliards d'euros dans le monde en 2006, il s'élèverait cette année à 5,3 milliards (avec une nette domination des oméga-3 d'origine marine sur ceux d'origine végétale terrestre). Le marché européen des EPA et DHA en 2008 est de plus de 300 millions d'euros, en croissance de 13 % par an. (*Étude TecKnowMetrix pour Algasud – 2010*). (*Projet IEED Green Stars*)

- Autres produits bioactifs d'algues

Chez les espèces *Chlorella*, le composé le plus important d'un point de vue médical est le β -1,3-glucane, un immunostimulant actif, piègeur de radicaux libres et réducteur des lipides sanguins. Ce composé présente une efficacité contre les ulcères gastriques, les plaies et la constipation ; des actions préventives contre l'athérosclérose, l'hypercholestérolémie et des actions anti-tumorales ont également été rapportées.

Les micro-algues représentent aussi une précieuse source de presque toutes les vitamines essentielles (par exemple, A, B1, B2, B6, B12, C, E, nicotinate, biotine, acide folique et acide pantothénique). En outre, les polysaccharides sulfatés de micro-algues peuvent être utilisés dans les thérapies comme “antiadhésifs” contre les infections bactériennes chez les animaux à sang froid et à sang chaud.

Le Marché des anti-infectieux représentait 55 milliards d’euros en 2006. (*Étude TecKnowMetrix pour Algasud – 2010*)

3. Algues pour l'alimentation animale

La plupart des algues possèdent naturellement une teneur en protéines élevée alors qu’une forte teneur en huile est la plupart du temps obtenue par modification des conditions de culture. Si faire consommer aux humains des micro-algues peut s’avérer compliqué pour des raisons culturelles, il est plus aisé de les incorporer dans la nourriture des animaux d’élevage, qui sont de loin les plus gros consommateurs de terres agricoles.

La fraction protéique des algues peut alors être utilisées dans l’alimentation animale (élevages terrestres : porcs, volailles et bovins) et aquacole comme substitut aux tourteaux d’oléagineux et aux farines de poisson (dont la consommation mondiale de ses secteurs est supérieure à 250 millions de tonnes). La *National Algal Biofuels Technology Roadmap* et l’US DEO 2010 estiment que les micro-algues destinées à l’alimentation aquacole et animale représenteraient respectivement 540 et 230 millions d’euros. (*Projet IEED Green Stars*)

Alimentation du bétail

L'utilisation de micro-algues comme la chlorelle comme compléments alimentaires pour animaux est relativement récente et principalement destinée à la volaille (principale utilisation en Chine), particulièrement pour l’amélioration de la couleur de la peau, des jarrets et des jaunes d'œufs.

De multiples évaluations nutritionnelles et toxicologiques ont démontré la pertinence de la biomasse algale comme complément alimentaire précieux ou source de substitution classique de protéines (farine de soja, farine de poisson, riz, etc.).

Outre l'utilisation des algues comme source de protéines pour le bétail, de nombreux avantages pour la santé mentionnés précédemment s'appliquent également aux animaux (par exemple une meilleure réponse immunitaire, une amélioration de la fertilité, un meilleur contrôle du poids, une peau plus saine et un pelage lustré), qui peuvent ainsi donner des produits de consommation plus sains pour l’alimentation humaine, la viande et le lait. L’ajout d'algues dans l'alimentation bovine a entraîné une baisse de la décomposition naturelle d'acides gras insaturés et une plus forte concentration de ces composés bénéfiques dans la viande et le lait. Un autre

exemple important est l'alimentation des volailles avec des algues riches en acides gras oméga-3, qui traverse la chaîne alimentaire, en plaçant ce composé hypocholestérolémiant dans les œufs.

L'utilisation d'algues dans les aliments pour chats, chiens, poissons d'aquarium, oiseaux d'ornement, chevaux, vaches et taureaux reproducteurs a également été rapportée.

Aujourd'hui, dans de nombreux pays, l'utilisation première du soja se fait pour son huile comme matière première du biodiesel, tandis que son tourteau pour l'alimentation animale est devenu un coproduit. Concernant les algues, le biodiesel est le principal centre d'intérêt, mais l'utilisation de la biomasse comme nutriments dans l'alimentation animale après extraction est envisageable. Elle possède même un énorme marché potentiel.

En 2010, 145 millions de tonnes d'aliments composés pour animaux (bovins, porcs et volailles) ont été produits par l'industrie européenne pour un chiffre d'affaire de plus de 50 milliards d'euros. Cette même année, la France, 1^{er} producteur européen, en produisait 21 millions de tonnes (dont 40% destinées aux volailles et 30% aux porcs) pour un chiffre d'affaire de 7 milliards d'euros.

Un aliment pour les bovins, les porcs, ou les volailles est composé principalement de céréales (50%) et de tourteaux d'oléagineux (soja, colza, tournesol...) à 26%. Ces tourteaux d'oléagineux sont utilisés pour leur apport en protéines. L'industrie de la nutrition animale consomme 3 à 4 millions de tonnes de tourteaux de soja, largement majoritairement utilisés par rapport à ceux de colza et tournesol. En France les tourteaux de soja constituent 14% des matières premières consommées par l'industrie alimentaire animale et sont importés, en quasi-totalité du Brésil et de l'Argentine. L'utilisation de la biomasse micro-algale pour nourrir les élevages permettrait à la France, et également à l'Europe, de limiter leur dépendance aux tourteaux de soja importés. *(Projet IEED Green Stars)*

Pet food

En France, parmi les 18 millions de consommateurs (propriétaires de 8 millions de chiens et 10 millions de chats), 80% d'entre eux achètent des aliments préparés industriellement pour leur animal de compagnie, et dépensent entre 15 et 75 euros par mois. Ce marché mondial, estimé à 51 milliards d'euros en 2009, et à 62 milliards d'euros en 2012, est dominé par des grands groupes notamment Nestlé (et sa filiale Purina) et Mars (avec Royal Canin), qui représentent à eux deux en France, un chiffre d'affaire de 1,7 milliards d'euros par an. Soucieux de la santé de leur animal de compagnie, les propriétaires se dirigent de plus en plus vers des produits classés dans la nutrition animale, ou certifiés "sans colorant artificiel", voire "bio". Ces nouvelles gammes de produits intègrent ainsi des colorants, des antioxydants, des acides gras, ou des protéines. Le marché mondial des micro-algues dédiées à l'alimentation animale est actuellement estimé à 230 millions d'euros. *(Étude TecKnowMetrix pour Algasud – 2010), (Eric de Legge, Journal du Net)*

Algues pour la consommation en aquaculture

Les micro-algues sont essentielles au cours des processus d'écloserie et de nurserie de mollusques de bivalves, crevettes, et quelques élevages de poissons. Les micro-algues sont

également utilisées pour produire du zooplancton, généralement des rotifères, qui sont donnés comme nourriture aux poissons carnivores fraîchement éclos.

En 1999, l'utilisation des micro-algues en aquaculture présentait une répartition de 62% pour mollusques, 21% pour les crevettes, et 16% pour les poissons. Comme pour les humains et le bétail, les protéines et les AGPI sont d'une importance principale. Les algues sont utilisées fraîches dans l'élevage du poisson, ce qui est une grande différence par rapport à d'autres utilisations des micro-algues. Il a été démontré que l'utilisation d'algues fraîches et vivantes permet un meilleur taux de survie chez les larves de poissons, l'apport généralisé de cette nourriture reste encore en débat. La culture à petite échelle des algues pour l'aquaculture est difficile, coûteuse et problématique à stocker. Des alternatives de stockage des algues ont été développées, comme la conserve, la micro-encapsulation et la congélation, ou bien en concentré sous forme de pâte.

Le saumon sauvage et la truite (les salmonidés) acquièrent leur couleur rouge caractéristique (muscle et chair) en se nourrissant de crustacés qui ont eux mêmes consommé du phytoplancton et du zooplancton contenant des pigments rouges, dont l'astaxanthine. Les espèces d'élevage ne possédant pas cette couleur présenteront une valeur inférieure sur le marché. Ceci peut être corrigé par l'ajout d'astaxanthine dans l'alimentation des poissons. Dans ce cas, l'astaxanthine est le plus souvent produite synthétiquement, il existe, cependant, un marché croissant pour l'astaxanthine d'origine algale "naturelle" de l'espèce *Haematococcus pluvialis*.

Mais le principal atout des micro-algues en aquaculture serait de pouvoir remplacer, au moins partiellement, les farines de poissons en raison de leur richesse naturelle en lipides insaturés (AGPI), constituants indispensables à l'alimentation des poissons. En effet, l'alimentation aquacole repose pour une part importante sur l'approvisionnement en farines (65% de protéines) et en huiles de poissons, pêchés notamment aux larges des côtes d'Amérique du Sud, dont la récolte industrielle n'est pas durable en raison de l'épuisement des stocks à moyen terme (poisson fourrage). Or, à l'échelle mondiale, la pisciculture marine (daurades, bars, soles, turbot...) et dulcicole (truites, carpes, tilapia...) constitue un enjeu important pour l'alimentation humaine en alternative à la pêche et augmente de 8,8% par an depuis les années 1970.

Face à ces contraintes, le prix des farines de poisson a triplé en moins de 10 ans pour atteindre 1 500 \$US/t en 2010, et celui des huiles de poisson a doublé sur la même période (1 000 \$US/t en 2009). Avec un tiers de la production mondiale, le Pérou est le principal producteur de farines et huiles de poisson. Une source alternative de protéines et lipides pour l'alimentation aquacole est donc nécessaire, en particulier pour l'aquaculture française (2^{ème} de l'UE, avec 244 000 tonnes pour une valeur supérieure à 500 millions d'euros en 2006 – 130 000 tonnes d'huîtres, 70 000 tonnes de moules toutes deux non consommatrices de farines, et 40 000 tonnes de poissons d'élevage consommateurs de farines).

L'importance de l'aquaculture au niveau mondial n'est plus à démontrer, en effet, selon le rapport de la FAO publié en 2009, au cours de l'année 2006 l'approvisionnement mondial en poisson représente 110 millions de tonnes dont 47% sont issus de l'aquaculture.

Le marché mondial des micro-algues dédiées à l'aquaculture feed est actuellement estimé à 540 millions d'euros. (*Étude TecKnowMetrix pour Algasud – 2010*). (*Projet IEED Green Stars*)

Il n'existe pas réellement de marché ouvert pour les micro-algues de fourrage utilisées en aquaculture pour les stades larvaires de poissons ou d'huîtres car la plupart du temps ce sont les nurseurs eux mêmes qui les produisent en interne. Il est à souligner que les coûts de production des micro-algues *in vivo* en écloserie représenteraient jusqu'à 40% des charges de ces établissements.

4. Cosmétiques

L'utilisation de certaines espèces de micro-algues, en particulier *Arthrospira* et *Chlorella*, est bien établie dans le marché des soins de la peau et certains industriels cosmétiques ont même investi dans leur propre système de production de micro-algues (LVMH, Soliance, Daniel Jouvance...). De par leur diverses natures (antioxydant, hydratant, colorant...), leurs extraits se retrouvent dans les crèmes anti-âge, les produits de soin rafraîchissants ou régénérants, les émollients, comme anti-irritant dans les gommages exfoliants et aussi dans la protection solaire et les produits de soins capillaires. En ce qui concerne les cosmétiques à base de lipides (comme les crèmes ou lotions), les extraits à l'éthanol ou au CO₂ supercritique prennent une ampleur commerciale non négligeable. Le développement des autres classes de lipides issus des micro-algues, comme les glyco- et phospholipides, ne doit pas être négligé à l'avenir.

En raison de la prise de conscience faite autour de l'exposition au soleil comme principale cause dans le cancer de la peau et dans le processus de photo-vieillessement, la consommation de produits écran-solaire a augmenté de manière significative ces dernières décennies. L'utilisation d'acides aminés semblables à la mycosporine comme filtre UV naturel très efficace dans les écrans solaires devient commercialement présente.

L'industrie cosmétique française génère 15 milliards d'euros de chiffre d'affaires et emploie 46 500 salariés (5 700 emplois créés en 10 ans). En 2007, le marché mondial des produits naturels bio représentait environ 4,7 milliards d'euros et était estimé à 6,7 milliards en 2010 soit une croissance moyenne de 10% par an. En 2008 il représentait en Europe 1,5 milliards d'euros (soit 3% du marché cosmétique « global » européen) et en France 250 millions d'euros (soit 3% du marché cosmétique « global » français). La France est le pays européen qui connaît la plus forte augmentation de la consommation de cosmétiques naturels, avec une croissance de 40% du marché par an, et où a eu lieu le plus grand nombre de lancements.

Le potentiel de croissance du marché des cosmétiques « naturels et bio » est important. Toutefois, à mesure que les cosmétiques bio et naturels se démocratisent, le prix tend à devenir un paramètre déterminant de l'acte d'achat, favorable au développement de l'entrée de gamme et du marché de masse. Le coût de production sera donc déterminant pour les nouveaux produits. Les grands industriels des cosmétiques, à la recherche de relais de croissance, ont lancé leurs gammes bio (à l'instar de L'Oréal, LVMH ou Yves Rocher) et sont des utilisateurs potentiels des molécules d'intérêt issues des micro-algues pour la compositions de leurs nouveaux produits.

Ces marchés en pleine croissance et la recherche de nouvelles sources de production justifient les investissements importants réalisés actuellement dans la culture de micro-algues, en particulier en photobioréacteurs et fermenteurs. (*Projet IEED Green Stars*)

5. Énergie

Leurs performances « biologiques » et la variété des espèces prédisposent les micro-algues à se positionner dans la course aux énergies renouvelables. En effet, les bioénergies, ou les combustibles pouvant être produits à partir des micro-algues couvrent une large gamme allant des composés gazeux comme l'hydrogène et le méthane aux alcools et aux hydrocarbures liquides conventionnels, en passant par l'huile de pyrolyse ou le coke. Les bioénergies les plus ciblées restent, du fait de leur forte densité énergétique, les carburants de transport liquides : essence, diesel ou kérosène. Ce sont les principaux produits actuellement créés à partir du pétrole brut pour le secteur des transports, qui peuvent être remplacés par d'autres carburants issus de la biomasse. Le cas du bio-kérosène, comme nous l'avons vu précédemment, constitue l'un des débouchés privilégié à terme pour un biocarburant algal en raison de ses caractéristiques physico-chimiques adaptées aux contraintes de l'aviation, mais aussi en rapport avec les objectifs de limitation du bilan d'émissions de CO₂ (baisse de 50% d'ici 2050 souhaitée par International Civil Aviation Organization).

De plus, les micro-algues présentent de nombreux avantages par rapport aux biocarburants de première et de deuxième génération : une capacité à accumuler plus de 50% de leur poids sec en acide gras ; des rendements à l'hectare supérieurs aux espèces oléagineuses terrestres (cf. tableau 6) ; des surfaces nécessaires plus faibles, et non arables ; une possibilité d'utiliser de l'eau de mer ; une meilleure capacité de remédiation du CO₂ etc.

Les différents carburants potentiellement obtensibles à partir de micro-algues sont issus de procédés de traitement décrits plus haut et sont illustrés par les schémas des figures 25 et 26.

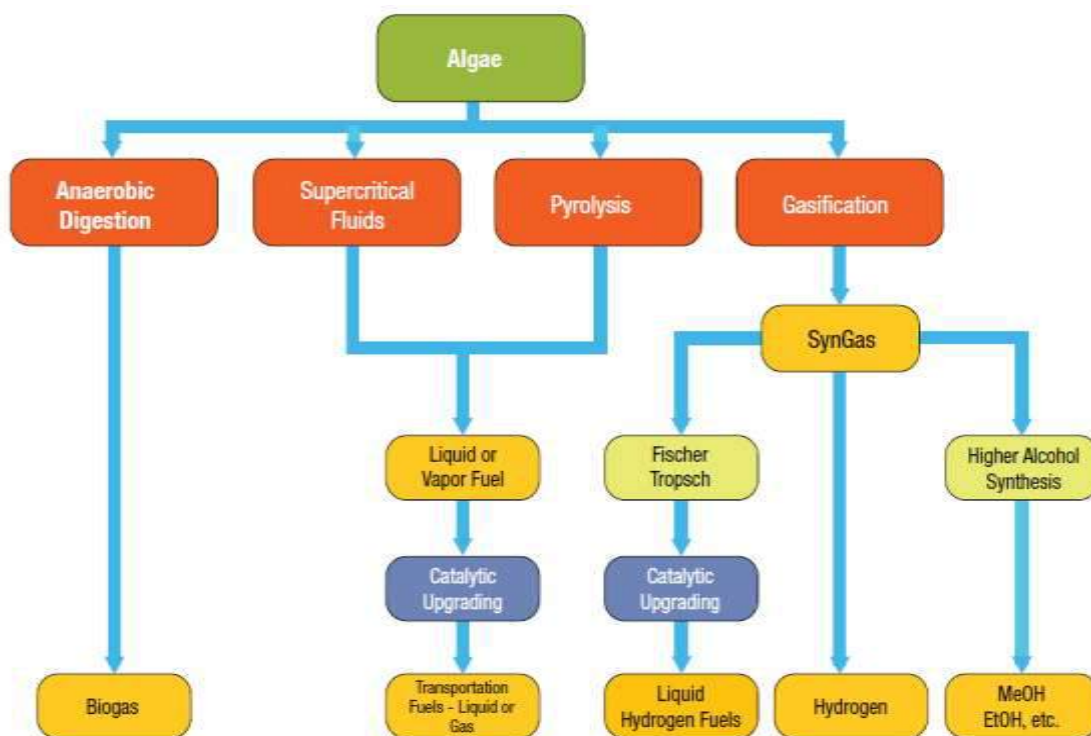


Figure 25 : Schéma de conversion potentiel des algues dans leur totalité en biocarburants.
(Source : National algal biofuels technology roadmap pages 51)

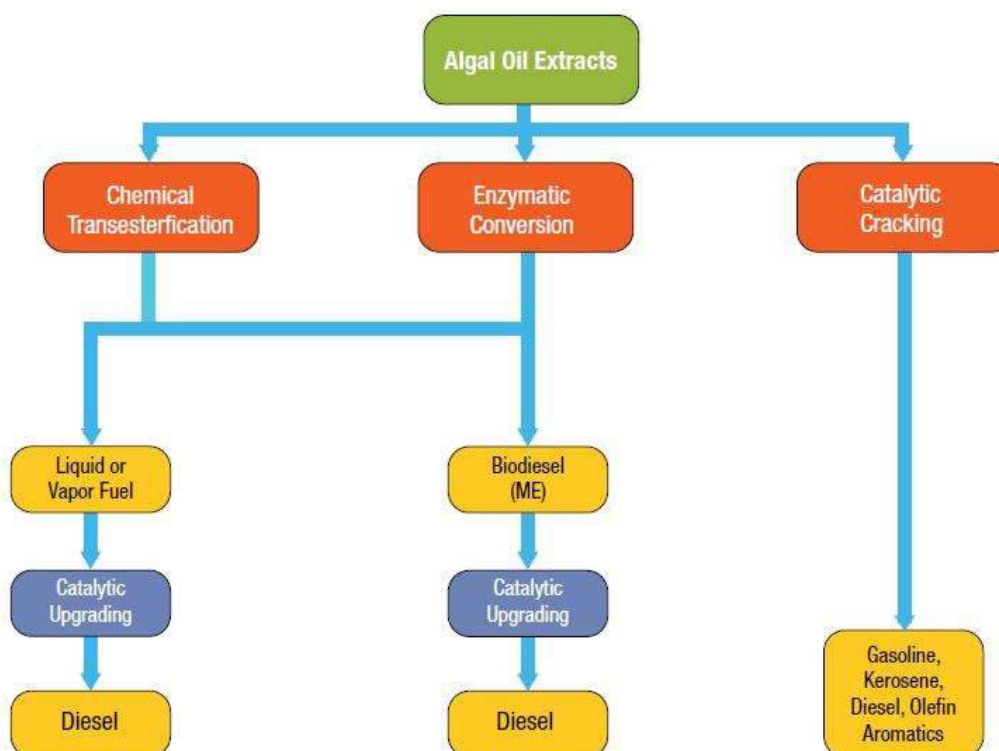


Figure 26 : Schéma des différentes stratégies de conversion des extraits d'algues en biocarburants.
(Source : National algal biofuels technology roadmap pages 54)

Biodiesel et Hydrocarbures

Les huiles végétales et graisses animales sont des ressources renouvelables dont la structure chimique des chaînes lipidiques est similaire à celle des hydrocarbures des “coupes gazoles” issues du pétrole. Il est important d'utiliser, pour fabriquer du biodiesel, des huiles n'entrant pas en concurrence directe avec l'usage alimentaire, comme par exemple les huiles de jatropha ou les huiles issues de la culture d'algues.

La production de biodiesel à partir d'huiles d'algues a reçu un regain d'attention au cours de la dernière décennie, principalement grâce à la productivité avancée pour certaines espèces oléagineuses, dont la biomasse peut être composée, dans certaines conditions de carence, de plus de 50% de lipides alors que pour les plantes telles que le colza, les lipides ne représentent que 6% de l'ensemble du végétal).

Dans des conditions de croissance normales, la concentration en triglycérides est nettement plus faible, et une carence minérale (en phosphore, azote, voire silicium) est nécessaire pour stimuler le stockage de carbone de réserve. Néanmoins, cette carence s'accompagne d'une baisse du taux de croissance ce qui réduit fortement les rendements.

Une espèce d'algues, *Botryococcus*, peut produire des hydrocarbures à chaîne plus longue, qui ne sont pas appropriés pour la production de biodiesel mais peuvent faire l'objet d'une conversion en bio-kérosène. Malheureusement cette espèce présente un faible taux de croissance, et par conséquent, une productivité très limitée et une forte sensibilité aux compétiteurs.

Tableau 6 : Comparaison de quelques biomasses sources de biodiesel.
(Source : Yusuf Chisti (2007))

Crop	Oil yield (L/ha)	Land area needed (M ha) ^a	Percent of existing US cropping area ^a
Corn	172	1540	846
Soybean	446	594	326
Canola	1190	223	122
Jatropha	1892	140	77
Coconut	2689	99	54
Oil palm	5950	45	24
Microalgae ^b	136 900	2	1,1
Microalgae ^c	58 700	4,5	2,5

^a For meeting 50% of all transport fuel needs of the United States.

^b 70% oil (by wt) in biomass.

^c 30% oil (by wt) in biomass.

Si le travail est orienté sur les espèces riches en huiles dans les laboratoires, il est nécessaire d'évaluer ces procédés à plus grande échelle et aller au-delà des quelques expériences pilotes qui ont été conduites principalement aux USA, pour aboutir à des productions à un coût compatible, à la fois, avec le cours du baril de pétrole, les bilans énergétiques, et qui soient, en termes d'émission de gaz à effet de serre, meilleures que pour les agro-carburants de première génération.

Au delà des problèmes techniques qui sont en voie de résolution, ce sont les équations économiques qui restent à maîtriser et le véritable enjeu se situe dans les quantités à produire.

Pour donner un ordre de grandeur un hectare de culture de micro-algues peut théoriquement produire entre 60 et 300 barils équivalent pétrole par an (7 pour le colza).

L'industrie pétrolière utilise le million de barils comme unité de compte : un million de barils équivalent pétrole par an représente une surface comprise entre 1 600 et 3 400 hectares de surface de culture (soit plus de 140 000 pour cultiver du colza).



Figure 27 : L'Algaeus, la première voiture au biocarburant algal légalement homologuée aux USA.
(Source : Algaeus © Sapphire Energy / Toyota)

En 2009, le marché du biodiesel a représenté au niveau mondial un chiffre d'affaire de 8,6 milliards de dollars US soit 12 millions de tonnes équivalent pétrole (TEP). En Europe, ce marché

représente 7,8 millions de TEP et 2,2 millions en France. À l'image de la production européenne qui a montré une croissance de 35% ces 20 dernières années, le marché du biodiesel est en croissance, et ce pour répondre aux enjeux environnementaux. L'Europe a fixé à chaque État membre un objectif de 10% d'énergie renouvelable dans la consommation d'énergie dans le secteur des transports en 2020. Les autorités françaises, quant-à-elles, se fixent d'atteindre 10% dès 2015. Les biocarburants liquides, dont le biodiesel, ont un rôle majeur à jouer dans l'atteinte de ces objectifs ambitieux.

La rentabilité des filières de production de biocarburant dépend du prix des carburants fossiles indexé sur le prix du pétrole. Le pétrole brut vaut aujourd'hui 0,4 €/L et l'huile de colza 1 €/L. D'ici 2050 le prix du baril de pétrole devrait doubler (passer de 70 à 140 €), permettant progressivement de développer les filières de production des biocarburants sur des modèles économiques plus pérennes.

EADS 100% algues

Du 9 au 13 juin 2010 au salon aéronautique de Berlin (ILA), EADS a fait voler chaque jour un Diamond DA42NG (nouvelle génération) avec un biocarburant produit uniquement à partir d'algues.

100 kilos d'algues ont été nécessaires pour extraire 22 litres d'huile d'algues et fournir 21 litres de biocarburant. Pendant sa phase de développement cette quantité d'algue aurait absorbé 182 kg de CO₂ et le biocarburant obtenu contiendrait huit fois moins d'hydrocarbures fossiles que le kérosène dérivé du pétrole. Ces vols ont même réalisé une économie de 5 à 10% de carburant et ce, sans adaptation spécifique des moteurs. EADS estime que les biocarburants pourraient représenter jusqu'à 30% des carburants avions utilisés d'ici 2030.

Aujourd'hui, la consommation mondiale de kérosène est de 200 millions de tonnes et devrait s'élever à 300 ou 350 dans les vingt prochaines années. Les 190 pays membres de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) veulent tenter de plafonner leurs émissions liées à l'aviation à partir de 2020. Cependant, la disponibilité de la biomasse terrestre pour la production de biocarburants est insuffisante pour atteindre ces objectifs. (*Projet IEED Green Stars*)

Éthanol

L'éthanol est généralement produit à partir de matières premières contenant des sucres ou de l'amidon ; certaines algues peuvent contenir plus de 50% d'amidon. Les parois cellulaires des algues sont composées de polysaccharides. Ils peuvent être utilisés comme matière première dans un processus similaire à la production d'éthanol cellulosique, avec l'avantage supplémentaire que les algues ne contiennent que rarement la lignine et ces polysaccharides, sont généralement plus facilement décomposables que la biomasse ligneuse. Des coproduits peuvent potentiellement être tirés de la partie non-carbohydratée de la biomasse algale.

Certaines algues, telles que *Chlorella vulgaris* et *Chlamydomonas perigranulata*, peuvent donner lieu à une production d'éthanol et autres alcools par auto-fermentation de leur amidon. Ceci peut être accompli grâce à la production et au stockage de l'amidon dans les algues par la photosynthèse, ou en nourrissant directement les algues de sucres, et après fermentation

anaérobie de ces sources de carbone dans l'obscurité pour produire de l'éthanol. Si ces alcools pouvaient être extraits directement du milieu de culture des algues, le processus nécessiterait moins d'investissement et de consommation énergétique que les autres procédés de production de biocarburants d'algues concurrents. Ce processus permettrait d'éliminer essentiellement le besoin de séparer l'eau de la biomasse, d'extraire et de traiter les huiles.

Ce procédé a été expérimenté dans des photobioréacteurs fermés utilisant l'eau de mer avec des cyanobactéries OGM métaboliquement améliorées produisant de l'éthanol ou d'autres alcools, tout en étant résistantes à de fortes température et salinité, et des degrés en éthanol élevés, obstacles antérieurs aux volumes à l'échelle commerciale.

Biogaz

La production de biogaz issu de la digestion anaérobie des micro-algues est un mode de production de biocarburants gazeux intéressant. À ce jour, c'est probablement la filière la plus aboutie, tant sur le plan économique que technique, dans le domaine de la valorisation énergétique des micro-algues.

Dans ce registre les micro-algues sont facilement transformables. Il suffit, en effet, de récolter une biomasse humide directement méthanisable par biodigestion. L'utilisation de cette technologie de conversion élimine, alors, plusieurs obstacles/verrous clés, responsables des coûts actuels élevés associés aux biocarburants d'algues, en particulier le séchage, l'extraction et la conversion du combustible. Cette approche peut être très efficace pour des situations comme le traitement intégré des eaux usées, où les algues sont cultivées dans des conditions non contrôlées en utilisant des souches non-optimisées pour la production de lipides.

L'Europe du gaz qui regroupe 25 pays en consomme 471Gm³, (soit 17% du marché mondial). Aujourd'hui plus de la moitié est importée et la consommation européenne augmente de 3% par an. La France consomme environ 45 milliards de m³ dont la quasi-totalité est importée. (*Projet IEED Green Stars*)

Le biogaz, après purification et concentration en méthane, peut se substituer au gaz naturel et être soit injecté dans le réseau de gaz naturel, soit être distribué pour une utilisation en tant que bio-méthane carburant. La production de biogaz à partir de micro-algues permettrait à la France et plus généralement à l'Europe de limiter leurs importations de gaz naturels.

Dihydrogène (H₂)

Le dihydrogène (H₂) est considéré comme le carburant propre de l'avenir car sa combustion par l'O₂ est hautement énergétique et ne produit que de l'eau ($H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$). L'H₂ a vocation à être transformé directement sur le lieu de consommation en électricité via les piles à combustible.

Cependant la production de cette molécule est un défi bien plus important que son utilisation.

L'atome d'Hydrogène (H) est le composé le plus abondant sur Terre (dans l'eau et tous les composés organiques), mais il est pratiquement introuvable sous sa forme H₂ à l'état naturel. Plutôt qu'un carburant propre, il convient donc de parler d'un vecteur d'énergie dont la combustion est propre, mais, à ce jour, pas sa production.

À l'heure actuelle, la production industrielle du dihydrogène peut se réaliser au moyen de plusieurs procédés :

- le reformatage des hydrocarbures fossiles : cette technique, dépendante des ressources fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel), présente l'inconvénient environnemental notable de dégager beaucoup de CO₂,
- l'électrolyse de l'eau : présente un rendement énergétique faible, en plus d'être environ 4 fois plus cher que le procédé précédent, elle est aussi dépendante de ressources non renouvelables et limitées comme les métaux rares (électrodes de platines) et des méthodes de production d'électricité (centrales à charbon et pétrole ou nucléaire, ou bien issues du renouvelable : éolien, hydraulique, solaire..., selon les pays),
- des cycles chimiques à haute température (Iode-soufre...),
- la fermentation anaérobie de composés organiques : cette technique requiert l'apport de composés organiques prétraités et des installations spécifiques aux organismes anaérobies concernés.

La production d'hydrogène provenant de micro-algues a reçu beaucoup d'attention depuis plusieurs décennies. Les technologies de production biologique de dihydrogène (c'est-à-dire de bio-hydrogène) offrent un large éventail d'approches pour en produire, comprenant l'hydrogène photosynthétique, la photo-fermentation, et la fermentation obscure.

La technique la plus porteuse d'espoir a émergé des algues et cyanobactéries lorsqu'on a découvert que ces organismes photosynthétiques pouvaient produire de l'H₂ directement à partir de la lumière solaire, du CO₂ et de l'eau. Cet « hydrogène photosynthétique » présenterait de nombreux avantages là où les autres technologies ont essentiellement des inconvénients. Là où les autres technologies sont émettrices de CO₂, celle-ci permet au contraire de le capter pour en faire de la biomasse. Là où les autres techniques demandent beaucoup de ressources ou énergies non renouvelables, celle-ci ne dépend que de la lumière solaire, de l'eau et du CO₂ (et de quelques sels minéraux).

Cependant cette perspective reste virtuelle car de nombreux verrous technologiques restent à faire sauter. Notamment le fait qu'à l'état naturel, la production d'H₂ des algues est faible, transitoire et indissociable de conditions de stress non favorables à la survie des algues. En effet l'H₂ n'est pas une biomolécule d'intérêt pour la cellule algale, les souches sauvages n'ont donc pas d'intérêt particulier à se retrouver dans de telles conditions de stress. C'est en ce sens qu'il est encore prématuré d'imaginer des possibilités de coproduction H₂/autres biomolécules puisque les procédés actuels de production d'H₂ photosynthétique sont designés avec des organismes en « mauvaise santé » qui augmentent peu leur biomasse. La compréhension du métabolisme total autour de l'hydrogène dans la cellule (voir schéma figure 28 ci-après) et l'ingénierie génétique des organismes sont alors nécessaires et pourraient amener à créer des systèmes biologiques où la production d'H₂ serait dissociée des conditions de stress. À l'avenir cela pourrait aussi mener à des systèmes où des coproductions seraient envisageables.

Avant que la production biologique de dihydrogène par voie photosynthétique puisse être considérée comme une solution technologiquement viable, on peut relever les enjeux suivants :

- favoriser le flux d'électrons menant à la production du dihydrogène, plutôt que vers l'apparition de radicaux libres, nocifs à la cellule,
- dissocier la production d'H₂ des conditions de stress auxquelles elle est naturellement liée (par ingénierie métabolique),
- diminuer l'inhibition de l'hydrogénase due au dioxygène,
- optimiser la taille des antennes photosynthétiques pour diminuer l'effet d'écran entre les algues en culture dans un photobioréacteur, pour augmenter le rendement lumineux et diminuer les coûts de production.

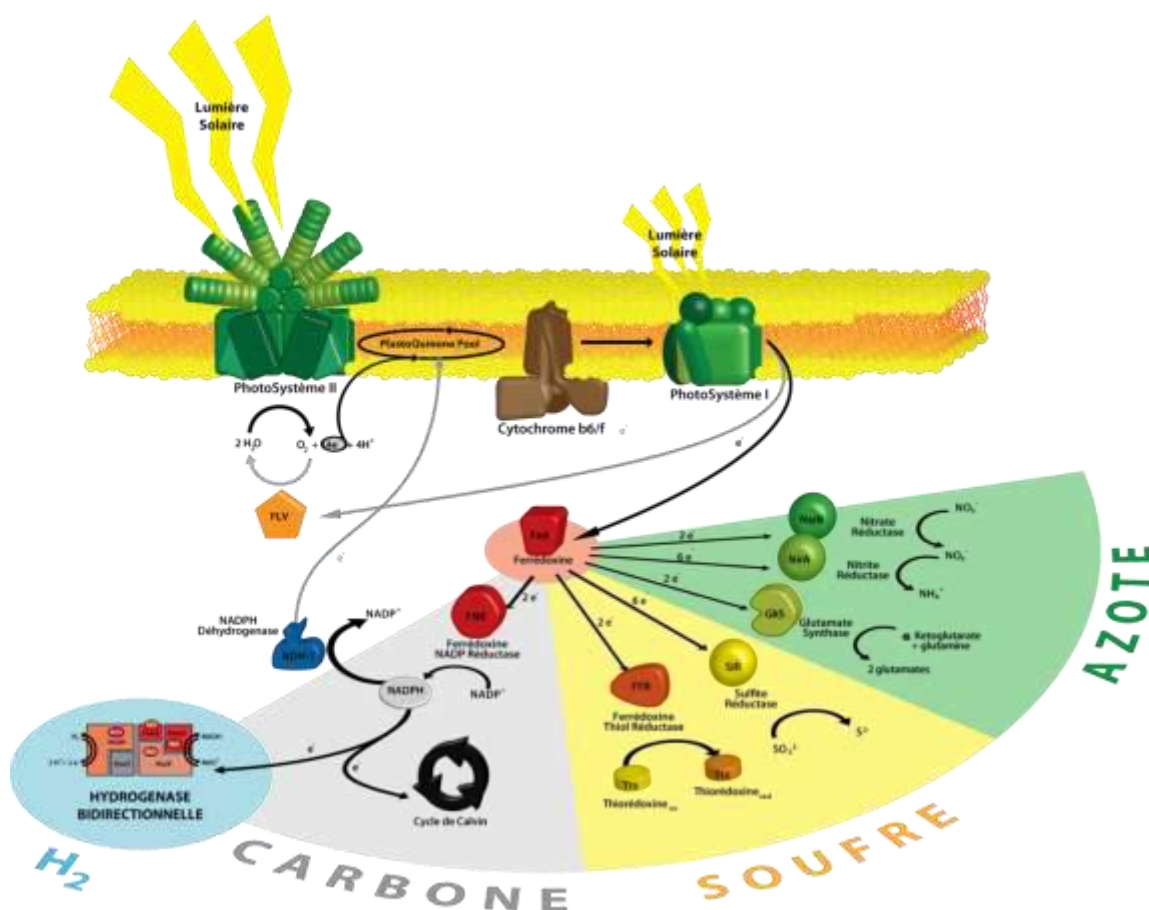


Figure 28 : Les différents métabolismes vitaux des algues, dépendants de la photosynthèse, faisant « concurrence » à la production de dihydrogène photosynthétique.
(Source : Jérémy Dutheil, Doctorant au CEA de Saclay)

L'avenir de la production biologique d'hydrogène ne dépend pas seulement de l'avancée des recherches, à savoir, l'amélioration de l'efficacité au moyen de micro-algues génétiquement modifiées et/ou le développement de photobioréacteurs avancés, mais aussi sur des considérations économiques, l'acceptabilité sociale, et le développement d'une infrastructure de l'hydrogène solide dans tout le pays.

Il est aussi envisageable de faire intervenir les micro-algues dans le procédé industriel de production d'hydrogène par reformage du méthane (CH₄), en associant à ce procédé une culture de micro-algues qui permettrait de « remédier » tout ou une partie du CO₂ émis par le traitement, et de fournir une biomasse, capable en moins d'une semaine de produire elle-même du biogaz (60% de méthane) qui peut ainsi être réinjecté directement dans le procédé. En effet,

l'intérêt des techniques de production d'H₂ basées sur les algues est que la biomasse algale, une fois usagée, peut produire du syngaz (mélange de CO₂ et d'H₂) par le procédé de gazéification de biomasse. La composition du syngaz présente le double intérêt de contenir de l'H₂ mais aussi du CO₂ qui pourrait être réinjecté dans le système pour un nouveau cycle de production de biomasse.

Bioélectricité

La biomasse des algues peut également subir une co-combustion dans une centrale électrique. Pour cela, la biomasse a besoin d'être séchée, impliquant une quantité importante d'énergie. Ce procédé est donc seulement intéressant si la biomasse doit être séchée pour l'extraction d'un coproduit donné dans une première étape avant d'être utilisée comme biocarburant. Mais cette voie de valorisation ne présente pas un grand intérêt.

6. Environnement

L'utilisation des micro-algues dans le secteur de l'environnement s'intègre dans une optique de dépollution avec pour idée de transformer nos déchets en produits, comme par exemple le traitement des eaux usées chargées en nitrates, phosphates, l'épuration d'effluents gazeux contenant du CO₂ mais aussi divers oxydes NO_x, SO_x, et la bioremédiation possible des sites pollués...

Le traitement des effluents

Les micro-algues sont utilisées depuis des décennies pour le traitement des eaux usées : il s'agit du lagunage, système extensif de traitement des eaux, apparenté à un processus naturel de biodégradation en milieu aqueux.

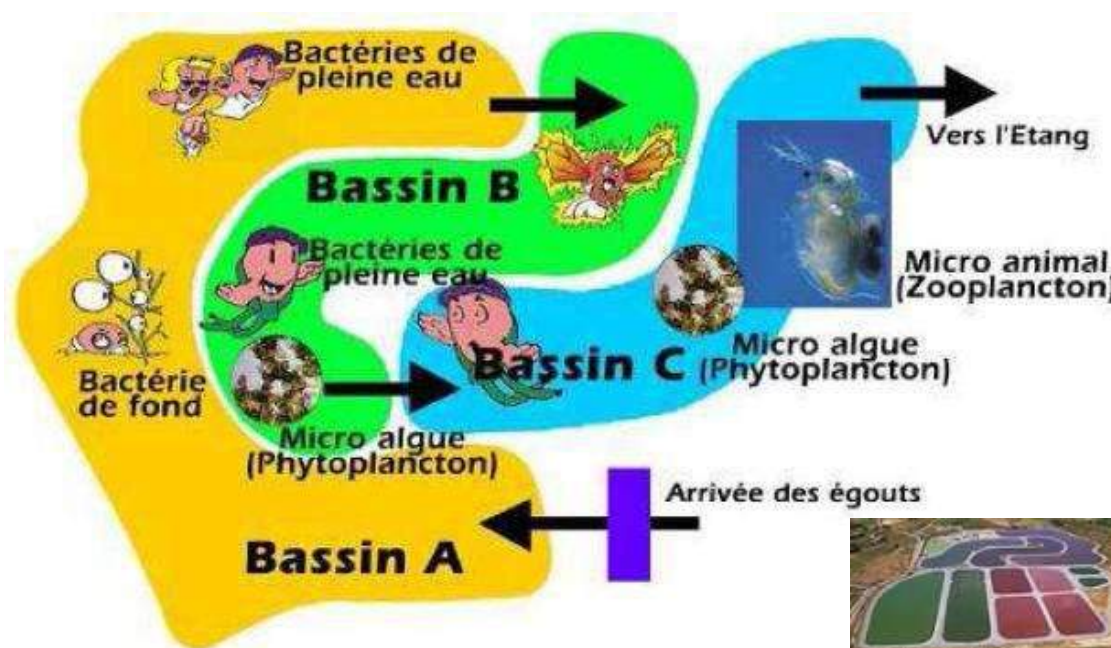


Figure 29 : Principe du lagunage de Mèze - Loupian.
(Source : CEVA)

Principe de fonctionnement du lagunage :

- avant l'entrée des eaux dans le premier bassin, un prétraitement est réalisé pour faciliter la suite des opérations,
- dans le premier bassin, les bactéries éliminent la matière organique et la transforment en sels minéraux et en gaz,
- dans le second bassin, ces éléments (sels minéraux et gaz) sont récupérés par des micro-algues pour permettre leur développement,
- le phytoplancton est consommé dans les derniers bassins par du zooplancton,
- 80 jours après leur entrée dans le premier bassin, les eaux sont aptes à être rejetées dans l'étang de Thau.

L'azote et le phosphore sont consommés par les micro-algues pour la production d'énergie. Les effluents d'origine agricole (lisiers, fumiers etc.) et industrielle (déchets et coproduits de l'agroalimentaire), riches en azote et phosphore, peuvent être ainsi valorisés. L'appauvrissement en azote des effluents agricoles ainsi traités permet de limiter les quantités d'azote des effluents à épandre (celle-ci étant limitée à 170 kg par hectare par le Codes des Bonnes Pratiques Agricoles).

Le marché du CO₂

Les centrales thermiques, les cimenteries, les raffineries sont très productrices de CO₂. Les micro-algues produisent de l'énergie tout en consommant du carbone créant ainsi des bénéfices environnementaux, mais également des retombées économiques pour les entreprises polluantes. En effet, plus de 1 160 sites industriels en France sont concernés par le système pollueur-payeur instauré par le protocole de Kyoto visant à réduire les émissions de carbone au niveau européen.

L'ensemble des quotas de CO₂ alloués aux entreprises françaises entre 2008 et 2012 est de 132 millions de tonnes. Selon le système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE), le prix d'une tonne de carbone excédentaire aujourd'hui est revendable à 13 euros la tonne. Si l'ensemble des industriels français revendaient leurs crédits carbonés, le total des ventes représenterait un chiffre d'affaire de 1 716 milliards d'euros. (*Projet IEED Green Stars*)

Le marché du captage et du stockage du CO₂ dépend de la technologie utilisée. Le coût moyen actuel est estimé entre 25 et 50 euros par tonne. (*Étude TecKnowMetrix pour Algasud – 2010*)

La bioremédiation des sites pollués

Des études récentes ont montré que les sites pollués par les hydrocarbures sont riches en consortiums de cyanobactéries capables de dégrader les composants du pétrole. Les cyanobactéries au sein de ces consortiums facilitent les processus de dégradation en apportant des populations de bactéries associées dégradant le pétrole avec l'oxygène nécessaire et l'azote fixé.

La décontamination des produits pétroliers constitue la majorité du marché de la bioremédiation. En Europe, sur les dix dernières années, la décontamination des sols a atteint les 30 milliards d'euros. (*Étude TecKnowMetrix pour Algasud – 2010*)

7. Chimie verte

L'industrie chimique

L'industrie chimique est actuellement fortement dépendante du pétrole fossile, à partir duquel sont extraits des produits chimiques, les matières plastiques et les carburants de transport. L'industrie chimique montre quelques similitudes importantes avec l'industrie des carburants, tels que le faible prix de la matière première de base fossile et l'utilisation d'hydrocarbures. Leur remplacement par des produits d'origine biologique n'en est qu'à ses balbutiements en raison de leur spécificité et de leur coût encore trop élevé.

Avec un chiffre d'affaires de 85,8 milliards d'euros et un effectif de 182 140 personnes, l'industrie chimique française occupe les rangs de 5^{ème} producteur et de 3^{ème} exportateur mondial, et se place en 2^{ème} en Europe (avec 15% des ventes de la chimie européenne) après l'Allemagne. Le chiffre d'affaire des exportations s'élève à 44,6 milliards d'euros. Dans le cadre du Grenelle de l'environnement, l'industrie chimique française s'est engagée à passer d'une utilisation de 5 à 8% (chiffres UIC) de matières premières d'origine végétale à 15% d'ici à 2017. Ce taux de substitution devrait atteindre 50% d'ici 2050, encourageant ainsi le développement de la chimie verte. (*Projet IEED Green Stars*)

Il ya un certain nombre de produits de spécialités et de produits chimiques que l'on peut envisager obtenir à partir de micro-algues. Ceux-ci pourraient être utilisés et valorisés dans le domaine de la chimie verte. Il s'agit notamment de bio-floculants, de bio-polymères, de synthons, de plastiques biodégradables, de lipides, de tensio-actifs et de polysaccharides pour ne citer que cela.

Des projets, comme la production de bioplastiques associant des micro-algues (Cereplast, USA) et la production de peintures avec des molécules extraites de micro-algues (Algicoat, Pays-Bas), en sont à l'étape de la R&D.

Bioplastiques

Un exemple d'applications des cyanobactéries en biotechnologie est celui de la production de bioplastiques. En effet, plusieurs souches de cyanobactéries (comme par exemple la bien connue spiruline) peuvent accumuler des polyhydroxyalkanoates, qui peuvent être utilisés comme un substitut aux plastiques d'origine pétrochimique non biodégradables.

Le marché mondial des bioplastiques est estimé en 2015 à 1,1 milliards d'euros et la demande en bioplastiques estimée à 2 millions de tonnes soit 5 milliards d'euros en 2018. Le marché annuel européen est quant-à lui estimé à 5 millions de tonnes en 2020. BASF, acteur européen principal du marché, estime à 20% la croissance annuelle du marché des bioplastiques et des plastiques biodégradables pour les prochaines années (tendance confirmée par un rapport de l'association European Bioplastics, qui prévoit une multiplication par 6,5 du marché des bioplastiques, en volume, entre 2007 et 2013). (*Étude TecKnowMetrix pour Algasud – 2010*). (*Projet IEED Green Stars*)

Agro-tensioactifs

Les tensioactifs ou agents de surface sont des molécules amphiphiles, constituées d'une partie hydrophile et d'une partie hydrophobes. De part leurs propriétés mouillantes, solubilisantes, détergentes ou émulsionnantes, ils sont très largement employés dans les détergents ménagers et industriels, les cosmétiques etc.

Le marché représentait en 2008 10 millions de tonnes dans le monde, 2,5 en Europe et 0,4 en France (le secteur de la lipochimie française réalisait un chiffre d'affaires de 3,7 milliards d'euros, en 2008). Dans une démarche de développement durable, et contraints de retirer du marché certains produits chimiques pour respecter la directive REACH, les industriels ont de plus en plus recours aux agro-tensioactifs issus de matières premières végétales à la place des tensioactifs issus de la pétrochimie. Ainsi le marché des agro-tensioactifs, sur lequel Rhodia est leader, serait en croissance de 7,5% sur les périodes 2005-2015 et 2015-2030. (*Projet IEED Green Stars*)

Les chaînes carbonées issues des micro-algues constitueront une nouvelle source, autre que celle des végétaux terrestres, pour la fabrication de bioplastiques et des agro-tensioactifs. Néanmoins, afin de favoriser l'utilisation des micro-algues, les procédés de culture, de récolte et de transformation devront être adaptés de manière à obtenir un bilan carbone neutre, voire négatif.

8. Conclusion

Il est difficile aujourd'hui d'attribuer une part de marché à chaque secteur d'application potentiel des micro-algues, en particulier parce que tous ces secteurs en devenir sont dans l'attente d'une production de biomasse stable, de qualité et à moindre coût, non atteinte à ce jour.

Les utilisations les plus avancées aujourd'hui sont dans des marchés de niche (quelques kilos à quelques tonnes par an) à forte valeur ajoutée comme la cosmétique/pharmaceutique ou la nutraceutique, aussi bien animale qu'humaine. Le marché intermédiaire pressenti pour atteindre un niveau de développement à plus grande échelle est celui de l'alimentation animale, notamment l'alimentation de masse en pisciculture en remplacement des farines et huiles de poisson.

Pour adresser les marchés de masse (carburant, chimie), il est nécessaire que la filière s'organise avec comme principal objectif la réduction des coûts de production et l'approvisionnement stable de quantités importantes de micro-algues.

H. Réglementation

La valorisation des micro-algues est soumise aux mêmes contraintes réglementaires que les autres ressources naturelles utilisées à des fins industrielles.

1. En alimentaire

Les autorisations des micro-algues en alimentation humaine se réalisent selon la procédure CE 258/97 « Nouveaux aliments » (JOCE du 27/01/1997). Ce règlement européen autrement appelé "Novel Food" concerne les aliments et ingrédients alimentaires composés de micro-organismes, de champignons, d'algues ou isolés à partir de ceux-ci. Il s'applique en particulier aux algues

pour lesquelles il n'est pas possible de prouver une consommation traditionnelle dans un état membre de l'Union Européenne. Il est alors nécessaire de déposer un dossier de demande d'autorisation pour un usage comme aliment ou ingrédient alimentaire selon les dispositions du règlement CE précité.

Il convient de souligner que l'autorisation porte non seulement sur l'espèce mais également sur son mode de production (raceways extérieurs, milieu marin naturel, conditions spécifiques). Tout autre mode de production doit donc faire l'objet d'un nouveau dossier démontrant que le produit obtenu est « équivalent » à celui autorisé.

En alimentation humaine, seules trois micro-algues sont autorisées. La première est une cyanobactérie, *Arthrospira platensis*, plus connue sous le nom de spiruline, autorisée en Europe depuis 1981. En 2002, c'est la diatomée *Odontella aurita* qui reçoit un avis favorable de l'AFSSA en réponse à une demande d'équivalence substantielle déposée par la société Innovalg et obtient ainsi son autorisation en tant qu'ingrédient alimentaire. Enfin, la France autorise en 2004 l'utilisation de *Chlorella vulgaris* appartenant à la famille des chlorophycées.

Citons également 2 extraits de micro-organismes marins (Qui ne sont pas *stricto sensu* une micro-algue mais un champignon marin) autorisés au niveau européen :

- l'huile extraite de *Schizochytrium sp.*, à teneur élevée en DHA (32% DHA), a reçu une autorisation de mise sur le marché en application du règlement CE 258/97 par la communauté européenne en 2003,
- l'huile extraite d'*Ulkenia sp.* (32% DHA) a également reçu un avis favorable d'utilisation en usage alimentaire en 2009,

Deux pigments extraits d'algues sont également autorisés par la réglementation communautaire comme additif dans la catégorie des colorants :

- le β -carotène (E160a) issu de la micro-algue *Dunaliella salina* (dans l'alimentation humaine toujours)
- l'astaxanthine (E161j) extraite de la micro-algue *Haematococcus pluvialis* (essentiellement utilisée dans l'alimentation des poissons tels que les truites et saumons) s'est déjà retrouvée vendue sous forme d'extraits titrés dans des compléments alimentaires en Europe avant 1997.

2. En cosmétique

À ce jour, il n'existe pas de réglementation spécifique "Algues" dans les cosmétiques. La valorisation des micro-algues s'accompagne d'un respect des contraintes réglementaires ou des recommandations officielles classiques (allégations, certifications, recommandations REACH, les nomenclatures pour les cosmétiques, etc.).

Pour faire évoluer la réglementation liée au secteur de la cosmétique, des états européens se sont associés pour proposer des bonnes pratiques de fabrication avec la norme ISO 22 716 et des engagements sur une réglementation des produits cosmétiques qui doit être mise en place d'ici 2013 : la réglementation REACH (CE n° 1223/2009 -> 11.07.2013).

Les normes ISO/TC 217 et ISO/NP 16 128 permettent la mise en place de définitions et critères techniques pour les ingrédients et les produits "naturels" et "biologiques" en cosmétiques.

Tableau 7 : Exemples de nomenclature INCI d'extraits cosmétiques à base de micro-algues.
(Source : présentation M. Grizeau - GEPEA)

INCI Name	CAS N°	Chem / IUPAC Name
<i>Chlorella emersonii</i> extract	223749-78-8	<i>Chlorella emersonii</i> Extract is an extract of the algae <i>Chlorella emersonii</i> , Oocystaceae
<i>Chlorella</i> extract		<i>Chlorella</i> Ferment is an extract of the product resulting from the fermentation of <i>chlorella</i> by yeast
<i>Chlorella pyrenoidosa</i> extract	223749-81-3	<i>Chlorella pyrenoidosa</i> Extract is an extract of the plant, <i>Chlorella pyrenoidosa</i> , Oocystaceae
<i>Chlorella vulgaris</i> extract	223749-83-5	<i>Chlorella vulgaris</i> Extract is an extract of the algae, <i>Chlorella vulgaris</i> , Oocystaceae
<i>Porphyridium cruentum</i> extract	223751-77-7	<i>Porphyridium cruentum</i> Extract is an extract of <i>Porphyridium cruentum</i> , Algae
<i>Porphyridium</i> zinc extract		<i>Porphyridium</i> / Zinc Ferment is an extract of the fermentation product of <i>Porphyridium</i> in the presence of zinc ions
<i>Spirulina maxima</i> extract		<i>Spirulina maxima</i> Extract is an extract of the fronds of the <i>Spirulina</i> , <i>Spirulina maxima</i> , Cyanophyceae
<i>Spirulina platensis</i> extract	223751-80-2	<i>Spirulina platensis</i> Extract is an extract of the algae, <i>Spirulina platensis</i> , Cyanophyceae

Une description de l'extrait utilisé suffit pour introduire des extraits cosmétiques issus de micro-algues. On peut souligner qu'il n'existe pas d'obligation à préciser l'espèce d'algue utilisée pour la production de l'extrait cosmétique. (cf. tableau 7 ci-dessus).

La nomenclature INCI (International Nomenclature of Cosmetic Ingredients), initiée en 1973 par la C.T.F.A. (Cosmetic, Toiletry and Fragrance Association) et obligatoire en Europe depuis 1998, permet d'informer le consommateur de la composition en ingrédients, dans l'ordre décroissant de leurs concentrations respectives, et sous une dénomination reconnue internationalement.

L'existence de COSMED, association aidant les industriels dans leurs démarches réglementaires, est à souligner.

3. Plus généralement

Le rapport commun de l'AFSSA et de l'AFSSET en 2006 sur « l'Évaluation Risques sanitaires liés à la présence de cyanobactéries dans l'eau » a également pris en compte les risques associés à la consommation de certains compléments alimentaires à base de cyanobactéries. Ce rapport met particulièrement en garde contre l'utilisation de produits à base d'*Aphanizomenon flos-aquae* var. *flos-aquae*, commercialisés en Europe comme équivalents de spiruline. Certains lots ont pu contenir jusqu'à plus de 2 µg de microcystines par gramme de produit. Des organismes comme l'Organisation Mondiale de la Santé tendent à recommander des contrôles plus sévères des compléments alimentaires à base de micro-algues et cyanobactéries en vue de prévenir toute confusion d'espèces et toute contamination pouvant entraîner la consommation donc l'exposition des consommateurs à des cyanotoxines ou des phycotoxines. L'étude des organisations sanitaires a recensé les moyens disponibles pour assurer ces contrôles sur les eaux de consommation, les eaux de baignades et accessoirement les compléments alimentaires. À terme, ces directives relatives à la protection sanitaire pourraient être également appliquées aux contrôles des cultures de micro-algues et cyanobactéries en systèmes de production semi-contrôlés pour des finalités autres qu'alimentaires ou parapharmaceutiques, en vue d'éviter de disséminer des souches toxigènes dans l'environnement de travail (sécurité des opérateurs en micro-algoculture) ou l'environnement naturel (pollutions).

III. Les Macro-algues

A. Introduction

Consommées depuis la nuit des temps en Asie (les premières traces d'utilisation alimentaires des algues remontent au 4^{ème} siècle au Japon), exploitées dans la médecine chinoise traditionnelle, utilisées dès le Moyen-âge par certaines populations littorales d'Europe et d'Amérique, les macro-algues sont aujourd'hui principalement utilisées comme aliment humain au niveau mondial.

En Europe, les algues sont plutôt considérées comme matière première pour l'industrie. Elles étaient utilisées dans la fabrication du verre au 16^{ème} siècle, une ordonnance de Colbert régissant la coupe du Varech faisait son apparition le siècle suivant. À partir du 19^{ème} siècle on les retrouve dans l'industrie pharmaceutique, avec l'extraction de l'iode utilisées comme antiseptique, puis, dans l'industrie des colloïdes à partir du début du 20^{ème} siècle avec l'extraction des alginates et des carraghénanes.

À la fin des années 1970, en France, la consommation alimentaire des algues débute sous l'impulsion d'un certain nombre de consommateurs végétariens et macrobiotiques ainsi qu'avec l'arrivée de populations migrantes asiatiques. Les algues sont à cette époque principalement importées d'Asie. Cependant des entrepreneurs bretons mettent à profit la grande richesse en algues de la Bretagne et commencent à proposer des produits transformés obtenus à partir des algues de nos côtes.

Dès les années 1980, les entreprises se structurent pour la récolte et la transformation des algues pour différentes applications.

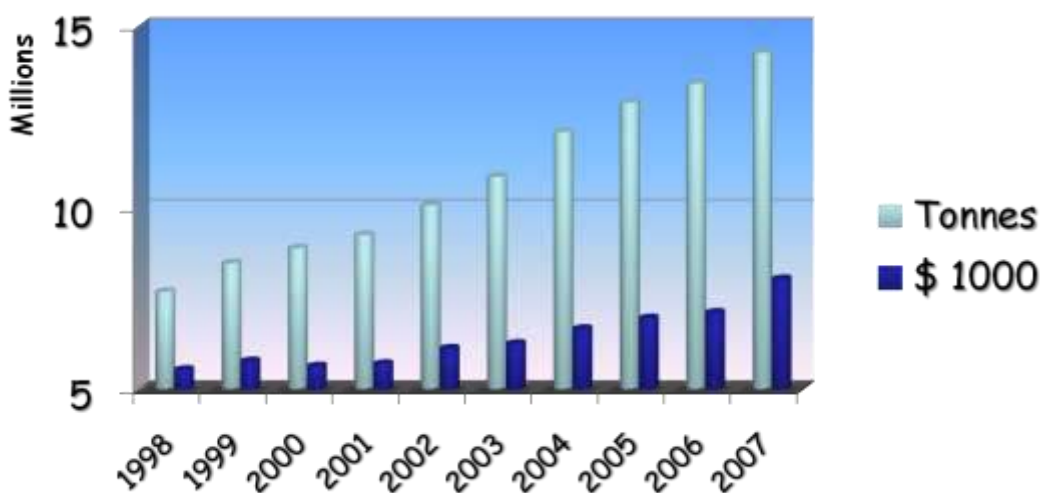


Figure 30 : Évolution de la production mondiale en valeur marchande et en quantité.
(Source: CEVA d'après FAO –Fisheries Stat. - Division 5.91, 92, 93 : Aquatic Plants – Seaweeds)

Au niveau mondial, la production de macro-algues atteint aujourd'hui 14,3 millions de tonnes brutes, principalement sous forme d'algues entières pré-séchées (pré-fanées) sur site à 70% de matière sèche. Avec une valeur estimée à 8 milliards de dollars US, on peut clairement qualifier ce marché de la biomasse macro-algale brute de conséquent. Cette production présente une accélération sur la dernière décennie essentiellement liée à l'entrée de la Chine dans la

compétition avec le développement de très grandes installations d'aquaculture. Aujourd'hui, 90% de la production mondiale est issue de l'aquaculture et 70% de cette même production provient de la Chine, avec 10,1 millions de tonnes (5,2 milliards de dollars US). Pratiquement tout le reste de la production est également originaire de l'Asie : Philippines (1,5 millions de tonnes), Indonésie (0,91 millions de tonnes), République de Corée (0,77 millions de tonnes), et Japon (0,49 millions de tonnes). Le Japon est le deuxième producteur mondial de plantes aquatiques en termes de valeurs (1,1 milliards de dollars US), compte tenu de sa production de Nori (*Porphyra sp.*) à valeur élevée. La lamineuse japonaise Konbu (*Laminaria japonica* - 4,9 millions de tonnes) est l'algue la plus cultivée, suivie du Wakamé (*Undaria pinnatifida* - 2,4 millions de tonnes) et du Nori (*Porphyra sp.* - 1,5 millions de tonnes).

La France arrive en 9^{ème} position mondiale avec une production annuelle avoisinant les 90 000 tonnes, elle est le deuxième pays européen, derrière la Norvège (150 000 tonnes), de production d'algues marines. On notera que la production et la transformation française des algues se situe encore aujourd'hui quasiment exclusivement en Bretagne, et notamment dans le Finistère et les Côtes d'Armor, où les champs d'algues sont les plus importants d'Europe. Cela représente en moyenne 70 000 tonnes exploitées chaque année issues majoritairement d'algues sauvages (algues brunes pour le marché des alginates).

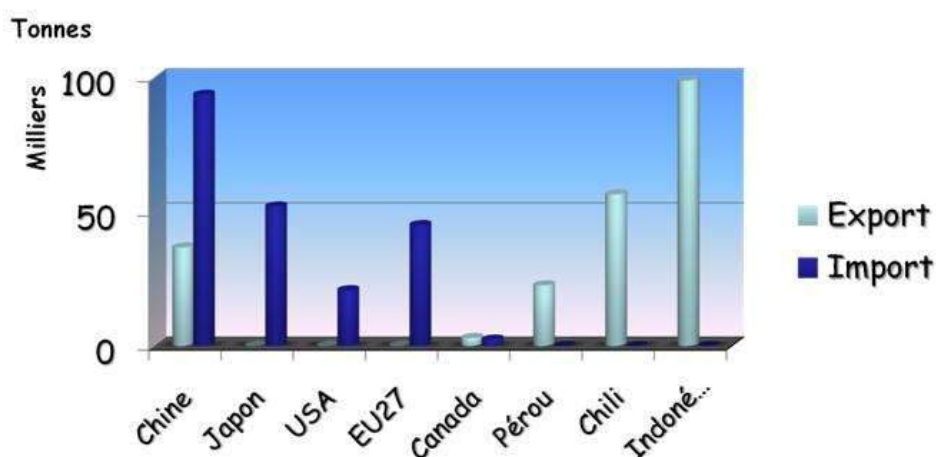


Figure 31 : Flux d'import / export mondiaux 2008.
(Source : CEVA d'après UN Comtrade, 1212.20 commodity)

Les macro-algues sont une ressource globale avec des flux d'importation et d'exportation très importants dans le monde. Bien que la Chine soit le plus gros producteur, elle reste aussi un gros importateur. L'Europe a tendance petit à petit à importer sa ressource algale d'autres zones du monde. À l'opposé, des pays d'Amérique du Sud et d'Asie du Sud Est sont principalement producteurs de biomasse et de gros exportateurs.

Les macro-algues sont utilisées dans la production de denrées alimentaires, aliments pour animaux, produits chimiques, cosmétiques et produits pharmaceutiques. Les algues sont principalement produites dans les pays asiatiques cités ci-dessus. Les États-Unis, le Canada et les pays européens comme la France, l'Irlande, le Royaume Uni (Écosse ; Irlande du Nord ; Pays de Galles), l'Allemagne, la Norvège, les Pays-Bas et le Danemark cherchent à établir la culture d'algues à grande échelle.

B. Caractéristiques des macro-algues

1. Diversité de familles et d'espèces

Le terme de macro-algues n'a en fait aucune valeur taxonomique et si on doit poser une définition, il s'agit d'un terme générique qui englobe tous les organismes aquatiques photosynthétiques multicellulaires à l'exception des plantes terrestres (plantes vertes ou Embryophytes). On distingue les macro-algues et les micro-algues et en toute rigueur les procaryotes photosynthétiques que sont les cyanobactéries par exemple, parfois appelées algues bleues, ne sont pas des algues *stricto sensu*. On trouve des macro-algues dans plusieurs lignées évolutives indépendantes y compris à la base de la lignée des plantes terrestres qui ont pour ancêtre une algue verte. D'après la phylogénie nucléaire des eucaryotes, les algues vertes et rouges partagent un ancêtre commun. Les algues brunes résultent d'une endosymbiose secondaire impliquant une algue rouge, à l'origine du plaste des algues brunes. Les trois grandes lignées de macro-algues sont donc le résultat d'une histoire évolutive très complexe. Il existe trois grands groupes ou « lignées » de macro-algues que sont les Chlorophytes (algues vertes), les Rhodophantae (algues rouges) et les Phéophyceae (algues brunes), (voir figure ci-dessous).

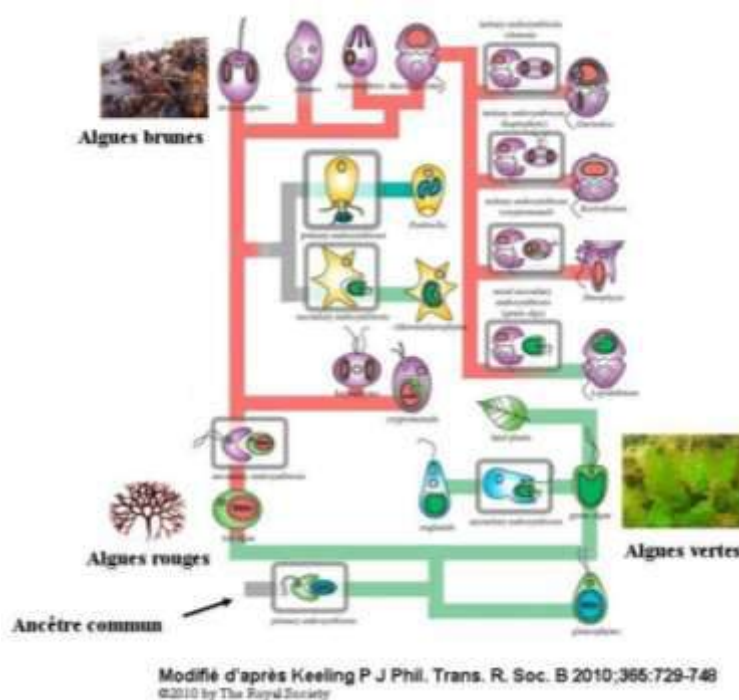


Figure 32 : Schéma de l'évolution des lignées eucaryotes photosynthétiques.
(Source : P. Keeling, 2010 Phil. Trans. R. Soc. B 365, 729-748)

Aujourd'hui, on répertorie à notre connaissance environ 1 800 espèces de macro-algues brunes, autour de 6 000 espèces de macro-algues rouges et approximativement 1 200 espèces de macro-algues vertes. Les macro-algues sont donc composées d'un très large éventail d'organismes distincts des plantes terrestres (Embryophytes) et possèdent une gamme très large de métabolismes qui peuvent se révéler rares ou même absents chez les animaux, les végétaux, les champignons ou les microorganismes. Ce sont donc des ressources biologiques aussi précieuses qu'encore relativement inexplorées.

2. Biologie, mode de vie et reproduction

Les macro-algues sont des composants essentiels des écosystèmes côtiers, riches d'une très grande diversité génétique et pouvant occuper des milieux très diversifiés. Elles peuvent parfois constituer des couvertures denses et étendues, on parle par exemple de « forêts » de laminaires qui constituent des écosystèmes particulièrement riches et productifs.

Ces organismes se caractérisent en outre par des cycles de reproduction très divers et complexes à maîtriser. Au cours de ces cycles de reproduction, différents stades se succèdent, les gamétophytes haploïdes et les sporophytes diploïdes. On trouve ainsi des espèces de macro-algues présentant des phases haploïdes et diploïdes qui peuvent être très distinctes et bien différenciées sur le plan morphologique, avec des phases macroscopiques pouvant atteindre plusieurs mètres de long et des phases microscopiques libres, de quelques cellules seulement. Pour compliquer un peu les choses, ces cycles comportent souvent des boucles de parthénogénèse et parfois il existe des voies de reproduction asexuée via le développement de spores mitotiques ou méiotiques.

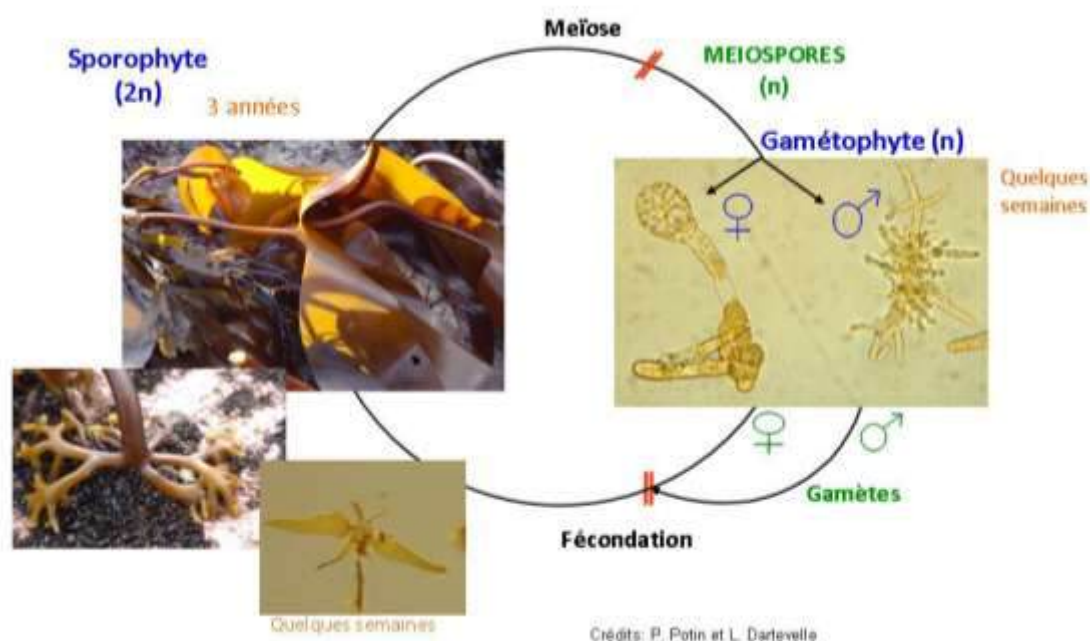


Figure 33 : Le cycle de reproduction de l'algue brune *Laminaria digitata*.
(Source : CNRS – SB Roscoff)

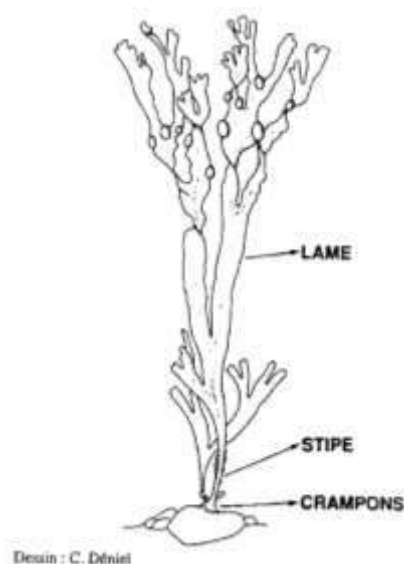
La présence d'un substrat (lieu d'ancrage) est très importante pour la croissance de la biomasse algale, qu'il soit naturel ou artificiel. Dans leur milieu naturel, les macro-algues se développent sur des substrats rocheux. Elles forment une végétation stable, multicouche et vivace capturant la quasi-totalité des photons disponibles. Les algues des côtes rocheuses sont fixées par des crampons robustes aux rochers ou aux galets jusqu'à une profondeur de 50 à 75 mètres, mais elles se raréfient très rapidement avec la profondeur au-delà de 30 mètres, les radiations utiles à la photosynthèse étant absorbées par l'eau de mer. C'est parmi ces algues que l'on trouve les espèces géantes comme les laminaires ou les « kelps » avec des longueurs pouvant atteindre 50 mètres en fonction des espèces et des endroits.

Comme pour tout végétal chlorophyllien, la photosynthèse permet de fixer le carbone atmosphérique ou dissous dans l'eau à partir de l'énergie lumineuse pour produire de la biomasse. Les algues utilisent différents pigments chlorophylliens leur permettant de capter des photons de diverses longueurs d'onde.

3. Composition biochimique

La composition biochimique des macro-algues est très variable selon les espèces, la saison, les conditions de croissance, de stress... On note cependant que la plupart des composés bioactifs décrits à ce jour sont issus des algues brunes et des algues rouges, tandis que les algues vertes constituent un champ d'investigation comparativement peu exploré. L'intérêt pour les macro-algues peut s'expliquer en grande partie par la présence conjointe de trois grandes catégories de composants (fibres, minéraux et protéines), mais également par les métabolites présentant des propriétés antioxydantes et anti-radicalaires tels que caroténoïdes, polyphénols, vitamines ou acides gras polyinsaturés.

Une particularité liée à l'origine marine de ces grandes algues c'est leur richesse en minéraux et oligo-éléments. Les algues puisent de la mer une richesse exceptionnelle en minéraux (jusqu'à 40% de leur masse sèche pour les algues brunes). La diversité des éléments représentés est grande : macroéléments comme le sodium, calcium, magnésium, potassium, chlore, soufre, phosphore, mais également oligo-éléments tels que l'iode, le fer, le zinc, le cuivre, le sélénium, le molybdène, ainsi que bien d'autres oligo-éléments comme le fluor, le brome, le manganèse, le bore, le nickel, le cobalt. Il est important de noter que la richesse des macro-algues en iode est exceptionnelle, en particulier les laminaires (algues brunes) et les gracilaires (algues rouges) pouvant contenir de l'iode jusqu'à 10 000mg/kg.



Dessin : C. Déniel

Figure 34 : Représentation schématique d'une macro-algue brune de type fucale. (Source : CEVA d'après C. Déniel)

La richesse en protéines varie en fonction des espèces. Si les algues brunes disposent d'un contenu protéique restreint (5-11% de la matière sèche), il en va autrement des algues rouges dont certaines possèdent une fraction protéique importante (30-40% de la matière sèche). Les algues vertes, actuellement peu valorisées, présentent également un contenu protéique non négligeable puisque ce dernier peut atteindre 20% de la matière sèche. Dans des conditions de milieux particulièrement riches en azote (nitrate, urée ou ammoniacque), le contenu en protéines des algues vertes peut même augmenter jusqu'à 40% de la matière sèche. Parmi les protéines des algues, il faut citer la présence chez les algues de molécules particulières : les phycobiliprotéines, principaux pigments des algues faisant partie du système de collecte de l'énergie lumineuse. Elles possèdent par ailleurs des propriétés antioxydantes.

La teneur en lipides des macro-algues à leur stade adulte est très faible : de 1 à 5% de la matière sèche. Lorsque les macro-algues sont maintenues à l'état de gamétophytes, alors leur teneur en lipides atteint plusieurs dizaines de pourcent, comparable aux teneurs rencontrées dans le

phytoplancton (micro-algues). Du point de vue qualitatif, les lipides algaux présentent une proportion en acides gras essentiels importante : les algues rouges contiennent des taux élevés d'acide gras polyinsaturés. L'acide gras oméga-3 EPA constitue 50% des acides gras polyinsaturés chez les algues rouges *Porphyra sp.* et *Palmaria palmata*. Les grandes algues possèdent, en outre, des teneurs moyennes en stérols du même ordre de grandeur que pour les végétaux terrestres, de 0,1 à 0,5% du poids sec. Elles contiennent aussi des caroténoïdes particuliers et uniques, comme la fucoxanthine qui possède des propriétés antioxydantes très recherchées.

La composition vitaminique des macro-algues est intéressante, malgré de grandes variations saisonnières et des disparités liées au procédé de traitement des algues. L'ensemble des vitamines est bien représenté avec des teneurs en provitamine A intéressantes dans les algues rouges, en vitamine C dans les algues brunes et vertes et vitamine E dans les algues brunes. On note la présence de vitamine B12, dont les teneurs sont assez importantes dans les algues, contrairement aux plantes terrestres qui en sont totalement dépourvues.



Figure 35 : Diverses espèces de macro-algues
(Source : Stéphane La Barre, CNRS, Roscoff)

La plupart des macro-algues marines contiennent des polyphénols algaux aussi appelés phlorotannins. Les phlorotannins constituent un groupe très hétérogène de molécules (structure et degrés de polymérisation) fournissant ainsi une grande variété d'activités biologiques potentielles. Les teneurs les plus élevées sont retrouvées dans les algues brunes qui contiennent entre 5 et 20% du poids sec. L'activité anti-oxydante d'extraits de polyphénols d'algues brunes et rouges a été mise en évidence.

Les caroténoïdes algaux sont également de puissants antioxydants, ils représentent en moyenne 0,1% du poids sec de l'algue mais certaines espèces, dans certaines conditions environnementales en produisent beaucoup plus. Les algues brunes sont particulièrement riches en caroténoïdes et notamment en fucoxanthine, β -carotène et violaxanthine. Les principaux caroténoïdes des algues rouges sont le β -carotène, l' α -carotène et leurs dérivés dihydroxylés : zéaxanthine et lutéine. La composition en caroténoïdes des algues vertes reste voisine des végétaux supérieurs.

Enfin le dernier, mais pas le moindre, le fort intérêt des macro-algues réside non seulement dans leur richesse en polysaccharides classiques, comme ceux trouvés dans des plantes supérieures (amidon, cellulose), mais surtout dans leur richesse en polysaccharides très particuliers : les phycocolloïdes (18 à 45% de la masse sèche chez les algues brunes). Ces polysaccharides non digestibles ont la particularité d'être présents uniquement dans les algues, on ne les trouve pas dans les plantes terrestres. Ce groupe de polymères comprend les alginates, les carraghénanes, les agars, pour les plus utilisés et d'autres comme les xylanes, les fucanes, les laminaranes et les ulvanes. Situés dans la paroi cellulaire ou bien dans le cytoplasme des cellules, ils ont un rôle de structure (constituants de la paroi) ou de stockage. Une caractéristique des algues marines est

l'abondance des polysaccharides sulfatés dans leur paroi cellulaire. Les hydrocolloïdes constituent, à ce jour, les principaux produits industriels dérivés des macro-algues.

Le schéma de la figure 36 présente une classification des différents composés présents dans les différentes familles de macro-algues.

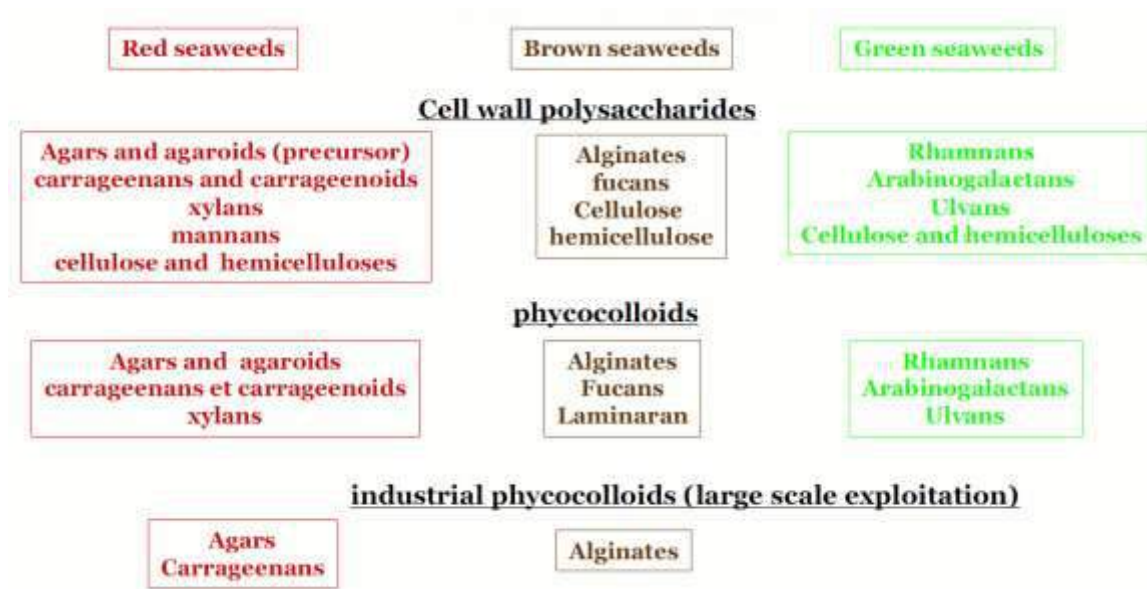


Figure 36 : Principaux colloïdes présents dans chaque famille d'espèce.
(Source : CEVA)

Une brève présentation des principaux colloïdes industriels est faite ci-dessous :

Les alginates sont des polysaccharides obtenus à partir d'algues brunes, majoritairement les laminaires, mais aussi certaines fucales comme *Himanthalia elongata* et *Ascophyllum nodosum*. Découverts par Stanford en 1881 grâce aux développements industriels de production d'iode à partir d'algues brunes, la production industrielle des alginates a débuté dans les années 1930 au Royaume Uni et aux USA. Ce sont des polymères de la paroi cellulaire d'une grande variété d'espèces d'algues brunes, en particulier des espèces de *Laminaria*, *Ascophyllum* et *Macrocystis*. Constituants majoritaires des algues (teneur de 15 à 45% du poids sec), ils y jouent un rôle structural. En effet, ils interviennent dans le maintien et la résistance mécanique, l'adhésion cellulaire et tissulaire, la morphogénèse et le développement, le maintien de l'hydratation et la protection.

Ce sont des polymères composés d'un enchaînement de deux acides hexuroniques : les monomères d'acide β -D-mannuronique et d'acide α -L-guluronique. Sa composition chimique varie selon les diverses espèces d'algues, les différentes parties de la même plante et est sujette aux changements saisonniers. Néanmoins par sélection de matières premières aux différentes propriétés, il est possible de fabriquer une variété d'alginate aux caractéristiques constantes. Ils présentent la caractéristique de ne jamais être sulfatés et possèdent une faible polarité.

Les alginates présentent des propriétés techniques diverses : texturants polyvalents, épaississants, agents gélifiants, stabilisants, cryo-protecteurs (pour les aliments surgelés), films comestibles. Les propriétés gélifiantes varient en fonction du mode de réticulation, teneur et enchaînement des monomères d'acides hexuroniques. Les blocs homopolymères

polyguluroniques ont une conformation qui se prête mieux à la gélification en présence de calcium. Les gels d'alginate de calcium sont durs et thermostables. Utilisés comme additifs alimentaires (E400 à E405), les alginates permettent la reconstruction des aliments, en particulier les fruits. Les gels d'acide alginique sont doux, élastiques et fusibles, ils peuvent substituer la gélatine.

Les alginates alcalins forment dans l'eau des solutions colloïdales visqueuses tandis que l'alginate de calcium est insoluble comme l'acide alginique lui-même. L'alginate de sodium est très soluble dans l'eau, l'alginate de calcium est seulement soluble en milieu basique.

Les alginates sont aussi transformés par l'industrie chimique en hydroxypropyl-alginates (encore appelés propylèneglycol-alginates, ou PGA), qui servent d'émulsifiants et de stabilisants d'émulsions huile dans eau, en particulier dans les sauces et vinaigrettes prêtes à l'emploi.

Les carraghénanes sont des polysaccharides extraits des algues rouges. Originaires d'un comté du Sud de l'Irlande appelé Carragheen, la « mousse d'Irlande », une algue rouge nommée *Chondrus crispus*, servait, alors, pour faire des pommades et des flans. Vers 1700, au cours de la colonisation de l'Amérique du Nord, les Irlandais constatèrent que leur mousse d'Irlande poussait également sur les côtes du Massachusetts. L'intérêt économique et l'abondance de l'algue a éveillé l'intérêt des industriels. Ainsi en 1871, le polysaccharide pur, à l'origine des vertus de la « mousse d'Irlande », est extrait aux Etats-Unis. Il est logiquement appelé carraghénane en référence à son comté d'origine.

Les premiers travaux sérieux faits sur ces polymères datent de 1928, un brevet datant de cette période expose le mode d'extraction. Après la Seconde Guerre Mondiale, l'expansion de l'industrie alimentaire a engendré une utilisation accrue des carraghénanes en tant que stabilisateurs, épaississants et gélifiants. Mais la véritable industrie des carraghénanes prend son essor vers 1960, lors du recul du Japon sur le marché des agars.

Extraits avec de l'eau chaude des parois cellulaires des algues rouges, les carraghénanes sont des polymères à chaînes linéaires ayant tous pour monomère le galactose plus ou moins sulfaté. En ajoutant à un extrait de *Chondrus crispus* du chlorure de potassium (KCl), Smith et Cook ont démontré qu'il existe au moins deux types de carraghénanes :

- une fraction soluble en présence de KCl, ne donnant jamais de gel, qu'ils ont nommé lambda-carraghénane,
- une fraction insoluble à froid en présence de KCl, soluble à chaud, et donnant en refroidissant un gel doux agréable au palais : le kappa-carraghénane.

Les travaux dans ce domaine ont permis d'identifier un troisième type de carraghénane, l'iota-carraghénane, agissant comme le kappa-carraghénane, mais donnant des gels plus élastiques. Ces différents carraghénanes diffèrent principalement par leur degré de sulfatation. Chaque espèce d'algues carraghénophyte se caractérise par sa teneur en carraghénanes qui varie au cours de l'année entre 15 et 60% de la masse de l'algue et par la nature des fractions kappa, lambda ou iota qu'elle contient. Ainsi par exemple :

- *Kappaphycus alvarezii* (le « cottonii » du commerce) fournit un extrait de type kappa,
- *Eucheuma denticulatum* (« spinosum » dans le commerce) un extrait de type iota,
- *Gigartina ascicularis*, un extrait de type lambda.

Certains peuvent contenir plusieurs types à la fois. *Chondrus crispus* libère en même temps du lambda, du kappa et du iota.

Les carraghénanes possèdent une réactivité liée à l'abondance des groupements hydrophiles « OSO_3^{2-} » (teneur très élevée : 20 à 25%) et des ponts hydrophobes $\text{CH}_2\text{-O}$ de l'anhydrogalactose. Plus il y a de groupements sulfate et plus la molécule est soluble. Par contre la présence des ponts hydrophobes, diminue la solubilité et augmente la rigidité. Si les carraghénanes sont solubles dans l'eau, ils ne le sont pas dans les solvants organiques apolaires et dans la plupart des solvants organiques polaires, sauf en présence de tensioactifs de charge cationique. Le lambda carraghénane dilué dans une solution aqueuse, même à froid, élève la viscosité de celle-ci (épaississant), mais ne provoque jamais de gel. L'Iota et le Kappa sont, quant à eux, des gélifiants. L'Iota conduit à des gels doux et élastiques, tandis que le Kappa donne des gels durs. Cependant, ces derniers ont des propriétés épaississantes s'ils sont dissous dans l'eau chaude. En effet, insolubles dans l'eau froide, ils se comportent comme des épaississants après avoir été dissous dans de l'eau chaude tant que la température reste élevée. Les Iota et Lambda carraghénanes ont une bonne stabilité lors de la congélation / décongélation et ont une bonne tolérance au sel, contrairement au Kappa.

Le pouvoir gélifiant des carraghénanes est grandement influencé par la présence d'électrolytes, qui sont nécessaires pour permettre cette gélification. Les sels de potassium (K^+) sont les plus réactifs et de ce fait les plus utilisés. La densité du gel de Kappa carraghénanes augmente en fonction des concentrations de K^+ . Ainsi, plus la concentration en K^+ est élevée, plus le gel est dense. Les ions K^+ augmentent également les températures de fusion et de formation du gel. Les ions calcium (Ca^{2+}) ont également une influence sur le pouvoir gélifiant des carraghénanes, mais leur effet est plus marqué pour la fraction Iota avec laquelle ils forment un gel très élastique et cohérent. Il existe aussi une interaction spécifique entre les carraghénanes et la kappa-caséine du lait, qui conduit à une formation de gel à l'origine de l'utilisation traditionnelle et industrielle des carraghénanes dans l'industrie laitière.

Les carraghénanes servent d'agents épaississant, de gélifiant, de stabilisant d'émulsion ou de suspensions dans l'industrie. Ils sont utilisés en particulier dans l'alimentation, le textile, les cosmétiques (dentifrices, shampooings, rouges à lèvres) et l'industrie pharmaceutique. Les carraghénanes permettent de former des gels à chaud (jusqu'à 60 °C) et présentent donc un intérêt par rapport aux gélatines animales traditionnelles.

Les agars furent découverts en Asie il y a plusieurs siècles. Agar est un mot d'origine indonésienne-malaise signifiant « algue ». L'extrait naturel d'agar-agar, issu de la paroi cellulaire de certaines espèces d'algues rouges (rhodophycées), se compose de deux polysaccharides : l'agarose et l'agaropectine. L'agarose est un homopolymère neutre d'agarobioses, unité disaccharidique constituée d'un D-galactose d'un 3,6-anhydro-L-galactopyranose. L'agaropectine contient à la fois des unités d'agarobiose pures et des unités d'agarobiose substituées par des groupes sulfates, méthyl, pyruvate... La qualité des agars dépend de la teneur en agarose. Plus elle est élevée et meilleurs seront les gels.

Les gels d'agarose présentent des propriétés uniques, une force élevée, ne nécessitant pas d'ajout de liants transversaux, thermoréversibles et thermostables (température de gélification comprise entre 32 et 43°C, température de fusion à 70°C), stable face au pH, micro-organismes et cations, une capacité de rétention d'eau élevée, et une capacité à piéger les composés hydrophobes.

Comme les carraghénanes, les agars sont extraits avec de l'eau chaude. Les genres *Gracilaria* et *Gelidium* approvisionnent la plupart des matières premières pour la production d'agar. Les agars sont utilisés comme stabilisants des émulsions et des suspensions et comme agents gélifiants. Environ 90% de la gélose d'agar est produite pour des applications alimentaires et les 10% restants, plus raffinés, sont utilisés pour d'autres utilisations biotechnologiques.

Les Ulvanes sont des polysaccharides anioniques sulfatés et carboxylés solubles dans l'eau extraits de la paroi d'algues vertes appartenant à la famille des Ulvales, en particulier *Ulva spp.* et par extension *Enteromorpha spp.*. Ils peuvent être extraits, avec de l'eau contenant un chélateur de cations, des parois cellulaires des algues vertes. Une teneur de 8 à 29% du poids sec d'algues a été rapportée. Les sucres entrant dans la composition des ulvanes sont majoritairement le L-rhamnose sulfaté en position 3, l'acide D-glucuronique et l'acide L-iduronique, et minoritairement le D-galactose, le D-glucose et le D-xylose. Les ulvanes constituent le seul exemple connu d'occurrence de l'acide L-iduronique dans le règne végétal. Cet acide uronique se retrouve notamment dans les glycosaminoglycanes (GAGs) tels que l'héparine, le dermatan sulfate ou l'héparan sulfate, exprimés à la surface des cellules de mammifères.

Jusqu'à présent, les ulvanes ne sont pas disponibles dans le commerce. Il a été récemment proposé que les ulvanes pourraient être :

- une source de précurseurs de sucres rares pour la synthèse de produits chimiques fins,
- une source d'oligosaccharides qui pourrait être utilisée comme produit phytopharmaceutique ou cosmétique,
- un agent texturant pour la viscosation de formulations ou la conception de gels thermoréversibles avec des textures contrôlées avec précision.

Les Fucoïdanes sont des polysaccharides sulfatés contenus dans les parois cellulaires des algues brunes. Ils agissent sur la régulation de l'hydratation et du stress osmotique au sein des cellules algales. Composés principalement d'une répétition d'unités de fucoses sulfatés, ils peuvent aussi contenir d'autres sucres neutres et de l'acide uronique éventuellement acétylé. Ils présentent une teneur allant de 3 à 30% du poids sec de l'algue. Les fucoïdanes peuvent être un coproduit potentiel de l'extraction des alginates.

C. Production et récolte de la biomasse

Dans la dernière décennie, la filière "**macro-algues marines**" a connu une nouvelle phase d'expansion à l'échelle mondiale. Grâce à la disponibilité immédiate de biomasse importante, les algues marines suscitent de plus en plus d'intérêt pour leurs applications multiples à des fins alimentaires, cosmétiques ou agricoles, mais également à des fins énergétiques. La production mondiale est à 75% destinée à l'alimentation humaine en tant que "*algue légume*", alors qu'en

France la plupart des algues récoltées ou importées sont traitées dans des usines d'extraction pour la fabrication de colloïdes (alginates, carraghénanes agarose : gélifiants, et texturants pour les industries alimentaires ou spécifiques...).

Dans le monde, 15,74 millions de tonnes (Mt) d'algues fraîches ont été produites en 2008. En Europe, l'industrie des macro-algues est essentiellement basée sur la récolte d'algues prélevées dans les populations naturelles, puisque la culture d'algues ne représente que 0,3% des volumes utilisés. **La France fait partie des premiers producteurs d'algues** en Europe grâce à la région Bretagne, où la récolte des algues est à la base d'une filière économique spécifique qui regroupe la quasi-totalité des récoltes d'algues françaises et des entreprises de transformation de ces algues. En 2010, selon les données de FranceAgriMer, la France a importé environ 18 000 tonnes d'algues (comprenant algue fraîche, carraghénanes et agars - gélifiant obtenu à partir d'algues rouges – et acide alginique frais : polysaccharide issu d'algues brunes) et en a exporté 7 500 tonnes. La production propre s'élève à environ 60 000 tonnes par an.

Concernant la transformation des algues, selon les données commandées à la CCI de Brest par la Chambre Syndicale des Algues et des végétaux Marins (CSVAM), 67 établissements bretons fabriquent ou commercialisent des produits à partir d'algues et de végétaux marins, ce qui représente 1 635 emplois (hors agro-alimentaire) avec un chiffre d'affaire total évalué à 424 millions € en 2007.

Au niveau de la production, les différences sont très marquées entre les pays asiatiques et les pays occidentaux. En effet, pour produire leurs algues, les pays asiatiques se sont tournés très vite dans l'histoire vers l'aquaculture et plus précisément l'algoculture, qui est ici le terme pour désigner la culture d'algues. On pense ainsi que les Japonais cultivaient déjà les algues aux 5^{ème} et 6^{ème} siècles (ex : *Laminaria japonica*), car de nombreuses gravures représentent cette activité. Les algues du genre *Porphyra*, utilisées dans la confection des makis ou des sushis, ont commencé à être cultivées dès le 18^{ème} siècle. Aujourd'hui, la quasi-totalité des algues produites en Asie, l'est par le biais de la culture, via notamment des fermes, disposant d'espace conséquent en mer. La culture de *Laminaria japonica* est, à ce jour, la plus importante avec 4,2 Mt cultivées principalement en Chine. Environ 200 espèces d'algues sont utilisées à travers le monde, et une dizaine sont cultivées de façon importante, tels que les algues brunes *Saccharina (Laminaria) japonica* et *Undaria pinnatifida*, les algues rouges *Porphyra*, *Eucheuma*, *Kappaphycus* et *Gracilaria*, et les algues vertes *Monostroma* et *Ulva*.

Les technologies de culture ont peu évolué en Asie au cours des dernières décennies et les nouveaux besoins de biomasse au niveau mondial ont amené un regain d'investissement dans les recherches d'innovations dans le domaine des cultures d'algues, notamment adaptées à de nouveaux modèles économiques.

1. La récolte des algues dans les populations naturelles et en échouages

La récolte des algues marines en France se localise pour l'essentiel en Bretagne et se réalise en bateau (pêche embarquée) ou à pied (récolte d'algues de rive). Les algues marines ainsi récoltées sont transformées ou commercialisées à des fins alimentaires, cosmétiques ou agricoles.

La pêche embarquée des laminaires

Les **laminaires** sont pêchées en bateau à l'aide d'embarcations spécialisées. *Laminaria digitata* (voir photo ci-après) est la principale espèce utilisée en France dans la fabrication des alginates et est récoltée par une flottille d'environ trente navires équipés de bras hydraulique manipulant un crochet baptisé *scoubidou* (de 40 000 à 60 000 t/an pour un chiffre d'affaire de 1,7 à 2,7 M€). La mise au point de cet outil par un goémonier et sa mécanisation en collaboration avec l'Institut des Pêches (IFREMER aujourd'hui) en 1971 a révolutionné la récolte. Le scoubidou, une fois immergé pour la pêche des algues, tourne dans un sens, ce qui permet l'enroulement et l'arrachage des algues dans le fond. Le scoubidou (et ses algues) est ensuite dirigé au dessus du pont du bateau. À ce moment, il suffit d'inverser le sens de rotation du crochet pour faire tomber les algues sur le pont. Cette algue se situe à un niveau peu profond (jusqu'à 5 mètres en dessous des basses mers), et supporte donc des fluctuations naturelles. Elle fait l'objet d'une exploitation stable en tonnage débarqué. Actuellement, environ 35 licences permettent aux goémoniers de récolter ces algues. Cette activité est saisonnière et très réglementée et se pratique du début du mois de mai à courant octobre.



Figure 37 : la pêche embarquée de laminaires à l'aide du scoubidou.
(Source : CEVA)

L'exploitation de *Laminaria hyperborea* par les navires goémoniers en Bretagne est relativement récente. C'est au début des années 90 que les premiers projets de récolte mécanisée sont envisagés. Auparavant, seules les algues échouées étaient récoltées. En 1994, l'Ifremer a encadré les premiers essais de pêche en utilisant une technique importée de Norvège, où cette espèce est exploitée pour une production de plus de 100 000 tonnes à partir des populations naturelles. Aujourd'hui, grâce à un « peigne norvégien » modifié pour les fonds bretons, près de 12 000 tonnes sont extraites chaque année et la récolte s'étale sur l'année tout en étant très tributaire des conditions météorologiques.

Au niveau de la production, ces laminaires bretonnes subissent des variations en termes de qualité, et les quantités prélevables dans le milieu naturel sont limitées. Cette exploitation s'opère essentiellement dans des zones protégées au niveau environnemental (parcs marins et zones Natura 2000) et fait donc l'objet de la mise en place de plan de gestion durable de la ressource et de conservation de la biodiversité et des services écosystémiques associés.

De plus, l'exploitation des algues pose un certain nombre de problèmes en raison de l'augmentation de conflits d'usages sur les concessions maritimes. L'idée de la co-culture bivalves/algues décrite plus loin trouve alors tout son sens.

En conclusion, pour un développement de la filière avec augmentation des quantités d'algues récoltées en France, il est essentiel de mettre en place une aquaculture gérée avec un suivi

organisé régulièrement pour évaluer l'évolution du peuplement algal et évaluer l'impact sur l'environnement marin.

Les récoltes des algues de rive

Les **fucales (ou goémon noir) et algues alimentaires diverses** sont récoltées à pied sur l'estran par des récoltants professionnels ou occasionnels. On estime un nombre d'environ **50** récoltants professionnels travaillant sous statut ENIM (Etablissement National des Invalides de la Marine) ou MSA (Mutuelle Sociale Agricole) et **300** récoltants occasionnels travaillant avec le statut TESA (Titre Emploi Simplifié Agricole) en 2010 (alors qu'il y a 10 ans, on comptait jusqu'à 1000 récoltants).



Figure 38 : Récolte des algues à la faucille
(Source : CEVA)

En Bretagne, le goémon noir de rive se récolte toujours à la faucille à la marée descendante : le goémonier saisit la touffe d'algues à la main et la sectionne à la base avec sa faucille. Pour préserver les capacités de reconstitution des stocks, la hauteur de coupe est réglementée à 20 centimètres de la base des thalles pour l'espèce *Ascophyllum nodosum*, une des principales cibles pour alimenter les industries des extraits d'algues pour l'agriculture ou pour les farines. Cette collecte s'est mécanisée au

cours du temps, en Norvège en Islande ou sur la côte Est du Canada car les fonds marins sont très bien adaptés à l'utilisation de bateaux "faucardeurs". Cependant sur les côtes françaises ou irlandaises, cette mécanisation n'a pas pu se développer.

Les algues alimentaires diverses sont collectées à la main et fournissent 12 espèces, qui sont aujourd'hui autorisées à la consommation par le ministère de la santé, pour les entreprises de transformation d'algues destinées à l'industrie alimentaire. Dans certaines régions en Normandie et dans le Finistère-Nord, ces mêmes espèces sont récoltées comme fourrage pour les quelques élevages d'ormeaux qui se sont récemment développés. En termes d'évaluation des impacts de l'exploitation de ces nouvelles espèces sur les écosystèmes, on manque encore d'outils efficaces et d'un véritable suivi des prélèvements.

Ramassages d'échouages

Le ramassage d'échouages naturels est un autre mode possible pour la collecte de biomasse macro-algale qui peut être considéré comme un mode de gestion durable de l'exploitation de peuplements algaux sauvages. Historiquement pratiqué sur les côtes bretonnes pour la collecte du « goémon épave » utilisé pour le brûlage dans l'industrie du verre au 17^{ème} et 18^{ème}, puis celle de l'iode au 19^{ème} et première



Figure 39 : Ramassage d'algues vertes échouées.
(Source : CEVA)

moitié du 20^{ème} siècle, ce mode de collecte ne s'est maintenu que ponctuellement pour les besoins de l'agriculture littorale ou pour des demandes particulières de récolte de stipes de *Laminaria hyperborea* pour les industriels des alginates. Ce mode de récolte représente toujours aujourd'hui, le mode d'exploitation principal des populations naturelles de *Macrocystis pyrifera* et de *Lessonia* spp. (48% pour *L. nigrescens*, 11% pour *L. trabeculata* au Chili), le long de milliers de kilomètres des côtes nord chiliennes et sud péruviennes pour des tonnages dépassant 100 000 tonnes d'algues sèches. La côte y est continue et soumise au courant de Humboldt qui se dirige vers le Nord, rafraîchissant l'eau de surface. Les algues sont mises à sécher sur la plage, puis envoyées dans des usines de broyage ou directement envoyées à l'exportation. Ces modes d'exploitation sont très contraignants et dépendants du caractère aléatoire des échouages, ils se pratiquent majoritairement par des communautés littorales de pêcheurs ou par des populations très pauvres qui se rendent disponibles dès que les échouages sont exploitables pour préserver la qualité de la ressource.

Au Pays Basque, sur les grandes plages d'Hendaye notamment, comme en témoigne la photo ci-contre, des algues rouges sont aussi récoltées en échouages à l'aide de bulldozers ou entre deux eaux par des bateaux tous deux équipés de filets. Cette biomasse majoritairement composée de l'espèce *Gelidium sesquipedale* procure une matière première d'excellente qualité pour l'extraction de l'agarose, le phycocolloïde le plus cher sur le marché, dans une usine basque.



Figure 40 : la pêche de *Gelidium* sp. à Hendaye au Pays Basque.
(Source : anonyme)

Lors des dernières décennies, les conséquences de l'eutrophisation littorale causée par les fuites massives d'azote de l'agriculture terrestre sont apparues. Certains endroits au sein de l'environnement littoral sont enrichis en nutriments et des espèces d'algues sont capables de profiter de cet environnement pour proliférer de façon disproportionnée. La collecte des échouages et des algues en flottaison permet de diminuer les impacts néfastes de la prolifération sur les écosystèmes. À titre d'exemple, 50 000 à 90 000 tonnes d'algues vertes du genre *Ulva* échouées sont ramassées chaque année sur les plages en Bretagne, et ces quantités



Figure 41 : Marée verte, échouage d'algues sur la plage.
(Source : CEVA)

ne correspondent qu'à la partie émergée de l'iceberg. Ces algues sont retirées des plages pour éviter que ces échouages ne créent des nuisances gênant l'activité touristique, voire des risques de santé publique en cas de putréfaction avancée. On estime le stock (la quantité) d'algues en mer à 5 à 6 fois plus important que les échouages, avec une capacité de régénération très rapide (restauration des stocks en quelques jours dans des conditions favorables à la croissance). À ce jour, cette matière première est peu exploitée et faiblement

valorisée. Les échouages ramassés sont épandus sur des terres agricoles directement après ramassage, ou transformés en amendement organique (co-compostage) pour être ensuite épandus de façon différée. Aujourd'hui un des problèmes majeurs à ce système de production/récolte reste la logistique et les outils de ramassage utilisés qui demanderaient à être quelque peu développés, pour faire face en particulier à des proliférations et des échouages massifs. Il serait nécessaire de mettre en place et d'organiser une filière de ramassage, de stabilisation et d'utilisation de ces algues.

Plusieurs bémols sont cependant mis à ce type de production. La variabilité des échouages et la présence de ces algues directement reliée à un dérèglement environnemental ne permettent pas de pouvoir compter sur une exploitation pérenne de ces ressources. Dans ce cas, il n'est pas envisageable de construire une vraie activité industrielle, mais plutôt d'adopter une démarche opportuniste en fonction des quantités disponibles.

2. Cultures d'algues dans le monde et en France

Au niveau mondial, les algues cultivées représentent en 2008 une production de plus de 14 millions de tonnes fraîches contre seulement un million de tonnes d'algues sauvages récoltées. Les algues sont principalement produites dans les pays asiatiques comme la Chine, les Philippines, la Corée du Nord et du Sud, le Japon et l'Indonésie, et en Afrique de l'est au Zanzibar. Les États-Unis, le Canada et les pays européens comme la France, le Royaume Uni (Écosse ; Pays de Galles ; Irlande du Nord), l'Irlande, l'Allemagne, la Norvège, le Danemark et les Pays-Bas cherchent à établir à grande échelle la culture d'algues.

Il est possible de cultiver les macro-algues avec des méthodes différentes, cela va dépendre des espèces que l'on va cibler. Certaines algues présentant un cycle de reproduction assez simple, en particulier celles associées aux algues proliférantes, sont favorables à un mode de culture en bassins ou lagunes, sans utilisation d'infrastructures de fixation. Ces algues associées aux grandes marées vertes se reproduisent principalement par mode végétatif, en flottaison libre dans la colonne d'eau, par fragmentation d'un individu. La culture par bouturage se pratique aussi à l'échelle industrielle pour les agarophytes telles que *Gracilaria sp.* au Chili et en Asie, et *Asparogopsis Armata*, algue cultivée sur l'île d'Ouessant pour les cosmétiques.



Laminaires : 20 – 85 t/ha/an

Figure 42 : la culture d'algues en Chine.
(Source : CEVA)

L'exploitation de grandes espèces nobles comme les algues brunes ou certaines algues rouges nécessite quant à elle le passage préalable par des stades de culture en éclosérie à l'état microscopique pour préparer des « semences », qui croissent fixées sur des cordelettes jusqu'au stade de plantules, avant d'être acclimatées au milieu marin ouvert et développent des individus adultes qui pousseront sur différents dispositifs supports (cordes ou filets). Ces méthodes nécessitent de bien connaître et maîtriser les différents stades de croissance et les cycles de reproduction des algues. Une méthode de culture végétative est possible en éclosérie, il existe ensuite des méthodes de culture sur lignes, en sacs, ou en poche. La culture la plus couramment effectuée est celle sur cordes décrite et détaillées dans la partie suivante.

Étapes de la culture sur cordes

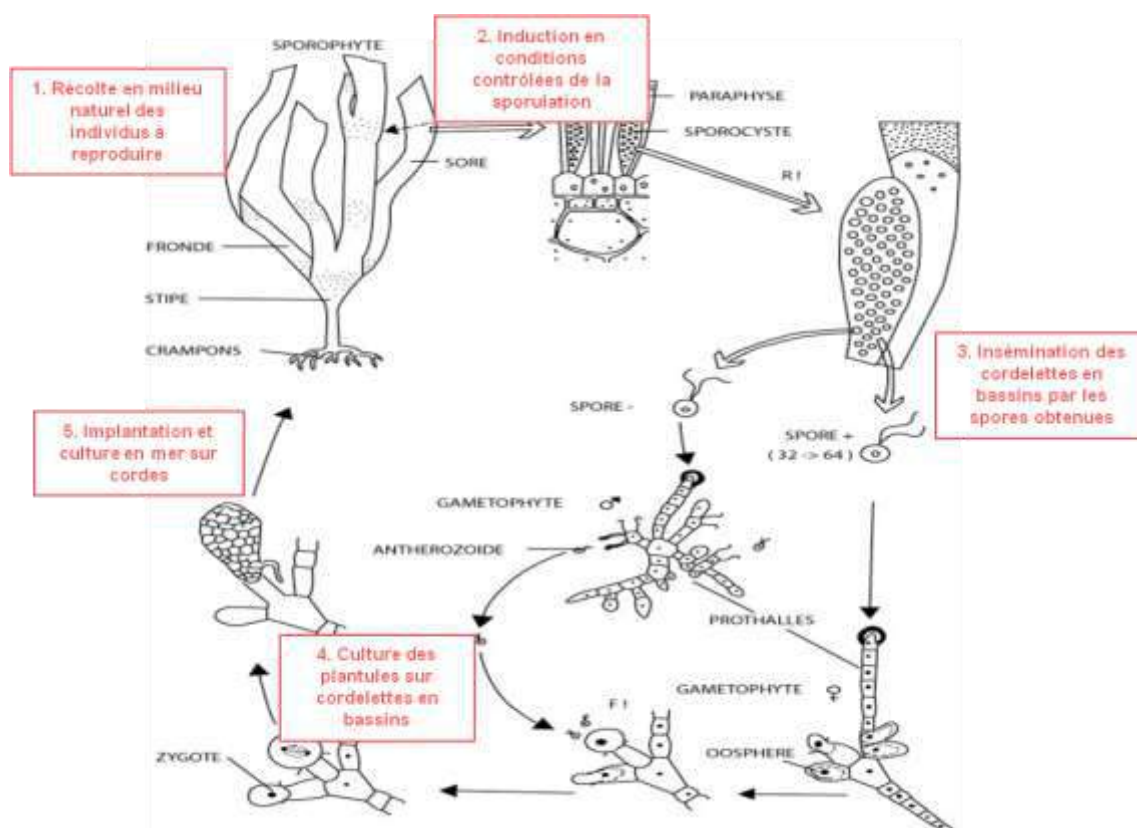


Figure 43 : Schéma des étapes de la culture sur cordes.

(Source : http://www.afd-ld.org/~fdp_bio/content.php?page=cara_plantes&skin=modi
Modifié par Juliette Langlois, doctorante à Montpellier SupAgro)

Tout d'abord, les algues sont récoltées par coupe en milieu naturel. La technique du scoubidou sur bateaux goémoniers peut être utilisée pour la récolte des laminaires. Une fois ramenées au sein d'écloséries, les algues subissent un stress hydrique et/ou thermique et/ou lumineux pour les amener à produire des spores. Ces spores seront ensuite cultivées en ballons ou en photobioréacteurs pour les amener au stade de sporophytes ou de gamétophytes dans une production de masse. Les conditions de cultures sont alors contrôlées : éclaircissement, bullage, températures, nutrition minérale... C'est à cette étape que les individus microscopiques sont mis en présence de cordelettes pour s'y fixer. Certaines espèces de macro-algues utilisent un organe spécifique appelé crampon pour assurer la fixation. Les cordelettes sont ensuite enroulées autour de cordes plus conséquentes dans le but d'être installées en mer pour y être cultivées. La

culture peut se réaliser sur cordes horizontales ou verticales. Ces cordes peuvent être attachées à des points d’ancrage selon diverses méthodes. Elles peuvent être suspendues à des structures qui flottent ou fixées aux fonds marins (pieux, corps morts...). Les mers agitées peuvent toutefois endommager ces structures ou enlever les algues de ces lignes.



Figure 44 : Culture du Wakamé en Bretagne
(Source : Aléor)

Chaque système nécessite une méthode spécifique de récolte de la biomasse, mais le plus souvent un navire spécialement conçu à cet effet est utilisé. Il coupe les algues et les remonte à l’intérieur du navire. Afin de faciliter le transport des algues jusqu’à la terre où elles seront traitées / utilisées, le navire peut disposer à bord d’un filtre presse ou d’un dispositif d’essorage centrifuge permettant de réduire la teneur en eau de la récolte de 90 à 20%.

Le contrôle de la production

L’étape de culture en mer se réalise en milieu naturel ouvert. Aucun apport de fertilisants ou de produits phytosanitaires n’est envisageable en France car leur dissémination ne serait pas contrôlable. On va donc tirer parti des nutriments naturellement présents dans le milieu, et se placer en particulier à proximité d’émissaires naturels (estuaires, fermes piscicoles ou conchylicoles). La quantité de lumière incidente est elle aussi subie. Elle est fonction de la localisation du site de culture : latitude, turbidité de l’eau, profondeur (max 30 mètres), marnage (amplitude des marées). Les facteurs températures, saisonnalité et brassage sont aussi importants et dépendants des climats et de la courantologie.

Plusieurs espèces ayant une gamme d’exigences spécifiques de leur milieu de vie sont particulièrement adaptées à la culture à grande échelle. Ces exigences sont des éléments nutritifs, la salinité, la température, la lumière, la profondeur et les courants. Les facteurs qui affectent la culture comprennent également la prédation, la croissance des plantes épiphytes, les bactéries et virus, et la pollution.

Certaines macro-algues permettent la bioremédiation de nutriments en excès qui peuvent être présents dans le milieu et générer des crises dystrophiques. Il est donc en particulier pertinent d’envisager de réaliser la culture sur des sites eutrophisés. Il est à noter que la matière sèche présente 7 à 8% d’azote et 1% de phosphore.

L'étape de culture en éclosérie exige quant à elle un fort contrôle de la production. Tous les paramètres et conditions de culture doivent être maîtrisés afin de parvenir à l'étape de culture en mer.

La culture d'algues en France

La France possède le savoir-faire, connaît et maîtrise les techniques d'aquaculture de plusieurs espèces de macro-algues. Le CEVA et l'Ifremer ont développé des techniques particulières de culture d'algues dans les années 1990, donnant lieu à des démonstrations de technologies, avec notamment l'espèce *Undaria pinnatifida* comme en témoigne la photo ci-dessous. Ces techniques ont ensuite essaimé dans des micro-entreprises, toutes basées en Bretagne, qui perpétuent la production artisanale de macro-algues de culture pour des applications alimentaires et cosmétiques.

Cependant, bien que la faisabilité technique avait été prouvée, la culture de cette espèce ne s'est pas avérée être rentable à l'époque pour une production de masse. Cela a tout de même permis le développement de petites entreprises. Il existe quelques algoculteurs en Bretagne réalisant la production de faibles volumes pour des marchés à forte valeur ajoutée (alimentaire, cosmétique...). De ce fait, la production d'algues en France est quasi exclusivement issue de la pêche.



Figure 45 : la culture d'*Undaria pinnatifida* effectuée par le CEVA
(Source : CEVA)

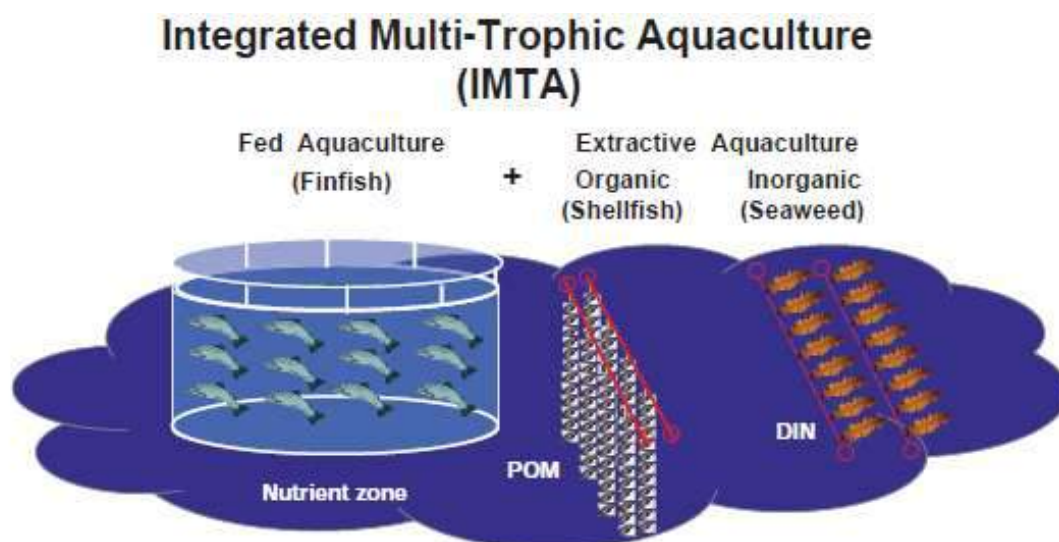
Aujourd'hui, la culture d'algues est de nouveau à l'ordre du jour en France, et de nouvelles entreprises voient le jour dans la culture d'algues. Des essais de co-culture huîtres/algues et moules/algues sont en cours tout au long du littoral breton (projet CHACO). Cette approche permet la valorisation des espaces de concession existants sans impacter sur la production initiale de coquillages (il convient de le souligner).

3. Innovations dans les cultures d'algues

De nouveaux concepts de culture envisagés

Il est à noter l'intérêt grandissant en France pour la co-culture ou le co-élevage d'algues et d'espèces marines (poissons, coquillages ou crevettes). Ce concept existe un peu partout dans le monde, à l'échelle d'expérimentations pilotes ou de fermes aquacoles en exploitation.

Au Mexique par exemple des algues vertes de l'espèce *Ulva clathrata* sont cultivées dans des bassins d'élevage de crevettes. La co-production algues/crevettes permet une amélioration de la qualité sanitaire de l'élevage, une diminution des apports en aliments à iso-grossissement (les crevettes se nourrissant en partie sur les algues) et une meilleure pigmentation des carapaces et de la chair (les algues consommées par les crevettes contiennent des caroténoïdes). En France des essais commencent à peine à voir le jour. Un exemple de concept d'aquaculture multi-trophique intégrée développé au Canada par le français Thierry Chopin, professeur à l'Université du Nouveau-Brunswick, est présenté ci-dessous.



Source: Chopin (2006).

Figure 46 : Diagramme conceptuel d'une opération d'aquaculture multi-trophique intégrée.
(Source : Thierry Chopin 2006)

Ce diagramme conceptuel d'une opération d'aquaculture multi-trophique intégrée (IMTA) combine l'aquaculture de nourrissage (poissons) et l'aquaculture extractive organiques (coquillages), profitant de l'enrichissement en particules de matière organique (POM), et de l'aquaculture extractive inorganique (algues), profitant de l'enrichissement en éléments nutritifs inorganiques dissous (DIN).

La culture Off-shore

La création projetée en France de grands parcs éoliens off-shore offre une opportunité de développement particulièrement prometteuse. Ce plan de déploiement éolien off-shore va générer des zones maritimes où la navigation et la pêche seront réglementées, avec une

présence humaine associée à la maintenance des parcs. Des synergies sont possibles avec des activités d'aquaculture, en particulier de macro-algues, et l'économie et l'impact environnemental et sociétal de cette approche méritent d'être étudiés de façon approfondie. Pour les espèces d'algues flottantes comme *Sargassum* il est possible d'utiliser la culture flottante, et d'appliquer une structure maintenant les algues dans une zone limitée. Cela conduirait à des économies non négligeables par rapport aux systèmes à base de lignes. Dans le cadre d'expérimentations en Mer du Nord, les meilleurs résultats de productivité ont été atteints en utilisant des structures de forme annulaire de 5 à 15 mètres de diamètre, mais ces dispositifs semblent présenter quelques difficultés de récolte.

Un exemple d'espèce candidate pour l'aquaculture offshore dans le Pacifique est le géant des algues brunes (*Macrocystis pyrifera*), qui a une haute capacité d'absorption de lumière, et double son poids tous les six mois. Les tests en haute mer (off-shore) réalisés par des équipes américaines ont révélé une série de difficultés comprenant l'accès, l'amarrage, l'approvisionnement en éléments nutritifs, et la récolte.

La productivité surfacique de cultures offshore, sans intrant, oscille entre 20 et 50 tonnes de matière sèche par hectare et par an, en fonction des dispositifs et des espèces considérées.

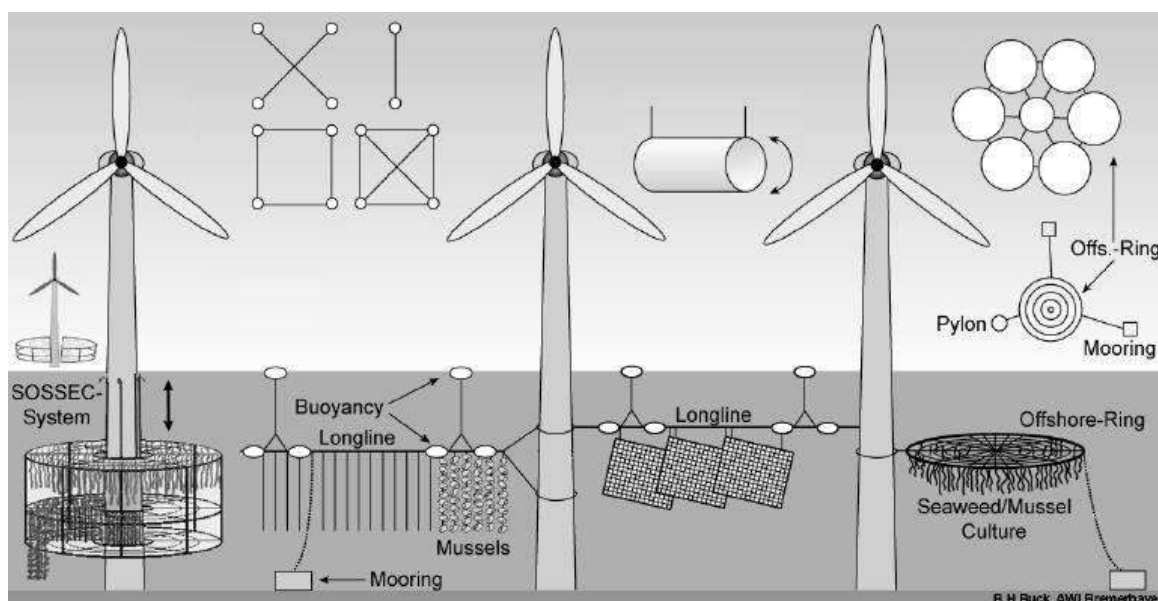


Figure 47 : Les multiples usages des parcs éoliens off-shore pour la co-culture algues et fruits de mer.
(Source: reproduit avec la permission de BH Buck, AWI Bremerhaven, Germany)

La culture en bioréacteurs

Présentant de fortes similitudes avec les micro-algues, la culture en bioréacteurs et/ou photobioréacteurs (PBR) de macro-algues se réalise avec des gamétophytes microscopiques, ou des fragments de thalles indifférenciés, ou des micro-plantules dans le but de développer des cultures de cellules et /ou de tissus bien précis. Cette biomasse, produite de façon totalement contrôlée, est destinée à des applications dans les secteurs de la cosmétique, de la nutrition et de la pharmaceutique. Par exemple, il est possible de citer la production de micro-plantules de

rhodophyceae afin de produire des molécules à haute valeur ajoutée telles que les terpènes halogénés.

L'apport en lumière et en énergie, le transfert de masse et de chaleur, système réutilisable ou à usage unique, sont autant de paramètres différents qui entrent en jeu dans le design des PBR. Le contrôle total de la culture permet alors la mise en place et l'identification de stratégies pour susciter la synthèse de métabolites secondaires. À titre d'exemple, la stimulation par la lumière ou par l'apport ou le non-apport de produits chimiques est un moyen d'y parvenir.

En bioréacteur ou en simple bassin de culture en ensoleillement naturel avec injection d'air, de CO₂ et de nutriments, des productivités surfaciques de 130 tonnes de matière sèche par hectare et par an sont atteignables et ont été démontrées sur des expérimentations de longue durée, comme par exemple la culture de *Gracilaria sp.* sur une période de 3 années consécutives.

Sélection variétale

Les premiers algoculteurs au Japon dépendant du collectage de semences de *Laminaria* ou de *Porphyra* n'ont probablement pas pu sélectionner de souches d'algues particulières avant de maîtriser les cycles de reproduction de ces espèces au cours du 20^{ème} siècle. Ils étaient donc entièrement dépendants des ressources génétiques locales et du succès de propagation de ces propagules collectées sur des supports de cultures. Au sein des écloséries qui se sont développées dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, les méthodes héritées de l'agriculture terrestre ont permis le développement de la méthode dite de "sélection massale" qui a permis la domestication puis l'amélioration de quelques espèces en Asie, avec notamment des résultats spectaculaires pour la sélection de cultivars de *Laminaria* accumulant le maximum d'iode en Chine. Les avancées de la génétique étaient jusqu'à la dernière décennie inexistantes chez les algues marines, des outils et des méthodes très performantes pour l'amélioration génétique des plantes terrestres cultivées viennent seulement d'être accessibles pour plusieurs espèces de macro-algues avec les développements en génomique marine. La recherche de marqueurs moléculaires aidera à mieux connaître la génétique des caractères importants afin d'optimiser l'efficacité des programmes de sélection. Ces marqueurs sont en effet très précieux car ils permettent de tester rapidement les variétés et de retenir celles qui possèdent les caractéristiques recherchées. La sélection assistée par marqueurs est en effet utilisée pour repérer les caractères agronomiquement intéressants.

L'obtention de nouvelles variétés et souches de macro-algues (hybrides de laminaires, souches à forte qualité nutritive, souches résistantes aux maladies et aux stress environnementaux, variétés à haut rendement de molécules d'intérêt ou à forte potentialité énergétique) doit être un objectif majeur des futurs projets de développement de l'algoculture en France susceptible de donner un avantage compétitif à la filière française. Les résultats attendus devraient déboucher sur une bio-banque de souches qui pourra être hébergée au sein de la composante française du Centre de Ressources Biologiques Européen EMBRC-Fr et sera comparable à un catalogue de variétés dont il faudra précisément définir les conditions d'accessibilité pour les académiques et les industriels. D'autre part, ce savoir-faire technologique dans la création variétale pourra devenir un enjeu international que des entreprises existantes, ou à créer, pourraient diffuser dans les pays producteurs d'algues en Asie notamment.

4. Comparaison des prix de vente

Tableau 8 : comparaison des prix de vente des macro-algues en 2009.
(Source : d'après une étude réalisée par le CEVA pour Algasud)

Technique de culture/récolte	Prix de vente en 2009
Pêche au scoubidou – algues fraîches (Laminaires)	40 - 50 Euros la tonne
Récolte manuelle - algues fraîches (10 à 20 espèces)	35– 2 000 Euros la tonne
Algues stabilisées (Farines et poudres micronisées)	1 000 – 15 000 Euros la tonne
Culture en lagune (Hypothèse algues vertes ou rouges)	500 – 800 euros la tonne de matière sèche (50 Euros pour les cibles optimistes)
Culture Offshore (Hypothèse algues brunes)	200 – 315 Euros la tonne de matière sèche
Culture Offshore (Algues brunes alimentaires)	500 – 1 200 Euros la tonne de matière fraîche

Remarque : La Large étendue des prix de vente pour chacune des techniques s'explique par le fait qu'ils sont fixés en fonction des espèces d'algues, des volumes récoltés et surtout de la destination de valorisation de ces algues.

D. Procédés de prétraitement et d'extraction

1. Séchage - Stabilisation

Une fois récoltées, les macro-algues peuvent être utilisées directement, comme dans le cas de l'extraction des alginates. Dans ce cas, les sites de transformation doivent être proches des sites de collecte. L'utilisation de la biomasse algale humide directement sortie de mer permet de mieux conserver les propriétés d'origine en préservant les molécules plus sensibles, et d'obtenir de meilleurs rendements et puretés. Cela exige une bonne gestion de la logistique.

La forte teneur en eau au sein de la biomasse algale pose problème si cette dernière n'est pas directement utilisée, du fait du risque de fermentation. Une étape de séchage et stabilisation s'avère alors nécessaire afin d'éviter toute putréfaction et pouvoir ainsi les acheminer jusqu'aux sites industriels de transformation sans dégradation de la biomasse. Plusieurs méthodes sont possibles.

Le pré-fanage sur site est le procédé le plus courant, pratiqué dans les principaux pays producteurs (Asie ; Amérique du Sud). Les algues sont laissées à sécher, éventuellement sous abris, au soleil avec le vent comme auxiliaire. La teneur en eau est alors réduite de 80 à 30% environ. Cette technique est plutôt utilisée dans les pays d'Amérique du sud et d'Asie où les climats sont propices à ces traitements à faibles coûts.

Le séchage industriel, pratiqué en particulier en Europe, met en œuvre des fours, sécheurs, où les algues une fois sorties sont stabilisées et réduites en farine présentant une teneur en eau

inférieure à 10%. Un procédé de séchage doux permettant de préserver et de ne pas dénaturer les molécules sensibles a récemment été développé et mis au point par la société Aléor.

Un autre mode de dessiccation des algues plus économique existe. Il consiste à mélanger les algues avec des matériaux absorbants. À titre d'exemple, la paille va jouer un rôle d'auxiliaire de déshydratation et de structurant permettant ainsi d'éviter la putréfaction anaérobie et d'orienter la fermentation vers l'aérobiose. On obtient de cette manière des amendements organiques (compost).

Le séchage des algues reste une étape clé qui s'intègre dans un concept d'extraction, de fractionnement et de bioraffinerie. Un séchage trop dur va engendrer des coûts élevés, une modification des propriétés et une difficulté de séparation des constituants.

2. Broyage

Le broyage est une opération qui permet de faciliter le conditionnement et le transport de la matière, et d'améliorer les rendements dans le cas d'extraction solide-liquide dans la mesure où l'extractabilité de certains composés peut être limitée par la diffusion. Les algues peuvent être hachées ou broyées à l'état humide ou sec. Dans le cas de broyages humides, les pompes dilacératrices ainsi que les homogénéiseurs sont particulièrement bien adaptés. Des hachoirs agroalimentaires donnent aussi de bons résultats pour réduire la taille d'algues à des fragments de quelques mm. Le broyage humide peut éventuellement être assisté par le froid (cryobroyage). Ce type de procédé donne des résultats très intéressants en termes d'efficacité d'extraction et de préservation des actifs. Il est utilisé dans certains procédés industriels de fabrication de pâtes et d'extraits d'algues vendus pour leurs propriétés phytostimulantes.

Sur matière sèche, le matériel le plus répandu est le broyeur à grille équipé de couteaux ou de marteaux rotatifs. L'adjonction de froid (azote liquide) permet là-aussi d'améliorer l'efficacité du broyage, en tirant partie de l'humidité rémanente (10% de la matière sèche), et de préserver les molécules actives thermosensibles en limitant l'échauffement produit par la forte énergie mécanique dissipée dans le produit.

Des broyages grossiers fournissent une taille de coupe à 0,5mm – 1 mm - 2 mm – 5 mm.

Des broyages fins permettent, quant à eux, d'atteindre des tailles de l'ordre de 100/200 microns, voire inférieures à 100 microns.

3. Extraction de composés d'intérêt

Méthodes d'extraction et de purification de composés d'intérêt.

L'obtention de molécules d'intérêt concentrées et isolées se réalise par le biais de plusieurs étapes bien spécifiques à chacune de ces molécules.

Solvants

Il existe différentes extraction par solvant possibles sur la biomasse macro-algale.

L'eau est le solvant de choix, qui va permettre d'extraire des molécules comme les colloïdes (alginates, carraghénanes, ulvanes, amidon), les minéraux ; alors que les mélanges hydro-alcooliques eux vont extraire les polyphénols. L'extraction des pigments, comme les

caroténoïdes, se réalise au moyen de solvants apolaires ou en utilisant le CO₂ supercritique (technologie décrite page 27 dans la partie « Procédés de prétraitement et extraction » de l'État des lieux de la filière micro-algues), ce qui permet d'éviter les solvants organiques. (Exemple : extraction de l'astaxanthine). L'extraction par solvants organiques reste encore difficile à mettre en œuvre à l'échelle industrielle.

Purifications

La purification se réalise aussi de diverses façons. Pour l'extraction et la purification des colloïdes la méthode de précipitation/solubilisation est utilisée. Les méthodes d'ultrafiltration ou de chromatographie sont utilisées pour la production de molécules à très haute valeur ajoutée respectivement valorisées dans les secteurs de la cosmétique et de l'alimentaire pour la première ; de la pharmaceutique, et de la médecine pour la seconde.

Biotechnologie

Différentes méthodes de biotechnologies sont aussi possibles.

L'Hydrolyse des macromolécules

Une fois extraites et purifiées, il est possible d'hydrolyser les macromolécules afin d'en obtenir d'autres de taille plus petite mais d'intérêt plus grand. Dépolymériser un polysaccharide en oligosaccharides en les hydrolysant est une façon de faire des actifs à partir de polysaccharides.

Les oligosaccharides de part leur facilité de diffusion et leur meilleure biodisponibilité présentent une augmentation de l'activité biologique.

L'hydrolyse est possible par voie enzymatique en utilisant des enzymes obtenues à partir de bactéries marines, ou par fermentation pouvant dans ce cas utiliser des bactéries marines ou d'autres micro-organismes.

La nécessité d'utiliser des micro-organismes directement issus du milieu marin s'explique par le fait que ces organismes doivent être adaptés à la transformation de la matière algale. C'est en particulier le cas pour l'hydrolyse des polysaccharides qui sont pour la plupart hautement spécifiques des algues. Des enzymes et des bactéries présentant des activités hydrolytiques vis-à-vis de différents polysaccharides d'algues (alginates, carraghénanes, ulvanes, laminaranes, agar-agar, porphyrane, etc.) ont été identifiées et font l'objet des travaux de différents groupes de recherche en France et à l'étranger.

À titre d'exemple, il existe aujourd'hui une production d'oligo-alginate pour la cosmétique cutanée issue de cette technologie.

Cette technologie présente des intérêts majeurs pour les applications à gros volumes dans les secteurs de l'énergie ou de la chimie par exemple. Elle permet en effet de rendre les sucres et acides uroniques constitutifs des polysaccharides disponibles pour des transformations ultérieures, par exemple pour une fermentation acéto-butanolique ou éthanolique.

L'utilisation d'enzymes ou de bactéries permet aussi d'améliorer les rendements d'extraction de composés d'intérêt, en rendant plus facile la déstructuration des parois des algues et le fractionnement des extraits.

Exemples d'extraction des composés les plus connus

L'extraction des agars

Selon le procédé traditionnel, on hache l'algue séchée et on l'ébouillante dans de l'eau additionnée d'un ingrédient acide (acide acétique ou acide sulfurique dilué). Le liquide chaud est ensuite filtré pour éliminer les morceaux d'algues hachées restants, puis neutralisé par un agent alcalin tel le bicarbonate de sodium. Une gelée se forme lorsque la température s'abaisse au-dessous de 40°C. Pour débarrasser cette gelée de son arrière-goût d'algue et de sa légère coloration, on la congèle, puis on la dégèle et on la déshydrate. On effectue cette opération à deux ou trois reprises pour purifier progressivement l'agarose.

L'extraction des stérols

Les stérols sont obtenus à partir de la fraction lipidique totale par extraction du végétal à l'aide de solvants. Les solvants "verts" comme le mélange EtOH/H₂O-80/20, sont moins coûteux, moins toxiques et plus respectueux de l'environnement que les solvants classiques (hexane, acétone). Les stérols sont ensuite isolés de la fraction lipidique totale par voie chimique (saponification) ou par voie enzymatique (lipases).

Les rendements de l'hydrolyse enzymatique, de 3 à 6%, sont très supérieurs à ceux de la saponification, de 1 à 2%.

L'extraction des alginates

L'algue est coupée et nettoyée après la récolte. Puis elle est mise à macérer dans un acide minéral dilué pour être déminéralisée. L'alginate contenu dans l'algue est ainsi transformé en acide alginique, insoluble, et, en même temps, certains constituants indésirables sont éliminés (fucoïdane, mannitol, sels minéraux...). Les algues déminéralisées sont broyées en présence d'un alcali ou d'un sel alcalin afin de neutraliser l'acide alginique et de solubiliser celui-ci sous forme de sel correspondant à l'alcalin utilisé. Les composés insolubles sont éliminés par filtration, flottation ou décantation. L'alginate est extrait et traité. Il est précipité, pressé, lavé et essoré, puis neutralisé, séché et moulu à la granulométrie désirée. On obtient alors différents sels aux propriétés bien précises : les alginates de métaux alcalins (sodium, potassium, magnésium...) sont solubles dans l'eau tandis que l'acide alginique et son dérivé calcique (calcium, aluminium, fer...) y sont pratiquement insolubles. Les sels solubles se dissolvent à basse température et forment des solutions épaisses et visqueuses, et des gels résistants à la chaleur une fois réticulés par des cations divalents comme le calcium ou trivalents comme le strontium.

L'extraction des carraghénanes

On opère différemment selon la pureté du carraghénane que l'on souhaite obtenir. Pour parvenir à du carraghénane pur, il faut passer par l'extraction dite fine. Mais, il est possible d'effectuer un simple traitement à la potasse pour aboutir à un carraghénane semi-raffiné, qui est aussi autorisé comme additif alimentaire au même titre que le carraghénane raffiné.

Le cas des carraghénanes raffinés

Le schéma de la figure 48 explique la méthode fine utilisée dans l'industrie pour extraire les carraghénanes. Le carraghénophyte, surtout s'il est sec depuis longtemps, est mis à tremper (stade 1) dans une solution de chlorure de calcium et agité vigoureusement pour le débarrasser du sable, des coquillages, des larves, des épiphytes et autres impuretés. Le calcium pénètre dans les tissus et fixe le carraghénane dans les parois cellulaires de manière à ce qu'il n'y ait pas de perte lors des divers rinçages (stade2).

Pendant cette réhydratation, il est souhaitable de pratiquer, sur un échantillon représentatif de la biomasse à traiter, une extraction préliminaire de manière à définir les valeurs des paramètres à faire jouer pour aboutir au meilleur rendement.

Les thalles sont alors immergés (stade 3) pendant 2 heures dans une solution alcaline (NaOH, 1 N) à 65 °C, à raison de 100 l/kg de tissu sec. Les végétaux se désagrègent progressivement en un magma coloré sous l'impulsion d'un marteau-pilon (stade 4). Les carraghénanes se dissolvent sous la forme de sels de sodium.

Il faut veiller à ce que le milieu reste toujours basique, ces colloïdes ayant une forte tendance à se dépolymériser en milieu acide lorsque la température est élevée. Il est très difficile de séparer la phase liquide contenant les carraghénanes du reste.

La filtration s'effectue (stade 5) dans un cylindre maintenu sous pression et à chaud. En principe, le liquide jaunâtre obtenu contient 2 g de carraghénanes pour 98 g d'eau. Le problème consiste à récupérer ces 2 g. Le liquide est versé, par jets, dans une cuve contenant de l'alcool isopropylique (stade 6). Les carraghénanes flocculent en amas spongieux blanchâtres tandis que les pales d'une grande hélice brassent le tout. Un autre procédé de précipitation du kappa-carraghénane utilise l'interaction spécifique avec les sels de potassium. Dans ce cas, on n'utilise pas de solvant organique tel que l'isopropanol.

L'opération terminée, une puissante pompe aspire la suspension « précipité de carraghénanes-alcool » pour la déposer sur un crible métallique vibrant horizontalement (stade 7) ; ce dernier retient les amas spongieux et laisse passer l'alcool. Enfin pour un dernier rinçage, les carraghénanes sont aspergés avec de l'alcool isopropylique pur.

À ce stade l'extrait est quelque peu fragile et a tendance à se dépolymériser. Il faut alors le sécher à basse température (5 °C), sous vide, dans une « cloche » renversée. Ce procédé demande du temps mais permet d'obtenir des carraghénanes hautement polymérisés. Certains industriels préfèrent confier une partie de la déshydratation à une centrifugeuse, mais le gain de temps nuit à la qualité. L'alcool isopropylique utilisé à chacune des opérations est collecté et dirigé vers une colonne à distillation qui permet d'en récupérer 85%.

L'amas fibreux et sec est moulu en particules dont la taille peut varier, selon la demande, de 80 μm à 270 μm . Il est soumis ensuite à un contrôle qui définira sa composition chimique exacte et ses propriétés fonctionnelles : humidité rémanente, pureté, valeur de la viscosité à chaud et à froid, forces de gel dans le lait et dans l'eau additionnée de KCl. Si le type de carraghénane est destiné à entrer dans la composition de produits agroalimentaires, il doit répondre en outre à un cahier des charges très strict qui comporte des analyses des éléments traces métalliques et de la qualité microbiologique.

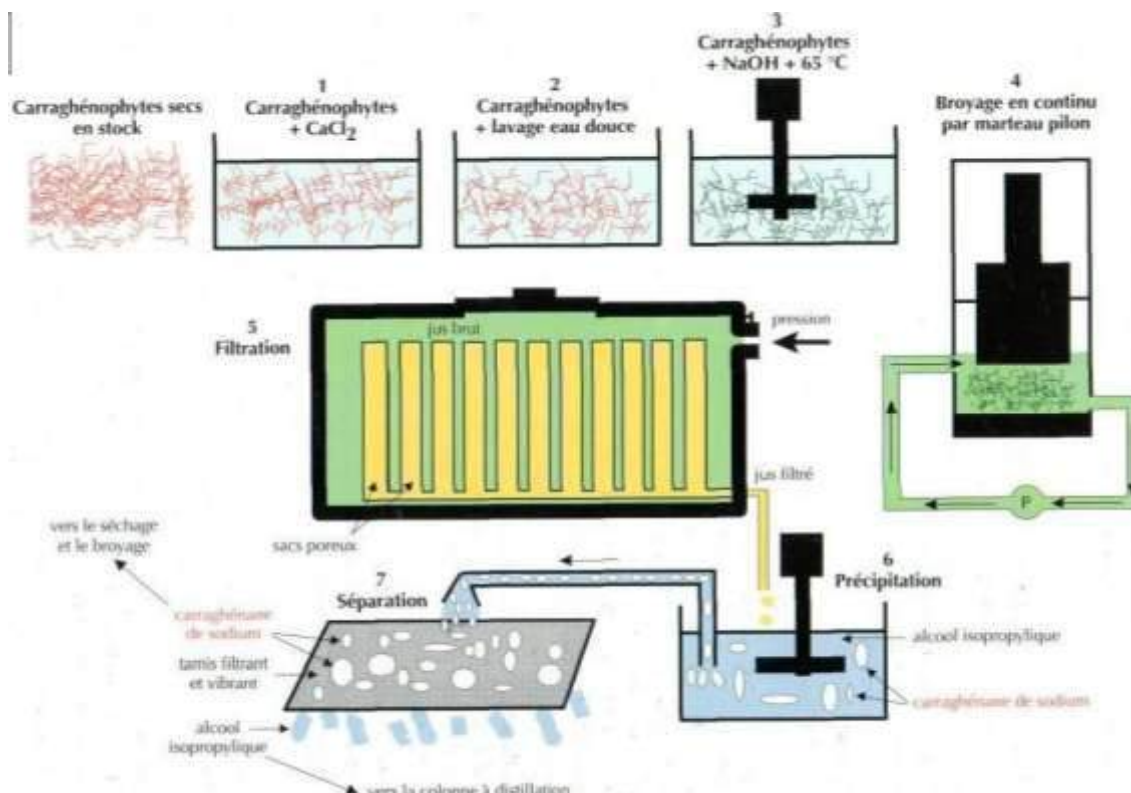


Figure 48 : Méthode « fine » d'extraction des carraghénanes utilisés dans l'industrie.

(Source : R. Perez, 1997.)

Le cas des carraghénanes semi-raffinés

Autorisés en alimentaire sous le code (E407a), les carraghénanes semi-raffinés sont désignés sous les noms de « Alkaline Carrageen Flour » (ACF) ou de « Philippine Natural Grade » (PNG27) ou « Processed Euchema Seaweed » (PES) ou « Semi-Refined Carrageenan » (SRC).

Le principe est basé sur le fait qu'en traitant la biomasse avec une forte concentration de potasse à 8,5% à 60°C, le potassium bloque le polymère à l'intérieur des tissus du végétal. Le tout est séché et broyé en une poudre. Les PNG ont approximativement les qualités des carraghénanes purs en ce qui concerne la viscosité et la force de gel. La procédure d'obtention des PNG est, bien entendu, plus rapide et moins coûteuse que l'extraction fine. En outre, elle peut être exécutée sur les lieux mêmes où sont récoltés les carraghénophytes.

Données au niveau mondial : on a actuellement une production de 30 000 tonnes de carraghénanes raffinés (additif E 407) et de 18 000 tonnes de semi-raffinés (farine d'algue E407a).

4. La digestion anaérobie des macro-algues

La digestion anaérobie peut aussi bien s'effectuer sur des algues entières que sur des résidus d'extraction, par exemple d'alginate ou de carraghénanes. Elle utilise les mêmes principes de base que celle de la méthanisation classique. Ce procédé permet à la fois de minéraliser la matière organique, de récupérer de l'énergie au moyen du méthane (CH_4) présent dans le biogaz issu de la digestion, et de récupérer des nutriments minéraux comme les nitrates et les phosphates (NH_4^+ , PO_4^{3-}).

Issue d'un concept ancien, la méthanisation a prouvé son efficacité et sa robustesse. Actuellement largement utilisée, on la retrouve à titre d'exemple dans la gestion des effluents agro-alimentaires ou des boues d'épuration. Le potentiel méthane des algues est proche de celui de substrats plus classiques comme les refus de centrifugation de lisiers ou les fumiers de bovins (200 à 300 Nm^3 BG / t M Volatile introduite). En méthanisation, les macro-algues marines présentent un certain nombre de difficultés techniques inhérentes à leur composition : teneur en fraction minérale (non digestible) importante, présence d'inhibiteurs des méthanogènes comme le sodium et les chlorures, présence de soufre qui se retrouve dans le biogaz sous forme d' H_2S .

Une codigestion est aussi envisageable, les boues de station d'épuration ou la fraction fermentescible des ordures ménagères pourraient alors être ajoutées à la biomasse algale.

E. Applications, marchés potentiels

1. Introduction

L'algue est avant tout un légume au niveau mondial, les trois quart des macro-algues produites sont consommées en alimentation humaine directe, comme ingrédient omniprésent dans la cuisine traditionnelle asiatique. Les usages industriels des macro-algues sont beaucoup plus connus en Europe et en Amérique du Nord : industrie des colloïdes, d'autres usages et applications plus traditionnels y sont aussi présents : agriculture, cosmétique...

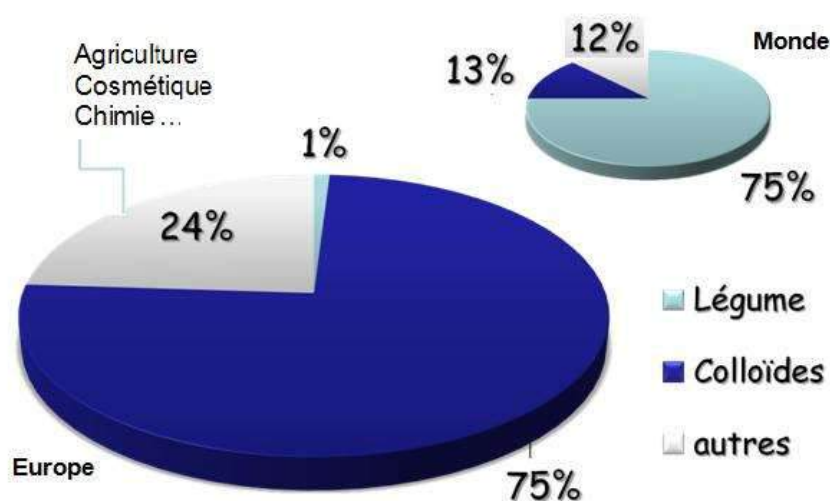


Figure 49 : Marchés européens et mondiaux: familles d'application.
(Source : CEVA)

Les végétaux marins sont omniprésents dans notre quotidien. Sous forme entière ou fractionnée, les utilisations des algues sont diverses et variées. Outre les usages alimentaires, elles prennent une place croissante dans l'agriculture (alimentation du bétail, engrais organique), dans l'industrie pharmaceutique (enrobage des médicaments, propriétés amincissantes...) ainsi que dans des domaines tels que la cosmétologie (savon, crème, dentifrice), les produits de nettoyage, les industries textiles...

À l'époque actuelle, avec l'essor considérable de l'industrie agroalimentaire, il est impossible de dissocier les termes algue et aliment. À titre d'exemple un européen consomme en moyenne sans le savoir au moins cinq fois par jour des agents de texture provenant des algues, contenus dans différents aliments préparés. Certains extraits d'algues possèdent des propriétés gélifiantes, épaississantes ou texturantes que l'on retrouve chez des végétaux terrestres (amidon, pectine) et dans la moelle des animaux (gélatine). Suite à la crise de la vache folle en 1996 les industries agroalimentaires se sont orientées davantage vers des alternatives végétales aux mêmes propriétés que la gélatine telles que les phycocolloïdes.

2. Les phycocolloïdes

Les macro-algues sont utilisées depuis le début du 20^{ème} siècle pour la production de phycocolloïdes, les plus couramment utilisés sont les alginates, les carraghénanes et les agars. Ils constituent les principaux produits industriels dérivés à partir d'algues. Ce sont des polysaccharides qui ne sont pas présents dans les plantes terrestres, bien que certains polymères présentant des propriétés similaires puissent être produits par les plantes terrestres, la gomme arabique en est un exemple. Utilisés en tant qu'agent de texture, ils ne possèdent pas tous les mêmes propriétés. Ainsi, les agars et les carraghénanes Lambda sont des épaississants, alors que les carraghénanes Iota et Kappa sont des gélifiants. Les alginates sont quant à eux à la fois des épaississants et des gélifiants. Ces propriétés sont exploitées en alimentation humaine ou animale, en pharmacie, en agriculture ou encore en médecine.

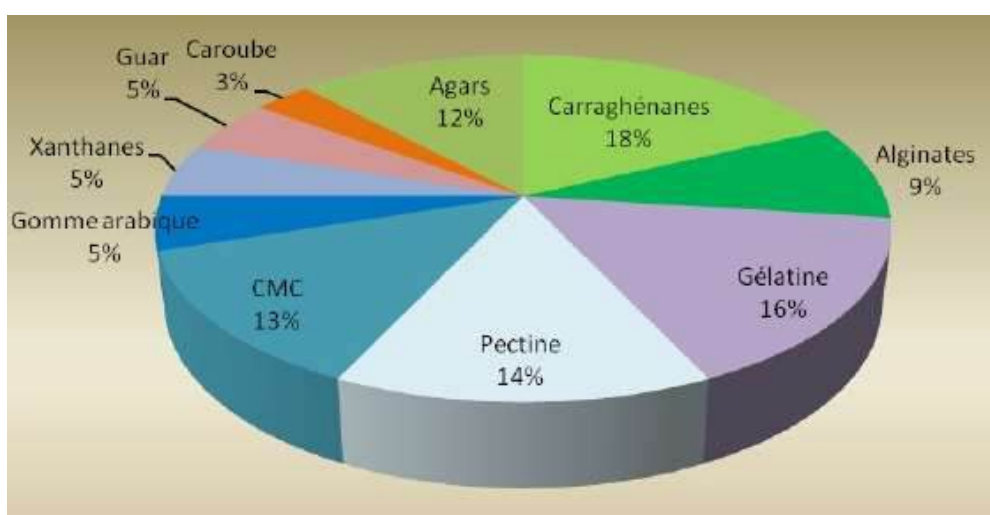


Figure 50 : Mise en évidence de la place des phycocolloïdes parmi les colloïdes utilisés pour épaissir ou gélifier les solutions aqueuses.
(Source : R. Perez, 1997.)

Au total, ces phycocolloïdes représentent plus de 39% des colloïdes produits dans le monde avec un marché mondial de quelques 600 millions de dollars US par an. Il s'agit de produits dits « démographiques », car très utilisés dans la préparation d'aliments et de commodités. La demande les concernant progresse en fonction de l'augmentation de la population, ainsi qu'en fonction de l'évolution des habitudes alimentaires (développement de l'industrie agroalimentaire et consommation croissante de produits élaborés), ainsi qu'en fonction d'épisodes de crise, comme par exemple la suspicion autour de la gélatine bovine générée par l'encéphalopathie spongieuse bovine (plus connue sous le nom de « maladie de la vache folle »).

Tableau 9 : Valeur globale annuelle des produits issus des algues.
(Source: National Algal biofuels technology roadmap, page 64, d'après McHugh, 2003)

PRODUCT	VALUE
Human Food (Nori, aonori, Konbu, wakame, etc.)	\$5 billion
Algal hydrocolloids	
Agar (Food ingredient, pharmaceutical, biological/microbiological)	\$132 million
Alginate (Textile printing, food additive, pharmaceutical, medical)	\$213 million
Carrageenene (Food additive, pet food, toothpaste)	\$240 million
Other uses of seaweeds	
Fertilizers and conditioners	\$5 million
Animal Feed	\$5 million
<i>Macroalgal Biofuels</i>	Negligible
TOTAL	\$ 5,5-6 BILLION

Les alginates sont des polymères de la paroi cellulaire d'une grande variété d'espèces d'algues brunes, ils sont couramment utilisés comme agents gélifiants et/ou épaississants pour plusieurs domaines industriels. Dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique on les retrouve comme stabilisants des émulsions et des suspensions ; par exemple : crème glacée, confiture, crème, crème pâtissière, crèmes, lotions, pâtes dentifrices, comme revêtement pour les pilules.

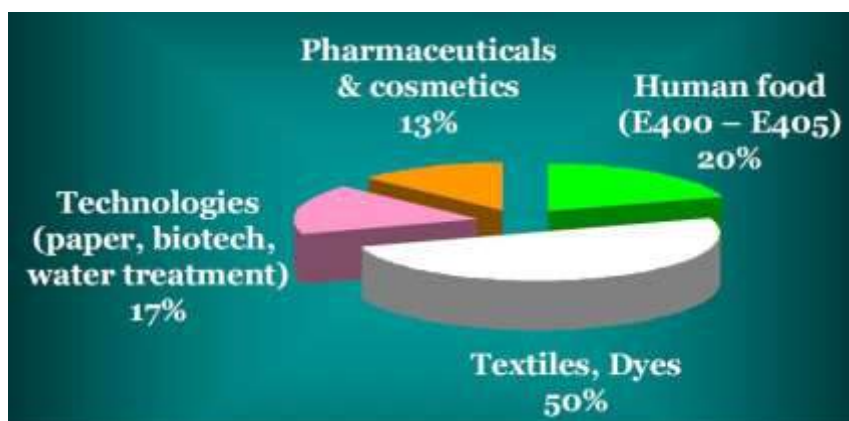


Figure 51 : Marchés d'application des alginates.
(Source : CEVA)

Ils sont également utilisés dans la production de peinture, de certains matériaux de construction, de la colle et du papier, de l'huile, de photos et dans l'industrie textile. Leur capacité à pouvoir se lier aux cations lourds les rend aussi utilisables comme dépolluants et détoxifiants. La plupart des algues brunes pour la production d'alginate sont prélevées dans la nature et non cultivées à cette fin. Toutefois, en Chine, certaines productions de laminaires destinées à l'alimentation humaine mais déclassées sont utilisées comme matière première pour l'extraction d'alginate. Dans l'ensemble, la valeur du marché des alginate a été évaluée à environ 213 millions de dollars US en 2003.

Les carraghénanes sont des polymères issus des parois cellulaires d'algues rouges substitués par un (κ -), deux (ι -) ou trois (λ -carraghénane) groupes sulfates.

Grâce à leurs propriétés, les carraghénanes (d'appellation industrielle E407) sont beaucoup utilisés dans l'alimentation humaine : dans le lait et ses dérivés, les crèmes, les glaces, les gâteaux, les flans, les mousses, les yaourts gélifiés et les sauces. Ces phycocolloïdes confèrent à ces aliments une certaine tenue, une cohésion et une consistance qui les empêchent de couler. Ils sont aussi valorisés dans l'alimentation animale sous forme de croquettes en mélange avec d'autres aliments. Ils sont aussi de plus en plus utilisés dans les formulations cosmétiques.

La plupart des algues pour la production de carraghénanes sont cultivées, car la demande en matières premières ne peut être satisfaite par les ressources naturelles. La valeur du marché des carraghénanes était d'environ 240 millions de dollars US en 2003.

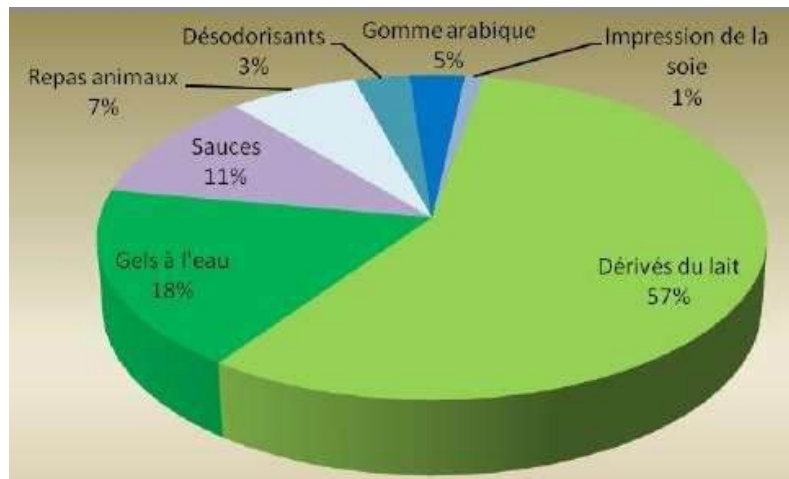


Figure 52 : Répartition des principales utilisations des carraghénanes.
(Source : R. Perez, 1997.)

Les agars sont des polymères issus des parois cellulaires d'algues rouges. Les algues utilisées pour la production d'agar commercial sont récoltées dans la nature ou cultivées. Comme les carraghénanes, les agars sont utilisés comme stabilisants des émulsions et des suspensions et comme agents gélifiants et agents d'enrobage d'aliments. Environ 90% de la production d'agars est destinée pour des applications alimentaires et les 10% restants pour des utilisations bactériologiques et autres utilisations biotechnologiques. En 2001, environ 7 630 tonnes d'agar représentant une valeur du marché d'environ 132 millions de dollars US ont été produites.

Tableau 10 : Utilisations actuelles des carraghénanes κ , ι et λ .
(Source : CEVA)

Composé	Effet	Application
κ-carraghénane	Gélifiant	Lait chocolaté Glaces et crèmes dessert Conserve de viande Nourriture pour animaux Gels désodorisants d'atmosphère Immobilisation d'enzymes Cultures in vitro
ι-carraghénane	Gélifiant	Desserts Sauces Glaces et crèmes glacées Cosmétiques
λ-carraghénane	Épaississant	Desserts Sauces Dentifrice Cosmétiques

3. Alimentation humaine

Les macro-algues se retrouvent sur différents secteurs en alimentation humaine. Elles sont avant tout consommées entières en tant que légumes, principalement dans les pays asiatiques. Ce secteur représente 75% de la production mondiale. Leurs qualités nutritionnelles leur permettent de se positionner sur le marché des compléments alimentaires, leur forte teneur en polysaccharides les positionne dans l'industrie des colloïdes alimentaires.

Un aliment à part entière

En Asie, les algues marines sont une base de l'alimentation traditionnelle. Utilisées quotidiennement en salades, dans des soupes, sous forme de condiments ou de légumes d'accompagnement les japonais consomment 1,3 kg d'algues sèches par an par habitant, soit 3,6g par jour par habitant.

Les quantités consommées ne sont pas élevées mais c'est une consommation traditionnelle, quotidienne et qui fait partie du régime des japonais et a des impacts bénéfiques avérés sur la santé. Par ailleurs, ce savoir faire ancestral a conduit les japonais à tirer profit au mieux de chaque algue et de ses propriétés uniques. Chaque algue est préparée différemment pour mettre en valeur sa couleur, sa texture ou son goût. Quelques exemples peuvent être cités. Ainsi la richesse en glutamate de sodium et son pouvoir exhausteur de goût est mise à profit dans la préparation de la soupe Miso par décoction des algues laminaires. La saveur du Nori est révélée dans les feuilles de Nori séchées voire toastées. Elles sont consommées en tant que telles au petit déjeuner en accompagnement d'un bol de riz dans les makis ou onigiris. De plus, en fonction du lieu d'origine de culture de l'algue Nori, le goût est la couleur sont différents. Ainsi des feuilles de Nori de très haute qualité, totalement noires lisses et brillantes s'offrent en

cadeau lors des mariages. L'algue Wakamé est plutôt consommée sous forme de salades, de condiments ou de soupes. La couleur verte brillante de la chlorophylle stabilisée et la texture croquante sont alors mises en valeur. Le Konbu est également servi comme condiment vinaigré. L'agar-agar issu du *Gelidium* ou de la Gracilaire est largement utilisé dans la préparation de toutes sortes de gelées aromatisées servies au dessert. Ces exemples sont loin d'être exhaustifs de la pratique culinaire asiatique dans l'utilisation des légumes de la mer.

Les français, eux n'en sont pas friands. En France, le mot algue est loin de provoquer l'enthousiasme chez l'ensemble des consommateurs. Pourtant, du fait de leurs valeurs nutritionnelles, ces légumes de mer gagneraient à s'intégrer dans nos assiettes d'occidentaux.

La valeur nutritionnelle des macro-algues peut s'expliquer en grande partie par la présence conjointe de 3 grandes catégories de composants (fibres, minéraux et protéines), mais également par des métabolites présentant des propriétés antioxydantes et anti-radicalaires tels que caroténoïdes, polyphénols, vitamines ou acide gras polyinsaturés. Une description de tous les composants présents au sein des macro-algues est donnée plus haut dans la partie « composition biochimique » page 59.

Une source potentielle de compléments alimentaires

“Une étude épidémiologique menée en Asie (Teas, 1981; Carper, 1989) a montré que la consommation régulière d'algues peut être liée à une meilleure santé (réduction des risques de cancer du colon, sein, prostate)”

La diversité de molécules composant les macro-algues leur confère de multiples qualités nutritionnelles permettant une valorisation de celles-ci en compléments alimentaires, sur les secteurs de la minceur et de la santé.

Les principales voies explorées pour la valorisation de celle-ci en compléments alimentaires sont décrites ci-dessous.

Les fibres et stérols ont des effets sur la réduction du cholestérol plasmatique. À titre d'exemple, les algues vertes et brunes sont caractérisées par la présence de stérols structuralement très proches des phytostérols, elles pourraient ainsi devenir une nouvelle source de phytostérols anticholestérolémiants.

Les polysaccharides sulfatés présentent des actions anti-tumorales et d'immunostimulation. La chélation des métaux, rendue possible par les alginates, joue un rôle de détoxifiant qui a été exploité dans la préparation de traitements de certaines populations françaises touchées par le saturnisme. Les composés halogénés comme l'iode présentent des vertus antiseptiques et antibactériennes, et influent sur le métabolisme des lipides. Le calcium contenu dans les algues est hautement bio-disponible et préconisé en prévention des risques de décalcification osseuse associée à la ménopause. Enfin, des métabolites secondaires comme les polyphénols et les pigments permettent la prévention du dépôt des plaques d'athéromes dans les vaisseaux sanguins et jouent un rôle clé d'antioxydants vis-à-vis des stress radicalaires responsables du vieillissement cellulaire.

Mais aussi des texturants

Bien que les français ne soient pas friands des algues en tant que légume, ils en consomment pourtant quotidiennement, souvent sans le savoir. En effet, les extraits d'algues accompagnent notre quotidien sous forme d'additifs texturants (gélifiants, épaississants, stabilisants) utilisés entre autre dans les crèmes, les flans, les soupes, les charcuteries... Ainsi la première utilisation des algues en France est destinée à l'industrie des colloïdes : alginate, agar, et carraghénanes. La diversité de propriétés existantes mène à une large gamme d'applications.

Pouvant servir de stabilisant, ou d'émulsifiant dans divers aliments comme les sauces salade, les glaces, ou autres, ils peuvent aussi jouer un rôle d'agent filmogène permettant la protection contre les bactéries, la dessiccation, ou les dommages dus à diverses manipulations.

Les alginates, extraits d'algues brunes laminaires, sont largement utilisés dans l'industrie alimentaire en raison de leur capacité de gélification et de leur capacité à former une solution très visqueuse. Ils peuvent jouer un rôle d'épaississant, d'agent gélifiant, de stabilisant, de cryo-protecteur pour les aliments congelés, ou encore de film protecteur comestible. On les retrouve dans les crèmes glacées ou les sorbets où ils permettent à la fois de contrôler la formation de la glace, d'agir comme exhausteur de goût, et d'apporter en bouche l'agréable sensation d'une texture douce. Ils sont présents dans les crèmes fouettées, le riz au lait, les yaourts fouettés, les purées restructurées de fruits, de légumes, de viande et poisson. Modifiés chimiquement par hydroxypropylation, ils stabilisent les émulsions dans les mayonnaises ou les sauces salades. Ils peuvent aussi intervenir dans la panure des poissons-panés, ou dans la clarification de liquides comme les huiles, le vin, le vinaigre, la bière. Lorsqu'ils sont utilisés dans l'UE, ils sont répertoriés dans les ingrédients sous les codes E400 à E405, en fonction de la forme de l'alginate.

L'agar, extrait d'algues rouges, est utilisé dans un large éventail d'applications dans l'industrie alimentaire. On le retrouve entre autres comme stabilisateur pour les gelées de fruits, la crème, le lait aromatisé, la crème glacée et les sorbets. Ils sont aussi présents dans d'autres produits alimentaires tels que les aliments congelés, les glaçages, les meringues, les aliments sous forme de gel : desserts, bonbons et les fruits jus de fruits. Lorsqu'ils sont utilisés dans l'UE, il est répertorié dans les ingrédients sous le code E406.

Les carraghénanes sont un groupe de polysaccharides solubles dans l'eau qui sont plus largement utilisés que l'agar comme gélifiants et épaississants dans de nombreux aliments (surtout à base de lait), en particulier dans le lait au chocolat, la crème glacée, le lait évaporé, les puddings, les gelées, les confitures, les sauces à salade, les dessert gels, les produits de viande, les flans en poudre prêts à préparer.

Lorsqu'ils sont utilisés dans l'UE, ils sont répertoriés dans les ingrédients sous les codes E407 pour les raffinés et E407a, pour les carraghénanes semi-raffinés.

Il existe bien d'autres phycocolloïdes restant encore inexploités comme les Ulvanes, Xylanes, Rhamnanes, hémicelluloses, celluloses, Mannanes, Arabinogalactanes, ...

4. Santé - pharmaceutique

“Beaucoup de molécules à potentiel, peu d’applications commerciales”

Les molécules les plus utilisées commercialement dans le secteur santé-pharmaceutiques restent celles décrites et utilisées dans l’industrie alimentaire, alginate, carraghénane, agar. Il existe cependant une diversité de molécules d’intérêt pharmaceutique issues des macro-algues bien plus importante. Encore au stade de recherche ou de molécules présentant un intérêt potentiel, très peu sont à ce jour commercialisées dans le secteur. Une brève description de leurs applications commerciales et potentiels d’action vous est fournie ci-dessous.

Les alginates sont largement utilisés dans l’industrie pharmaceutique en raison de leur capacité de chélation et de leur capacité à former une solution très visqueuse. On les retrouve dans les pâtes pour empreintes dentaires, comme antiacides pour les brûlures d’estomac ou les reflux gastriques. Dans le secteur médical, ils interviennent au niveau du traitement des plaies dans les compresses hémostatiques, les pansements hydrocolloïdes pour brûlures. On les retrouve également dans la composition de foies artificiels.

Les agars interviennent dans le domaine médical et pharmaceutique pour produire des agents gonflants, des laxatifs, des suppositoires, des gélules, des comprimés et des anticoagulants. Ils sont également utilisés dans la fabrication des milieux de culture biologique, et en biologie moléculaire (plus spécifiquement utilisés pour les méthodes de séparation, ex. électrophorèse).

Les carraghénanes présentent, quant à eux, plusieurs possibilités d’utilisation comme produits pharmaceutiques : anti tumoraux, antiviraux, anticoagulants, des activités d’immunomodulation sont également été explorées.

Constituant toute l’originalité des algues, les polysaccharides sulfatés comme les carraghénanes, mais aussi comme les fucanes et les ulvanes présentent un intérêt en pharmaceutique certain. Les principales pistes à explorer sont menées sur les fucanes et fucoïdanes, les ulvanes, d’autres oligosaccharides et des molécules spécifiques. Faisant parti d’une famille de poly-fucose de sulfatation variable, les fucanes et fucoïdanes, extraits des algues brunes, présentent une grande diversité de propriétés, les principales sont recensées ci-dessous.

Ils pourraient, tout d’abord, prévenir et/ou soulager les ulcères gastriques, et prévenir les cancers gastriques associés, ainsi qu’empêcher les troubles hépatiques. Des produits de ce type existent déjà sur le marché japonais. Les fucanes présentent aussi des propriétés antioxydantes ainsi qu’immunostimulantes. Leur ressemblance avec l’héparine leur confère des actions anti-thrombiques et anticoagulantes. Leurs propriétés anti-carcinogènes, anti-angiogéniques et anti-tumorales font l’objet de nombreuses recherches associées au traitement de différents cancers. Ils présentent aussi des actions d’anti-adhésion bactérienne, voire bactéricides, et antivirale. Pour maximiser ces propriétés, il peut être nécessaire de réduire la masse molaire de ces molécules par dépolymérisation. Cette dépolymérisation peut se faire par voie chimique (acide, radicaux) ou biochimique (enzymes spécifiques).

Les ulvanes, qui sont des polysaccharides sulfatés extraits des algues vertes, font partie de la famille des rhamno-aldobiuronanes sulfatés. Leur propriétés sont comparables à certaines décrites pour les fucanes, mais ils en présentent aussi d’autres polysaccharides complexes composés de sucres rares, ils sont cependant moins étudiés.

D'autres polysaccharides sulfatés issus des macro-algues existent et présentent "une diversité à investiguer". Certains oligosaccharides obtenus par dépolymérisation peuvent aussi présenter un potentiel d'action dans le secteur. Ils sont obtenus par hydrolyses enzymatiques au moyen de bactéries marines permettant d'agir sur une biomasse de même origine.

D'autres molécules spécifiques sont envisageables pour des applications pharmaceutiques, on peut citer entre autre la cellulose microcristalline, les floridosides, les terpènes. La griffithsine est une glycoprotéine antivirale isolée en 2005 d'une Cérampia néozélandaise, *Griffithsia sp.* une algue rouge. Elle est activement étudiée comme microbicide vaginal pour limiter la transmission du sida. On note par ailleurs le développement de la culture de l'algue *Caloglossa leprieurii* qui pourrait devenir une source d'un nouvel antihelminthique (un médicament qui expulse les vers parasites).

5. Cosmétiques

Les macro-algues sont un ingrédient clé de la réussite de la cosmétique marine française, unique et reconnue dans le monde entier. La valorisation des macro-algues sur le secteur des cosmétiques se réalise au travers de différents axes. Tout d'abord, l'excellente dermo-compatibilité des algues leur permet de se positionner sur le marché de la thalassothérapie. Comme en alimentaire, elles peuvent jouer un rôle de texturant dans la formulation cosmétique et dans la fabrication de masques et dentifrices. Elles sont aussi une source de tensio-actifs naturels. De plus elles sont une source d'ingrédients actifs, il est alors possible de produire des actifs cosmétiques et détoxifiants. Concernant les actifs cosmétiques issus de phycocolloïdes, on trouve les oligo-alginates présentant des actions anti-pollution, anti-éruption cutanée, anti-acné, et anti-âge. Les fucoidanes agissent sur la réduction du vieillissement de la peau et favorisent la croissance capillaire.

6. Agriculture

Engrais

Historiquement et traditionnellement, les macro-algues sont utilisées comme engrais dans le monde entier au niveau des régions côtières. Les "laisses de mer" sont épandues sur les champs.

Leur teneur en minéraux permet d'améliorer la composition minérale des sols appauvris et leur richesse en colloïdes d'accroître la capacité de rétention d'eau des sols, de fixer les limons et de réduire l'érosion des terres arables. Les macro-algues brunes entrent aussi dans la formulation de supports de culture (terreaux enrichis) et d'engrais sous forme de farines ou d'extraits liquides.

Après l'extraction des molécules d'intérêt ou des hydrates de carbone des algues, la plupart des nutriments sont encore présents dans les restes de la biomasse. Riche en éléments nutritifs, cette biomasse résiduelle présente un marché potentiel de valorisation comme bio-fertilisant.

Traitements Phytosanitaires

Différentes propriétés ont pu être attribuées aux macro-algues dans ce secteur. Elles contiennent des composés (phytohormones telles que cytokinines, auxines, gibberellines) qui favorisent la germination, la croissance de feuilles ou de tiges, la floraison. Elles peuvent même

être utilisées comme un agent de protection biologique contre les maladies des plantes en agissant comme éliciteurs, c'est-à-dire en stimulant les défenses naturelles des plantes. Il s'agit donc de « vaccins » des plantes, qui permettent de diminuer la fréquence et l'importance des traitements phytosanitaires curatifs à l'aide de produits chimiques fongicides ou pesticides. Les fucoïdanes, les laminaranes et les oligoalginates de type polyacides mannuroniques possèdent ce type d'activité.

On les retrouve sous forme de farines activées avec des métaux (ex. : cuivre). Elles peuvent aussi intervenir comme adjuvants de formulation sous forme de tensioactifs verts (polysaccharides d'algues greffés), ou de polymères anti-rebonds. Enfin, certaines sociétés commercialisent des extraits titrés en actifs oligosaccharidiques stimulateurs des défenses naturelles des plantes. Ces produits sont applicables en traitement foliaire et en arrosage.

Il existe déjà sur le marché français des produits issus de macro-algues homologués comme phytosanitaires et reconnus par les professionnels (notamment arboriculteurs) comme permettant la protection des plantes en stimulant leurs défenses naturelles.

Intérêts environnementaux

Une autre option, avec les avantages importants de la durabilité, est la production d'engrais habilités en agriculture biologique. Lorsqu'ils sont appliqués sur les cultures, les nutriments contenus dans les algues et leurs extraits sont relargués lentement, ce qui présente l'avantage de permettre la croissance des plantes. Plus important encore, la production d'engrais chimique requiert une forte intensité énergétique en relation directe avec les émissions élevées des gaz à effet de serre. Compte tenu du fait que la demande en engrais devrait augmenter dans les prochaines décennies, la production d'engrais à base d'algues présente le potentiel de réduire l'utilisation d'engrais chimiques et, par conséquent, d'atténuer leurs impacts environnementaux négatifs associés. Les algues sont particulièrement riches en éléments fertilisants majeurs azote et potassium ainsi qu'en éléments fertilisants secondaires soufre, calcium, magnésium, et en oligoéléments.

7. Alimentation animale

Nutrition

Utilisées autrefois de façon traditionnelle dans certaines régions côtières où les animaux d'élevage étaient amenés à paître sur les grèves, les algues sont aujourd'hui des ingrédients introduits dans l'alimentation animale pour plusieurs applications. On les retrouve dans la formulation des aliments sous forme de farines. Elles peuvent aussi intervenir comme compléments alimentaires en nutrition animale. Des effets pré-biotiques, antioxydants, immunostimulants et autres leur sont reconnus et valorisés dans des aliments comme ceux pour les poules pondeuses, les jeunes lapins, ou dans les pierres de sels minéraux (iode...) pour bovins, ovins, caprins...

Au niveau de l'industrie des colloïdes, les carraghénanes sont utilisés dans les aliments pour animaux de compagnie comme épaississants ou stabilisateurs de suspension. Les alginates eux interviennent pour donner une forme aux granules.

Aquaculture

Les macro-algues présentent aussi des applications en aquaculture. L'élevage de l'ormeau, qui est actuellement une industrie en plein essor au Chili et pourrait aussi se développer en France, nécessite environ 100 tonnes d'algues fraîches pour chaque tonne d'ormeau produite. La récolte actuelle des populations naturelles ne peut pas soutenir cela, et les éleveurs doivent se tourner vers la production de leurs propres algues fourrages par algoculture. Il est aussi possible de préparer, par digestion enzymatique de macro-algues entières, des aliments adaptés à l'alimentation des proies utilisées pour nourrir les alevins. Les extraits d'algues vertes sont utilisables en tant que facteurs d'appétence pour formuler des aliments pour saumons dans lesquels l'huile de poisson est remplacée par une huile végétale. Certains extraits d'algues ont aussi des propriétés immunostimulantes vis-à-vis de différentes espèces d'aquaculture (turbot, crevettes). La co-culture crevettes/algues vertes, pratiquée au Mexique et déjà mentionnée plus haut, permet d'améliorer la qualité sanitaire de l'élevage, de faire des économies d'aliments et d'améliorer la pigmentation rosée des crustacés élevés dans ces conditions.

8. Matériaux bio-sourcés

Les extraits de macro-algues tels que les alginates sont déjà présents dans des matériaux (fils, films) pour applications médicales. L'exemple le plus connu est le fil d'alginate de calcium qui permet de fabriquer les compresses hémostatiques que l'on retrouve dans tous les hôpitaux de part le monde. Les fibres d'alginate de calcium, obtenues selon des procédés de filage humide, ont aussi de très bonnes propriétés thermomécaniques et une excellente résistance au feu qui leur a valu d'être utilisée comme fibres pour des vêtements de protection feu dans le passé. Il existe sur le marché des fibres viscoses mixtes cellulose/farine d'algues brunes qui sont utilisés dans les textiles d'ameublement et dans les vêtements de sport et sous-vêtements. Les extraits d'algues tels que les alginates sont largement utilisés dans les matériaux à liants hydraulique (colles, ciments et mortier) comme agent de rhéologie et régulateur de prise. On les trouve aussi en tant qu'auxiliaire de fabrication de céramiques, et en tant que matériaux d'empreinte en sculpture et prothétique dentaire. Enfin, ils sont très présents dans l'industrie du papier et du carton.

Il est possible de fabriquer des papiers à partir de fibres d'algues, ou de mélanges pâte de bois/fibres d'algues. Certains produits de ce type sont déjà commercialisés sur le segment des papiers d'art et des papiers décoratifs. Les cartonnages sont envisageables aussi, ainsi que des contenants en cellulose moulés tels que des boîtes à œufs ou des pots horticoles.

Pour les applications papier/carton, l'absence de lignine au sein des algues permet d'utiliser plus facilement les celluloses/hémicelluloses. Les colloïdes d'algues tels que les alginates sont utilisés comme agents de texture pour colorants et pour l'encollage du papier.

Des travaux récents ont montré que les algues et leurs extraits pouvaient aussi être utilisés comme charge ou additif fonctionnel dans des matériaux composites à matrice thermodurcissable ou thermoplastique. Des développements sont en cours dans le secteur des thermoplastiques pour films d'emballage et pour pièces injectées.

9. Bioénergies, bio-raffinerie

La faisabilité de la coproduction industrielle d'intermédiaires chimiques minéraux (potasse, iode, chlorures, sulfures) et organiques (acétone, acide acétique, acide butyrique, butanol, acétate de méthyl ou d'éthyl) par fermentation de macro-algues marines a été démontrée dès la première guerre mondiale aussi bien au Royaume Uni qu'aux Etats-Unis. À cette époque, la chimie allemande avait cessé toute exportation vers ces pays, et pour répondre aux besoins de l'industrie de l'armement une véritable industrie chimique basée sur l'exploitation des gisements naturels de macro-algues s'est développée, en particulier en Californie avec l'exploitation des champs de *Macrocystis pyrifera*.

Le bioraffinage des algues s'est ensuite développé autour de l'industrie des phycocolloïdes, qui, toutes proportions gardées, est pour la filière macro-algues l'équivalent de l'industrie de la pâte à papier pour la filière bois.

Les polysaccharides algaux peuvent être utilisés pour produire des émulsifiants et des tensioactifs selon des procédés comparables à ceux utilisés pour les polysaccharides de plantes supérieures. Les polyphénols algaux sont des bases de choix pour la formulation de colles et résines thermodurcissables.

Depuis les deux dernières années, on assiste à une nouvelle vague de projets de R&D portant sur la production à grande échelle de macro-algues pour la transformation en biocarburants selon des processus de fermentation. Plusieurs voies potentielles sont envisageables, mais certaines semblent déjà plus abouties que d'autres.

La plupart des macro-algues présentent une faible teneur en lipides, ce qui exclut la production de biodiesel selon des procédés de type diester. Il est toutefois possible de transformer une biomasse macro-algale en huile par pyrolyse. Dans ce cas, les espèces riches en polyphénols comme les algues brunes situées dans la zone de balancement des marées sont bien adaptées.

Des teneurs élevées en polysaccharides sont présentes dans la majorité des grandes algues permettant d'envisager le processus de fermentation pour la production de bio-alcools (éthanol, n-butanol, isobutanol) et de bio-méthane. Les grandes algues contiennent à la fois des polysaccharides courants, comme différents glucanes (amidon, laminarane, cellulose) pour lesquels les processus de transformation en bioéthanol sont bien connus, et des polysaccharides plus originaux (alginates, carraghénanes, ulvanes, agar-agar) pour lesquels des travaux de R&D sont encore nécessaires avant d'envisager les transformer en bio-alcools par fermentation.

Des projets de démonstration portant sur la transformation fermentaire de macro-algues brunes en isobutanol sont en cours aux USA, au Chili et en Norvège. Des projets portant sur la transformation fermentaire de carraghénophytes en éthanol sont en cours en Corée, aux Philippines et au Japon. Ces différentes initiatives impliquent des consortia d'industriels de la chimie et des carburants et des équipes de recherche académique. À l'international, de grosses entreprises chimiques comme DuPont et Dow Chemical envisagent d'utiliser les algues pour produire certains des produits chimiques importants pour leur industrie, comme l'éthanol et l'isobutanol.

À l'heure actuelle les méthodes les plus avancées de prétraitement pour la production de bioéthanol issu de polysaccharides algaux en sont au stade de la recherche et du développement. Les flux de déchets restant après extraction peuvent ensuite être soumis à une digestion anaérobie.

La production de biogaz issu de la digestion anaérobie de macro-algues est un mode de production de biocarburants gazeux très intéressant. En effet l'utilisation de cette technologie de conversion élimine plusieurs obstacles clés responsables des coûts actuellement élevés relatifs aux biocarburants d'algues (séchage, extraction et conversion du combustible). Cette méthode peut être rentable, et plusieurs études réalisées démontrent le potentiel de cette approche.

Une étude récente indique qu'un niveau de production de biogaz de 180,4 ml / gd de biogaz, avec une concentration de méthane de 65%, peut être réalisé en utilisant un processus en deux étapes de digestion anaérobie avec différentes souches d'algues.

Pour les macro-algues il a été avancé que la digestion anaérobie est actuellement l'option de conversion la plus intéressante. Selon les circonstances locales, le biogaz produit peut être converti en bioélectricité ou amélioré pour remplacer le gaz naturel. La production de biogaz peut avoir lieu sur terre ou en mer, et peut être optimisée, en fonction de la distance de transport et de la disponibilité des gaz off-shore, du raccordement au réseau d'électricité à partir des plates-formes de gaz/pétrole ou des éoliennes. La production de gaz off-shore et son expédition ultérieure à la terre est également possible, mais pour réduire les coûts de transport, la valorisation en méthane pur et sa compression sont nécessaires en off-shore. Des navires dédiés à la récolte des algues et leur transformation pourraient être conçus pour optimiser ce processus.

La production de biogaz est pour la plupart des espèces techniquement prête, elle a pour intérêts de présenter une productivité élevée (ex. Ulve : 100T (sec)/Ha/an, production réelle), une croissance en eau de mer (pas besoin d'eau douce), et de ne pas entrer en compétition avec les surfaces agricoles terrestres.

10. Environnement, dépollution

Les macro-algues permettent la réduction de la charge en sels nutritifs en consommant de façon naturelle des nitrates, phosphates, ... Cela présente un fort intérêt environnemental pour les estuaires et zones côtières eutrophisées. La production de ces macro-algues est alors vue comme un moyen de réduire l'impact de l'eutrophisation causée par les activités anthropiques (agriculture, urbanisation,...) sur la qualité de l'environnement et la biodiversité. Il est également envisageable de traiter les effluents issus des activités anthropiques au moyen de lagunages à macro-algues. Une action dépolluante et détoxifiante est rendue possible du fait de la capacité des polysaccharides de paroi (alginates, carraghénanes, ulvanes) à se lier aux cations lourds, donc à fixer les métaux lourds.

11. Conclusion

La production des grandes algues en France se réalise essentiellement par récolte en milieux naturels ou par ramassages d'échouages. Au niveau mondial, c'est la production par aquaculture qui prédomine très largement. Elle est très présente en Asie. Très bien maîtrisée à ce jour, elle présente un fort intérêt à se développer en France. Des entreprises se lancent dans le domaine en Bretagne.

En comparaison à d'autres sources, (plantes, animaux, bactéries), les grandes algues et leurs polysaccharides présentent une grande diversité structurale. Celle-ci comprend entre autre des ramifications, des groupements fonctionnels... donnant lieu à de nombreuses activités biologiques. Cette diversité et potentiel d'application associé est encore plutôt sous-exploité d'un point de vue industriel.

Avec l'augmentation croissante de la consommation d'aliments préparés, l'intérêt des propriétés des algues s'est accru, notamment pour créer un large éventail de texturants alimentaires permettant d'attirer encore et toujours le consommateur. Aujourd'hui plaire et séduire le consommateur par des produits toujours plus innovants est devenu l'objectif principal des industriels. Les phycocolloïdes (alginates, carraghénanes, agars) ont contribué à l'évolution et à la modification des habitudes alimentaires. Il reste encore de nombreuses voies à explorer en ce qui concerne l'alimentation mais pas seulement.

En effet, comme présenté tout au long de cette partie, les applications des macro-algues se sont étendues depuis quelques années aux domaines de la cosmétologie, de la pharmacologie et plus généralement, de la chimie verte et des biotechnologies avec des marchés très porteurs.

F. Réglementation

1. En alimentaire

Historique français

À la fin des années 1970, en France, la consommation alimentaire des algues débute sous l'impulsion d'un certain nombre de consommateurs végétariens et macrobiotiques ainsi qu'avec l'arrivée de populations migrantes asiatiques. Les algues sont à cette époque principalement importées d'Asie. Cependant des entrepreneurs bretons mettent à profit la grande richesse en algues de la Bretagne et proposent alors des produits transformés à partir des algues de nos côtes.

Dès les années 1980, les entreprises se structurent pour la récolte et la transformation des algues en vue d'une utilisation alimentaire. Considérées alors comme aliment non traditionnel selon la réglementation nationale applicable à l'époque, les algues devaient faire l'objet d'une autorisation préalable accordée à la suite d'un avis délivré par le conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF). Ainsi plusieurs autorisations ont été données suite aux avis émis par le CSHPF pour accompagner cette consommation d'algues et fixer des critères en contaminants à respecter. A l'époque 14 algues autorisées en consommation humaine sont consignées dans une liste positive.

En 1997, date importante, entre en vigueur le règlement européen CE n°258/97 du 27 janvier 1997 dit « Novel Food » relatifs aux nouveaux aliments et aux nouveaux ingrédients alimentaires. Le règlement s'applique en particulier aux algues pour lesquelles il n'est pas possible de prouver une consommation traditionnelle dans un état membre de l'Union Européenne antérieure à l'entrée en vigueur du règlement. Il est alors nécessaire de déposer un dossier de demande d'autorisation pour un usage comme aliment ou ingrédient alimentaire, selon les dispositions du règlement CE précité.

Les algues utilisables en France actuellement

Tableau 11 : Macro-algues autorisées en alimentation humaine.
(Source : Hélène MARFAING – CEVA- Option Qualité Nov.2010 N°298 p.16)

Nom scientifique	Nom commun
Algues brunes	
<i>Ascophyllum nodosum</i>	
<i>Fucus vesiculosus</i>	
<i>Himanthalia elongata</i>	Spaghetti de mer, haricot de mer
<i>Undaria pinnatifida</i>	Wakamé
<i>Laminaria digitata</i>	Kombu
<i>Laminaria saccharina</i>	Kombu Royal
<i>Laminaria japonica</i>	Kombu
Algues rouges	
<i>Palmaria palmata</i>	Dulse
<i>Porphyra umbilicalis</i>	Nori
<i>Porphyra tenera</i>	Nori
<i>Porphyra yezoensis</i>	Nori
<i>Porphyra dioica</i>	Nori
<i>Porphyra purpurea</i>	Nori
<i>Porphyra laciniata</i>	Nori
<i>Porphyra leucostica</i>	Nori
<i>Chondrus crispus</i>	Pioca, lichen
<i>Gracilaria verrucosa</i>	Ogonori
<i>Lithothamnium calcareum</i>	Mäerl
Algues vertes	
<i>Ulva sp.</i>	Laitue de mer
<i>Enteromorpha sp.</i>	Aonori

Jusqu'en 2010, il était possible de déposer des dossiers simplifiés pour des aliments « substantiellement équivalents » à des aliments déjà consommés ou autorisés. Ces dossiers se déposaient auprès de l'AFSSA (Agence française de sécurité sanitaire des aliments) devenue en juillet 2010 l'ANSES (l'Agence nationale chargée de la sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). Par ailleurs il a été prouvé que les principales algues asiatiques importées ont été consommées en Europe avant 1997 et de ce fait peuvent être utilisées en alimentation humaine en France sous réserve bien sûr que les critères fixés par la

réglementation en contaminants de type iode et métaux lourds et en charge microbienne soient respectés.

Actuellement en France, on répertorie 20 macro-algues utilisables pour la consommation humaine. Il faut toutefois noter que cette liste n'est pas fermée. Il est toujours possible d'obtenir de façon simplifiée l'autorisation de commercialiser des algues pour lesquelles un historique de consommation est reconnu en France ou dans d'autres pays de l'Union Européenne, sous réserve de disposer d'éléments précis et après avis de la Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes (DGCCRF). Pour les algues non traditionnelles, dans l'Union Européenne, il est nécessaire de suivre la procédure du règlement CE n°258/97 « Novel Food » précité.

Les restrictions d'utilisation des algues en alimentation humaine

Accompagnant la liste des algues autorisées, les instances d'évaluation (auparavant CSHPF, AFSSA devenue maintenant ANSES) ont formulé des recommandations concernant les teneurs en métaux lourds et en iode à respecter dans les algues alimentaires. Celles-ci doivent satisfaire aux critères figurant dans les deux tableaux 12 et 13.

Teneur maximale en iode des algues alimentaires

Initialement il avait été fixé un seuil maximum de 5 000 mg/kg pour toutes les algues avec des restrictions de consommation pour les algues lamineuses. L'AFSSA a donné un premier avis en 2002 visant à abaisser le seuil à 2 000 mg/kg pour toutes les algues sauf pour les algues lamineuses et *Gracilaria* dont le seuil restait fixé à 5 000 mg/kg. Les restrictions de consommation suivantes étaient conservées, soit : pour un adulte, l'apport doit être inférieur ou égal à 30 mg de produit sec par jour et pour un enfant de moins de quatre ans l'apport doit être inférieur ou égal à 15 mg de produit sec par jour (ou 105 mg de produit frais).

Tableau 12 : Teneurs maximales en métaux lourds et en iode autorisées en France pour les algues destinées à la consommation humaine.

(Source : Hélène MARFAING – CEVA- Option Qualité Nov.2010 N°298 p.16)

	Algues légumes ou condiments En mg/kg poids sec	Compléments alimentaires En mg/kg (produit vendu en l'état)
Arsenic minéral	3	
Cadmium	0,5	3
Mercure	0,1	0,1
Plomb	5	3
Etain	5	
Iode	2 000	

Ce tableau synthétise les derniers avis et textes réglementaires jusqu'à novembre 2010.

En 2009, l'AFSSA a publié un nouvel avis relatif à la teneur maximale en arsenic inorganique recommandée pour les algues lamineuses et aux modalités de consommation de ces algues compte tenu de leur teneur élevée en iode. La teneur maximale en arsenic inorganique de

3 mg/kg de poids sec (recommandation du CSHPF du 14 octobre 1997) a été conservée. En revanche, l'AFSSA recommande dans ce dernier avis qu'un seuil maximum de 2 000 mg/kg d'iode soit retenu pour TOUTES les espèces d'algues alimentaires. L'exception pour les algues naturellement très riches en iode (laminaires, *Gracilaria*) n'est pas maintenue. Cependant des procédés technologiques de transformation peuvent conduire à réduire la teneur en iode initiale des algues et à proposer sur le marché des laminaires conformes à la réglementation.

Bien que les avis de l'AFSSA ne soient pas des textes réglementaires, il est important de noter que la DGCCRF peut s'y référer pour les contrôles (les avis de l'AFSSA servent alors de référentiel). Enfin il n'existe pas d'avis communautaire pour les teneurs en iode maximales dans les algues. Ainsi en Allemagne où il y a eu plusieurs retraits de lots d'algues chinoises, la législation fixe à 20 mg d'iode par kg de poids frais la teneur limite autorisée dans les produits alimentaires.

Teneur maximale en cadmium et en plomb des algues

Le règlement communautaire CE n°1881/2006 du 19 décembre 2006 a fixé des teneurs maximales en certains contaminants dans des denrées alimentaires : nitrates, aflatoxines, métaux lourds, dioxines et hydrocarbure aromatiques polycycliques. Puis dans le règlement CE n°629/2008 (modifiant le règlement CE n°1881/2006 précité portant fixation de teneurs maximale pour certains contaminants dans les denrées alimentaires) les algues marines ont été citées pour leur capacité à fixer naturellement le cadmium.

Ainsi dans ce dernier texte communautaire, des teneurs maximales en cadmium ont été fixées pour les compléments alimentaires composés exclusivement, ou principalement, d'algues marines. La teneur maximale est fixée à 3 mg/kg poids brut du complément alimentaire (contenant + contenu) soit une valeur plus élevée que celle fixée anciennement par le CSHPF pour les algues alimentaires (0,5 mg/kg sec).

Il faut également noter dans ce règlement CE n°629/2008 qu'une teneur maximale en plomb est fixée pour les compléments alimentaires en général : 3 mg/kg poids brut. À l'inverse du cadmium, cette limite maximale est plus faible que la limite maximale fixée par le CSHPF pour les algues alimentaires (5 mg/kg sec). Mais dans le cas du complément alimentaire, il faut tenir compte du contenant, la teneur maximale est donnée par kg de poids brut du complément alimentaire.

Les restrictions d'utilisations concernant les algues alimentaires ne sont donc pas simples car il existe des valeurs maximales différentes en métaux lourds pour les algues fraîches ou les algues sèches consommées en tant que légume ou condiments d'une part, et d'autre part pour les algues en compléments alimentaires. Les valeurs maximales en métaux lourds dans les compléments alimentaires sont des valeurs européennes. Les valeurs maximales en métaux lourds dans les algues fraîches ou algues sèches consommées en tant que légumes ou condiments sont des teneurs françaises.

Microbiologie

Pour terminer sur ces aspects réglementaires, les algues en sachet (produits secs) doivent respecter les critères microbiologiques suivant selon l'avis précité du CSHPF.

En la matière, il convient de rappeler les dispositions communautaires applicables relatives aux critères microbiologiques des denrées alimentaires.

Tableau 13 : Critères microbiologiques à respecter selon le CSHPF.
(Source : Hélène MARFAING – CEVA- Option Qualité Nov.2010 N°298 p.17)

Critères microbiologiques	Valeurs maximales autorisées
Germes aérobies mésophiles	$\leq 10^5$ / g
Coliformes fécaux	≤ 10 / g
Anaérobies sulfitoréducteurs	$\leq 10^2$ / g
<i>Staphylococcus aureus</i>	$\leq 10^2$ / g
<i>Clostridium perfringens</i>	≤ 1 / g
<i>Salmonella</i>	Absence dans 25 g

Concernant les colloïdes algaux alimentaires

Les polysaccharides issus des macro-algues présentés dans les parties précédentes comme colloïdes alimentaires sont référencés sous les codes européens d'additifs alimentaires comme l'indique le tableau ci-dessous.

Tableau 14 : Codes européens des additifs alimentaires des colloïdes algaux.
(Sources : CEVA)

Nom du colloïde	Code européen additif alimentaire
Acide alginique	E 400
Alginate de sodium	E 401
Alginate de potassium	E 402
Alginate d'ammonium	E 403
Alginate de calcium	E 404
Alginate de propylène glycol	E 405
Agar agar	E 406
Carraghénane	E 407
Carraghénane semi-raffiné	E 407 a

Concernant les carraghénanes, on peut souligner les données toxicologiques s'y associant. La dose journalière admissible est de 75 mg/kg. Aux doses courantes, il n'y a aucun effet constaté, mais il semblerait que ces composés soient des immunosuppresseurs, capables d'induire des atteintes de la production d'anticorps et de l'immunité anti-tumorale. De plus, les carraghénanes dégradés sont des substances à effet ulcérogène au niveau du côlon, même à doses modérées. Il existe une interdiction d'utiliser les carraghénanes ayant subi des modifications chimiques conduisant à des dégradations partielles.

2. En cosmétique

La réglementation en cosmétiques relatives aux macro-algues est exactement la même que celle présentée pour les micro-algues. À savoir qu'à ce jour, il n'existe pas de réglementation spécifique "Algues" dans les cosmétiques. La valorisation des macro-algues s'accompagne d'un respect des contraintes réglementaires ou des recommandations officielles classiques (allégations, certifications, recommandations REACH, les nomenclatures pour les cosmétiques, etc.). Pour faire évoluer la réglementation liée au secteur de la cosmétique, les grands groupes se sont associés au niveau européen pour proposer des bonnes pratiques de fabrication avec la norme ISO 22 716 et des engagements sur une réglementation des produits cosmétiques qui doit être mis en place d'ici 2013 : la réglementation REACH (CE n° 1223/2009 -> 11.07.2013).

Les normes ISO/TC 217 et ISO/NP 16 128 permettent la mise en place de définitions et critères techniques pour les ingrédients et les produits "naturels" et "biologiques" en cosmétiques. Une description de l'extrait utilisé suffit pour introduire des extraits cosmétiques issus de macro-algues. On peut souligner qu'il n'existe pas d'obligation à préciser l'espèce d'algue utilisée pour la production de l'extrait cosmétique.

La nomenclature INCI, initiée en 1973 par la C.T.F.A. (Cosmetic, Toiletry and Fragrance Association) et obligatoire en Europe depuis 1998, permet d'informer le consommateur de la composition en ingrédients, dans l'ordre décroissant de leurs concentrations respectives et sous une dénomination reconnue internationalement.

3. Autres secteurs

Il existe aussi des réglementations pour l'utilisation des algues en tant que fertilisants (NF U 42001), en tant qu'amendement organique (NF U 44051), en tant qu'amendement calco-magnésien (NF U 41-001 ; NF U 44-203) et tant que support de culture (NF U 44-551 ; NF U 44-571).

4. La filière « Algues marines » biologiques

Depuis l'entrée en vigueur du règlement CE n°710/2009, la production d'algues marines est couverte par le règlement européen sur l'Agriculture Biologique. Actuellement, une dizaine d'opérateurs bretons actifs dans la filière "Algues" ont déjà une certification biologique, soit pour des **denrées alimentaires** qui comportent entre autres l'algue marine comme ingrédient, soit pour des **intrants** (amendements de sol, "*phytostimulants*"), soit pour des **cosmétiques** (sous cahier des charges privé). Les produits alimentaires Bio à base d'algues sont multiples : algues fraîches salées, sel aux algues, tartares d'algues, pain et fromage aux algues, algues en paillettes déshydratées... Une entreprise bretonne commercialise aussi de l'agar-agar Bio (gélifiant).

Quant aux entreprises incorporant les algues marines dans des produits cosmétiques, elles sont certifiées selon des cahiers des charges privés (chartes Cosmébio, Nature & Progrès, BDIH...). Le règlement européen Bio et son interprétation par l'INAO (guide de lecture français) stipule que les algues marines peuvent être Bio seulement si elles sont récoltées ou cultivées dans des masses d'eau classées "*bon état écologique*" ou "*très bon état écologique*" selon la DCE (Directive Cadre Eau - 2000/60) et qu'elles correspondent en plus à d'autres critères sanitaires et chimiques.

Analyses et perspectives

I. Restitution des Ateliers de Réflexion Thématique

Sont restituées ci-dessous les principales réflexions issues des ateliers de réflexion thématique (ART) qui se sont déroulés lors du colloque « Algues : filières du futur ! » (novembre 2010).

A. ART 1 : Les programmes de génomique fonctionnelle sur les algues : un atout pour les biotechnologies

État des lieux

Au vu des forces académiques en présence, il est clair que la France présente un état des lieux favorable dans le domaine de la recherche en biologie des algues macro et micro, dans le sens où il existe un vrai socle de compétences diversifiées et de qualité (CNRS, CEA, Universités, Ifremer), avec un nombre de chercheurs supérieur à 250. Le positionnement national est notamment fort en ce qui concerne la production scientifique, avec de nombreuses communications et publications dans des revues de premier plan, malgré l'existence d'une compétition internationale assez farouche dans ce domaine, où les USA sont présents de longue date et où l'Asie déploie actuellement des efforts conséquents.

Nous sommes à une période charnière où le potentiel présent nécessite d'être mieux structuré et renforcé pour faire face aux enjeux importants de la génomique en matière de propriété industrielle. Il est nécessaire pour cela de donner à la communauté impliquée dans ces recherches une meilleure coordination et une meilleure visibilité.

Dans le contexte de la biologie moderne, il est indispensable en premier lieu d'avoir accès aux génomes des organismes d'intérêt pour mettre en œuvre de véritables programmes de génomique fonctionnelle. Des programmes de séquençage massif de souches d'algues sont en cours et devront être poursuivis. L'enjeu en matière de propriété industrielle est d'autant plus stratégique qu'il existe un véritable espace disponible dans le domaine. En effet les connaissances restent très fragmentaires sur le sujet, et pour ce qui concerne les espèces exploitées, on en est encore au stade de la cueillette ou de la mise en culture de souches directement prélevées du milieu naturel. Or il suffit de faire le parallèle avec l'agriculture, où les caractéristiques des plantes cultivées sont souvent très éloignées de celles de leurs parents de type sauvage, pour se rendre compte que si l'on veut aboutir à des variétés d'algues présentant des potentiels réellement optimisés pour des applications ciblées il faudra mettre en œuvre un processus de domestication/sélection. Pour être efficace (et se mettre en œuvre dans des échelles de temps plus courtes que celles qui ont concouru au développement de l'agriculture), celui-ci devra s'appuyer sur les avancées de la génomique. Pour asseoir cette démarche les propositions suivantes ont été formulées :

Propositions

- ✓ Développer la domestication des espèces d'intérêt aquacole et biotechnologique
 - Privilégier une approche globale de la culture (conflits d'usage, aquaculture intégrée),
 - Mettre en œuvre une sélection variétale prenant en compte non seulement la production des composés d'intérêt (reprogrammation métabolique) mais aussi l'adaptation aux systèmes de culture (contrôle des cycles de vie, etc.)
 - Anticiper les problèmes de phytopathologie pour la durabilité des productions
- ✓ Soutenir la production de connaissances sur des organismes modèles
 - Développer l'exploration de la biodiversité naturelle
 - Renforcer le socle de connaissances sur la biologie de quelques modèles clefs
 - Donner les bases scientifiques permettant de rationaliser les programmes d'amélioration variétale
- ✓ Passer de la génomique fonctionnelle à la biologie des systèmes (modélisation) et à la biologie intégrative
 - Renforcer la formation des jeunes dans ce secteur
 - Développer la multidisciplinarité (biologie, chimie, écologie, mathématique, bioinformatique)
 - Établir une feuille de route pour le séquençage de nouvelles espèces de micro- et macro-algues
 - Développer des outils de génétique et des approches « omiques » pour les espèces d'intérêt qui ne sont pas encore accessibles à ces techniques.

B. ART 2 : Culture et récolte des algues

État des lieux

La conférence Adebiotech a clairement montré la différence de situation entre les filières macro-algues et micro-algues. Les macro-algues sont une ressource existante utilisée sur des marchés de grands volumes (millions de tonnes) comme l'agroalimentaire avec la possibilité d'être utilisée pour faire des biomatériaux à court termes.

Les micro-algues sont produites en quantités bien plus réduites (10 000 tonnes par an). Le développement de la filière micro-algues est principalement limité par le prix encore élevé de la production et de la transformation. Leur utilisation est donc limitée aux secteurs à forte valeur ajoutée : éclosionerie, cosmétique, nutraceutique.

Si les macro-algues sont largement utilisées en agroalimentaire, elles restent elles aussi encore trop chères pour des applications énergétiques.

Ce constat amène à réfléchir sur les défis technico-économiques de ces filières.

Pour les cultures en photosynthèse, la production résulte du mélange de trois éléments :

- un organisme biologique,
- un milieu de culture,
- la lumière disponible et ses variations constantes au cours de la production.

L'optimisation de la production d'algues passe par l'amélioration de la gestion des interactions entre ces trois éléments donc sur le développement de bioprocédés, intégrant tous les aspects de l'interaction : optimisation des souches et des conditions de culture vers une optimisation économique, gestion de la lumière depuis les problèmes de diffusion au sein des cultures jusqu'à l'utilisation des longueurs d'onde inutiles à la photosynthèse (infrarouge), récolte, optimisation de la valeur de la biomasse (bioraffinage).

Les cultures en fermentation qui s'affranchissent de la lumière sont une réponse à la difficulté de maîtriser la lumière, mais leurs limites et leurs marchés demandent à être mieux connus.

Quel que soit le mode de culture, la séparation de la biomasse algale de son milieu de culture par centrifugation, technologie la plus utilisée actuellement, reste une opération coûteuse. D'autres technologies ont été testées au cours des 20 années de recherche passées, aucune n'a pour l'instant été massivement adoptée par les producteurs de micro-algues.

Outre le développement technologique, deux autres voies sont possibles pour améliorer les bilans technico-économiques des projets « algue » : une meilleure valorisation des produits, et l'utilisation d'effluents industriels pour remplacer les intrants de culture (carbone, azote, phosphore) en apportant éventuellement un revenu complémentaire. Seule cette deuxième voie sera abordée dans cet atelier.

Propositions

Les procédés actuellement utilisés pour la culture et la récolte des micro-algues ne sont pas matures et demandent un effort et un développement de R&D important et spécifiquement guidé suivant le type de marché visé. Il y a nécessité de diminuer les coûts de production et de récolte pour devenir rentable puis compétitif et pouvoir s'ouvrir à de nouveaux marchés, pour cela :

- ✓ Développer les recherches en génie des bioprocédés
 - Améliorer la compréhension des réponses physiologiques à des conditions de production données
 - Automatiser au maximum la culture de micro-algues
 - Mécaniser les systèmes de production et de récolte des macro-algues
 - Standardiser les produits et actifs pour maîtriser et contrôler les procédés
- ✓ Se tourner vers l'utilisation d'effluents industriels pour des cultures autotrophiques comme hétérotrophiques (exemple : utilisation du glycérol, remédiation CO₂, ...), pour diminuer les coûts de production et optimiser les rendements
 - Développer le bioraffinage de la biomasse de micro-algues
 - Développer des produits permettant d'ouvrir des applications viables
 - Intégrer l'ensemble des étapes des filières
- ✓ Pour réaliser ces objectifs des moyens de recherche publics et privés sont à mettre en œuvre
 - Mettre en place de nouveaux centres d'expertise en France, démonstrateurs pilotes industriels
 - Soutenir les projets industriels émergents
 - Générer des appels à projets recouvrant les thématiques

C. ART 3 : Gestion des flux et procédés industriels

État des lieux

Les verrous concernant la production industrielle des micro-algues se situent essentiellement au niveau culture et récolte. Les modélisations ACV montrent que la principale énergie consommée est d'origine électrique et sert à agiter et séparer la biomasse ainsi qu'à injecter le CO₂. Notamment, l'une des difficultés principales est de séparer la matière algale de l'eau interstitielle et de composition, cette opération demandant une forte consommation énergétique.

Des technologies existent mais ne sont pas toujours bien adaptées à une extrapolation à grande échelle et il est nécessaire de disposer de suffisamment de biomasse pour pouvoir adapter les technologies existantes. S'ajoutent à cette contrainte, celles liées à l'eau de mer, la présence de sels pouvant demander du matériel et des procédés spécifiques.

Les problèmes d'injection du CO₂ et la régulation de la température posent également des difficultés difficiles à résoudre en milieu ouvert, compte tenu de l'influence des éléments atmosphériques (soleil, pluie, vent).

Enfin, la croissance des algues nécessite de l'azote, du phosphore et quelques autres éléments minéraux en plus de l'eau et du CO₂. Il importe donc d'étudier précisément le cheminement de ces éléments afin de les recycler dans la plus large mesure. Le bouclage des flux est nécessaire pour abaisser les coûts de production liés aux intrants et réduire l'impact environnemental du procédé.

Propositions

Concernant les procédés de transformation, les premières analyses de cycle de vie révèlent qu'il faut :

- ✓ Optimiser les systèmes de culture et de récolte pour réduire la consommation énergétique,
- ✓ Étudier le recyclage et la valorisation de l'ensemble des flux (eau, éléments minéraux, CO₂...),
- ✓ Privilégier et étudier un cracking et un raffinage de l'ensemble des matières valorisables (compte tenu des coûts importants actuels liés à la production et transformation des algues), nécessitant de développer des innovations de rupture,
- ✓ Mettre en place des pilotes industriels de bio-raffinerie complets, comme pour la filière biocarburants issus du végétal, afin de valider les concepts, évaluer les impacts et préciser les coûts de production.

D. ART 4 : Valorisation des algues sur les marchés à forte valeur ajoutée

État des lieux

Les algues font l'objet depuis de nombreuses années déjà de développements dans les domaines cosmétique, nutraceutique et alimentaire (alimentation humaine et animale). Lors de cet atelier de réflexion thématique, quelques exemples ont permis de s'en rendre compte.

Le cas du développement réussi d'une micro-algue comme complément nutritionnel a été exposé, en particulier sous l'angle réglementaire communautaire.

L'utilisation de micro-algues comme réacteurs cellulaires pour produire des molécules d'intérêt médical telles que des protéines recombinantes (à activités très diverses : marqueurs biologiques, vaccins...), ou d'intérêt cosmétique ou nutraceutique, a également été présentée.

Dans le domaine de l'alimentation animale et en aquaculture en particulier, les micro-algues entières sont utilisées depuis longtemps comme nourriture pour les rotifères, alevins et poissons. Une activité industrielle dans ce domaine a été décrite, ce qui a permis d'en apprécier concrètement les conditions et contraintes de production, les espèces cultivées, et les enjeux économiques liés à cette activité.

Enfin, la présentation de différentes voies métaboliques issues du métabolisme primaire et/ou du métabolisme secondaire permettant d'envisager l'obtention de molécules d'intérêt dans les domaines de la santé et de la nutrition ont été décrites (par exemple en cancérologie-immunologie).

En France, de nombreux verrous scientifiques, technologiques et réglementaires sont à lever pour développer la filière algues en général. Mais cela passe d'abord par une étape incontournable d'identification des **besoins du marché**. En effet, c'est bien le marché qui conditionne la réussite commerciale et économique d'une molécule naturelle originale. Or cette étape est très difficile tant les domaines d'application potentiels des micro- et macro-algues sont variés, entre autres en raison de (ou grâce à) la biodiversité des algues et dont l'inventaire n'est à ce jour pas achevé.

Une fois identifiés un besoin et un marché associé, lever les **verrous scientifiques** consiste par exemple à savoir identifier les espèces et les souches potentiellement intéressantes non seulement sur le plan de la production de tel ou tel actif mais aussi sur le plan de la faisabilité de la culture : sélectionner une souche productrice est de peu d'intérêt si celle-ci est très difficile à cultiver. On peut également chercher à sur-exprimer telle ou telle voie biochimique de synthèse conduisant à la production de tel ou tel métabolite, ceci étant un défi en soi.

Un **verrou technologique** à lever sera de mettre en œuvre les étapes de production, extraction, purification permettant d'obtenir la matière d'intérêt, et ceci de manière à la fois économique et qui permettra de respecter la législation en vigueur (par exemple respect de la directive REACH si une extraction au solvant est pratiquée : quelles sont les traces résiduelles. Dans cette perspective, le développement des « green » technologies liées à l'extraction devra être envisagé à l'image de ce qui se fait dans la filière végétale traditionnelle).

D'autre part, les challenges scientifiques, technologiques et économiques sont assortis de **contraintes liées à la propriété intellectuelle** : c'est un facteur qui a souvent tendance à être négligé par les chercheurs. Or il ne sert à rien d'identifier une souche d'intérêt ou un procédé de production efficace si ceux-ci ne sont pas libres d'exploitation. S'ils le sont, il faut en revanche étudier soigneusement la possibilité de protéger l'invention par un dépôt de demande de brevet, à condition d'être en mesure de fournir suffisamment de preuves du caractère inventif du travail réalisé. Or toutes ces considérations liées à la propriété intellectuelle, nécessitent l'intervention d'experts et constituent des prestations longues et coûteuses, en particulier pour de petites entreprises. La récente structuration des organismes scientifiques (CNRS, INRA, INSERM...) et des établissements universitaires de recherche (Universités, Écoles) dans le domaine de la valorisation de la recherche et du transfert technologique est un atout important dans la levée de cette contrainte.

Enfin, la mise sur le marché d'une matière d'intérêt ou d'un principe actif nécessite que cette matière ou ce principe **respectent la réglementation en vigueur**. C'est encore un aspect du travail de développement qui n'est pas toujours considéré à la hauteur de son importance à la fois en termes d'obligations légales et de coût : là encore, la constitution de dossiers de demande d'autorisation de mise sur le marché est en général longue et coûteuse.

Ainsi cet atelier de réflexion thématique a-t-il abouti à établir les propositions suivantes :

Propositions

Constat 1 : Besoin d'identifier en premier les marchés émergents et d'intérêt en termes d'actifs innovants issus des biomasses algales.

- ✓ Proposition 1 : créer une structure de veille et d'intelligence économique au service de la filière algue en général, allant du national à l'Europe jusqu'à l'international.

Constat 2 : La création d'instituts et le développement de plateformes technologiques est en voie de structuration, mais il n'y a pas encore de lisibilité vis-à-vis des industriels.

- ✓ Proposition 2 : L'État doit soutenir la recherche à travers cet effort réel des scientifiques de travailler ensemble et de mutualiser les moyens au niveau d'un territoire, d'une région. Concernant les plateformes technologiques : elles devraient intégrer toutes les étapes utiles à la filière : extraction, purification, caractérisation, voir éventuellement le criblage d'activités. Les initiatives académiques liées à la création et au développement récent d'extractothèques ou librairies d'extraits marins à disposition des industriels doivent être soutenues tout comme la création de « phycobanques » en particulier dans le domaine des micro-algues.

Constat 3 : le consommateur fait-il le lien entre la biomasse brute et les actifs qu'elle contient ?

- ✓ Proposition 3 : mettre en place une traçabilité des actifs tout le long du process afin de sécuriser tous les acteurs de la chaîne industrielle et conforter le consommateur dans son choix d'un produit de qualité issu des algues.

À ces trois constats et propositions s'ajoutent les deux suivantes :

- ✓ Il serait nécessaire que l'État Français soutienne la création d'une propriété intellectuelle forte en France ; par exemple en dotant les instituts de développement, les plateformes de recherche et développement et autres pilotes industriels, de structures propres à aider les

entreprises du secteur micro-/macro-algues à développer et protéger leur technologie : structures aptes à établir une bibliographie détaillée sur un sujet donné, une « liberté d'exploitation », une « recherche d'antériorités », un « paysage brevets », ou encore à rédiger un brevet d'invention.

- ✓ De même, l'État français devrait soutenir les démarches innovantes de mise sur le marché de matières et d'actifs à base de micro-/macro-algues en aidant les entreprises, et tout particulièrement les PME/TPE très actives dans ce domaine.
 - d'abord à réaliser les études réglementaires préalables,
 - ensuite à constituer les dossiers d'autorisation réglementaire, ceci pouvant être fait dans le cadre de structures mutualisées (plateformes, instituts...) et en parfaite synergie avec les pôles de compétitivité du domaine d'activité,
 - et enfin apporter son soutien aux démarches collectives de la profession vis-à-vis des autorités réglementaires européennes (par exemple soutien à la demande de création d'un label bio pour les macro-algues à usage alimentaire).

E. ART 5 : Production d'énergie et applications environnementales

État des lieux

Dans un contexte très médiatique, même si le concept des algocarburants semble être une option énergétique prometteuse pour l'avenir, il ressort que de nombreux efforts de recherche et de développement devront être fournis pour rendre la filière algale économiquement rentable à l'échelle industrielle et améliorer les bilans énergétiques. La communauté scientifique estime qu'un délai de 10 à 15 ans est nécessaire pour que les biocarburants de troisième génération atteignent leur maturité technique.

Du point de vue des recherches et du développement encore nécessaires, l'essor du concept algal pourrait ainsi dépendre d'une exploration poussée de la biodiversité des micro-algues, d'une amélioration substantielle de la productivité et de stabilité des procédés de culture, d'une optimisation des systèmes de récolte et d'extraction, le tout associé à la réduction des coûts et de l'énergie requise. Il sera nécessaire de passer à une échelle préindustrielle avant l'échelle industrielle et de s'appuyer, au moins au début, sur la production de molécules à haute valeur ajoutée. Cette démarche devra associer le concept de bioraffinerie et étudier les possibilités offertes par l'utilisation d'intrants liquides ou gazeux issus du recyclage industriel (CO₂, azote et phosphore).

L'association, sous l'égide et avec l'aide de l'État, d'un panel d'industriels impliqués dans la production de CO₂, les métiers de l'eau, les métiers de la mer, le transport aéronautique, terrestre ou maritime ou encore la pétrochimie sera certainement une nécessité pour permettre de faire émerger une filière intégrée.

Par ailleurs, des leviers importants et facteurs de succès ont été identifiés. En effet, les acteurs politiques devront être impliqués et auront un rôle essentiel à jouer au moment de l'implémentation des filières sur des aspects tels que les conflits d'usage, l'aménagement du territoire et la réglementation de l'exploitation du patrimoine maritime et aquatique continental national dans une visée de production de biomasse algale. L'acceptabilité sociale des produits de la filière devra être également regardée avec une attention toute particulière dans ce contexte de bioraffinerie.

Les choix des filières devront se faire en considérant les aspects économiques bien sûr, mais également les impacts environnementaux tels que les émissions de gaz à effet de serre ou les impacts sur les ressources ou les écosystèmes.

Propositions

Une approche globale considérant tous les points évoqués précédemment mènera à considérer de nouveaux business modèles évolutifs selon les avancées technologiques (rendements, étapes de normalisation), et les nouveaux marchés à intégrer et développer. Afin d'aborder ces enjeux avec succès et rendre l'activité plus visible à l'échelle internationale, plusieurs propositions ont été retenues à l'issue de l'Atelier n°5 « production d'énergie et applications environnementale » :

- ✓ Établir une feuille de route à l'échelle française
- ✓ Créer une structure commune de coordination, d'animation et de valorisation des efforts de R&D publics et industriels
- ✓ Mettre en place des démonstrateurs à grande échelle en parallèle aux recherches fondamentales avec des synergies entre les deux
- ✓ Mettre en place un programme de formation plus adaptée qui comblerait le manque de techniciens, d'ingénieurs, de chercheurs dans ce domaine pluridisciplinaire
- ✓ Anticiper pour actionner les leviers législatifs et réglementaires

F. ART 6 : Chimie et Agro-matériaux

État des lieux

Les discussions menées lors de l'ART Chimie et Agro-matériaux nous ont conduits aux conclusions suivantes :

Les micro-algues et les grandes algues constituent une biomasse présentant une diversité intéressante au niveau des composés, avec une certaine complémentarité et de grandes originalités par rapport aux composés présents dans les biomasses terrestres.

Les industries qui servent les marchés de la chimie et des agro-matériaux demandent un apport constant en quantité et en qualité.

Pour les macro-algues, l'industrie d'extraction existe déjà, avec la production de texturants alimentaires et techniques, ainsi que d'extraits pour l'agriculture, la nutrition animale et les cosmétiques. Toutefois, un changement d'échelle sera nécessaire pour subvenir aux besoins de la chimie et des matériaux. Le gap est moindre pour les macro-algues que pour les micro-algues.

Cet approvisionnement en biomasse ne pourra s'envisager que sur des cultures dont les méthodes devront être connues et maîtrisées pour avoir une matière renouvelable en quantité suffisante et de qualité constante.

La productivité naturelle élevée des algues devrait permettre d'obtenir des biomasses importantes sans nécessiter le recours aux organismes génétiquement modifiés. Cela améliorera l'acceptation sociétale de leur utilisation.

La ressource en eau douce nécessaire pourra également être fortement diminuée par l'utilisation des algues marines ; l'eau de mer étant largement disponible en zones côtières ou dans des systèmes offshore.

Dans les pays occidentaux, faire de la chimie avec les algues sera plus facile à mettre en œuvre que former le consommateur à les manger. Cette approche permettra de réserver les terres pour les productions vivrières et d'utiliser les mers pour fournir des intermédiaires pour la chimie et les matériaux.

Il existe déjà un très bon fond de connaissances au niveau national sur la matière algale, et la chimie de ses constituants qui devrait être favorable au développement de cette filière à moyen terme.

Propositions

- ✓ Développer une production algale de qualité et à moindre coûts, en quantité importante.
- ✓ Poursuivre l'exploration du potentiel de valorisation agro-chimique de la biomasse algale.
- ✓ Identifier les principaux secteurs de valorisation permettant de rentabiliser la filière.

II. Mise en perspectives

A. Contexte français

La France (la métropole et ses territoires d'outre mer) bénéficie de conditions climatiques propices à la culture des algues ainsi que d'un littoral maritime parmi les plus importants. Ses quelques 7 000 km de côtes placent la France au deuxième rang mondial des Zones Économiques Exclusives. Ce linéaire côtier s'accompagne d'une biodiversité importante des écosystèmes (marais salants, lagunes, baies peu profondes, allant du tropical au polaire en passant par le tempéré etc.) et de la présence de nombreuses espèces de végétaux marins potentiellement cultivables et valorisables. Par ailleurs, la France figure parmi les leaders mondiaux en termes de publications et de dépôts de brevets sur la science et les technologies des algues. Comme le montre cet ouvrage, les compétences de R&D présentes en France sont diverses et réparties tout au long de la chaîne de valeur : de la génomique au bioraffinage en passant par le génie des procédés de culture, de récolte et de transformation. Plusieurs acteurs académiques et industriels sont ainsi devenus référents en Europe, notamment au travers de projets collaboratifs majeurs accompagnés par les pôles de compétitivité et cofinancés dans le cadre de différents appels à projets par des agences publiques : l'ANR (SHAMASH, SYMBIOSE, AQUACTIFS, WINSEAFUEL, BIOSOLIS, ALGOMICS, ALGOH2, ALGORAFFINERIE), le FUI (SALINALGUE, le plus gros projet français sur la thématique), le programme ISI d'OSEO (ALGOHUB), les programmes européens (BIOFAT; InterReg Net-Algae; InterReg En-Algae), ou plus récemment par les Investissements d'Avenir (IDEALG). La filière existe déjà en France : une cinquantaine d'entreprises sont présentes sur le marché des algues, principalement celui des macro-algues à destination agroalimentaire, agricole ou cosmétique, mais aussi celui des micro-algues pour la nutraceutique ou l'aquaculture (écloseries). Il s'agit souvent de PME indépendantes, fortement impliquées dans l'innovation et porteuses ou partenaires de nombreux projets de R&D. Il y a donc une réelle envie de la part des entreprises de se développer par l'innovation sur ce secteur en adaptant leurs compétences ou en créant de nouvelles activités. Afin de contribuer à l'organisation d'une filière française, mi-2009 les pôles de compétitivité TRIMATEC, Mer PACA, Mer BRETAGNE, rejoints par IAR en 2010, puis par QUALITROPIC (La Réunion) en 2011, ont signé une convention nationale de partenariat sur la thématique « Production et Valorisation des micro-algues ». IFREMER et le CEA sont les invités permanents du comité de pilotage de cette convention ; d'autres acteurs du domaine devraient pouvoir les rejoindre. C'est dans ce cadre que les pôles soutiennent et s'impliquent dans le montage de plusieurs projets de R&D et industriels jugés structurants pour la filière dont les ambitions sont de passer à l'échelle industrielle, comme l'IEED GREEN STARS (projet en cours d'instruction qui regroupe de nombreux acteurs dans le sud de la France) ou le projet Investissements d'Avenir IDEALG en Bretagne. Pour accompagner les acteurs de la filière, des clusters se sont également structurés en regroupant des acteurs académiques et industriels. C'est ainsi que se sont développées deux initiatives : l'Atlanpole Blue Cluster qui fédère les acteurs de la valorisation des produits de la mer, principalement les micro-algues, sur les régions Pays-de-la-Loire et Poitou-Charentes ; ALGASUD qui structure un réseau d'acteurs sur les macro- et les micro-algues dans le sud de la France (Languedoc-Roussillon, PACA, et Aquitaine). En parallèle, plusieurs associations d'entreprises ou de think tank font le lien entre les potentialités

de cette filière et leurs thématiques ou secteurs d'activité. C'est dans ce sens que le think tank Adebiotech a organisé, avec le soutien de pôles de compétitivité et d'entreprises, le colloque « Algues : Filières du futur ! ». L'implication de ces structures connexes montre l'engouement mais surtout l'envie des entreprises de tous les secteurs de s'impliquer et de participer au développement de la filière Algues.

Cependant, la France souffre d'une dispersion de ses compétences académiques et d'une faiblesse de ses équipements technologiques, dispersés dans de nombreux grands organismes de recherche (Ifremer, CNRS, Universités...). De même, les structures privées, porteuses d'innovation, sont souvent de petite taille ne leur permettant pas d'aller seules au-delà de leurs possibilités techniques et financières. La France ne dispose notamment pas de démonstrateur industriel de taille significative pour concurrencer réellement les USA ou l'Asie. Ceci est notamment dû à un manque important d'investissements publics et privés, qui s'avère pénalisant pour l'essor de la filière. L'attentisme, observé en France, de la part des grands groupes et utilisateurs finaux de tout secteur engendre également des retards dans l'industrialisation des procédés. Une filière industrielle ne peut se construire qu'avec des laboratoires et des PME : les grands groupes industriels français doivent s'engager dans les projets plus en amont, afin d'apporter le soutien et des portes d'ouverture économique.

Bien que la France soit l'un des pays référents en termes de publications et de brevets, le retard des investissements par rapport aux autres pays, comme les États-Unis, la Chine ou même le Royaume-Uni est important : en comparaison, on compte aujourd'hui plus de deux milliards de dollars investis à l'échelle mondiale. 80% de ces investissements sont localisés aux USA, avec de grands groupes impliqués dans des projets ou dans la création de start-up : Exxon Mobil a investi 600 millions de dollars en 2009 ; Shell et HR Petroleum ont créé une joint-venture (Cellana à Hawaii) ; le gouvernement américain a distribué une enveloppe de 24 millions de dollars en juillet 2010 à trois consortia publics-privés... Ces investissements massifs sont nécessaires pour lever les verrous technico-économiques mis en évidence dans ce Livre Turquoise. Un co-investissement privé et public pourrait représenter une des clés de succès de la filière Algues.

Ceci devra se faire en parallèle avec une vraie stratégie nationale de Propriété Intellectuelle. En effet, on observe depuis 2008 une augmentation du nombre de dépôts de brevets sur les algues. Les pays offensifs sur cette thématique, les États-Unis, la Chine et le Japon en tête, opèrent actuellement un verrouillage technologique de la filière, avec de nombreux acteurs (industriels et académiques) parmi les plus dotés en termes de brevets. Cette dynamique de dépôt de brevets et d'investissements poursuit un seul but : rendre la filière économiquement rentable en la verrouillant sur les principaux leaders. Si les prix de production (de 10 €/kg à plus de 100 €/kg) permettent une valorisation sur des marchés comme l'agroalimentaire, la nutraceutique ou la cosmétique, les marchés de masse (chimie, environnement, énergie) ne peuvent pas encore se permettre d'utiliser les algues comme matière première de base. Aussi, pour développer l'activité économique de ce secteur, il est nécessaire de réduire les coûts de production et de transformation et de lever les principaux verrous technologiques qui limitent la production à grande échelle.

Les problématiques liées à l'utilisation des énergies fossiles ou à l'environnement s'accroissent et obligent à explorer de nouvelles alternatives en termes de production et de consommation

énergétique à l'échelle mondiale. Dans le même temps, les industriels sont de plus en plus soumis à des contraintes réglementaires (REACH) ou des incitations communautaires (10% d'ENR en 2020) qui les orientent vers de nouvelles pratiques, et vers de nouvelles matières premières.

L'état de l'art présenté dans cet ouvrage montre que sur de très nombreux secteurs d'utilisation (agroalimentaire, cosmétique, environnement, bioénergies...), les algues (macro et micro) peuvent représenter une alternative intéressante. Les pôles de compétitivité doivent, avec l'aide des organismes de recherche impliqués sur cette thématique et des regroupements d'acteurs, organiser et structurer la recherche à l'échelle nationale. Ceci permettra de mieux valoriser les compétences académiques au profit d'objectifs industriels réalistes et partagés, et de préparer les lois et réglementations qui permettront d'insérer au mieux cette filière en devenir dans la société et le territoire français. L'objectif sera de capitaliser sur les expériences et sur les résultats obtenus par les chercheurs à l'échelle laboratoire ou pilote, afin que toutes les compétences soient ordonnées avec cohérence sur l'ensemble de la filière dans le but de lever conjointement les verrous technologiques. Le renforcement et la mise en place de centres techniques, de plateformes technologiques ou de centres d'excellence représentent le moyen pour fédérer les acteurs, mais surtout pour donner les moyens à la recherche de répondre aux demandes en avançant les attentes des industriels. Le scaling up et le transfert technologique du laboratoire à l'industrie ne sont possibles qu'avec l'investissement de tous dans des programmes de R&D collaboratives et surtout des démonstrateurs industriels. Ces outils serviraient à tester, optimiser et valider les technologies développées à petite échelle, avant d'envisager des installations industrielles économiquement viables. Ces moyens matériels (démonstrateurs, plateformes) et humains (centres techniques, recherche appliquée) canaliseront les investissements, et fédéreront les forces publiques et privées qui partageront ainsi les risques. Cette structuration des forces de R&D aura une réponse directe, celle de pousser les grands groupes à s'investir plus en amont des projets, et créera un réel lien entre la recherche et l'industrie.

Laura LECURIEUX-BELFOND, Pôle Trimatec

B. Présentation des acteurs des filières algues en France

1. Présentation géographique

La carte ci-contre, présente la localisation de trois groupes d'acteurs des filières algues en France. Elle n'a pas la prétention d'être exhaustive, mais plutôt indicative sur le positionnement géographique des différents acteurs en France.

De ce travail préliminaire, il en ressort que les acteurs, tant laboratoires de recherche qu'entreprises en micro et macro-algues se concentrent principalement sur 4 régions, toutes côtières : PACA, Languedoc-Roussillon, Bretagne et Pays de la Loire.

Les laboratoires de recherche, les entreprises de macroalgues et de microalgues par régions françaises, DROM inclus en 2011

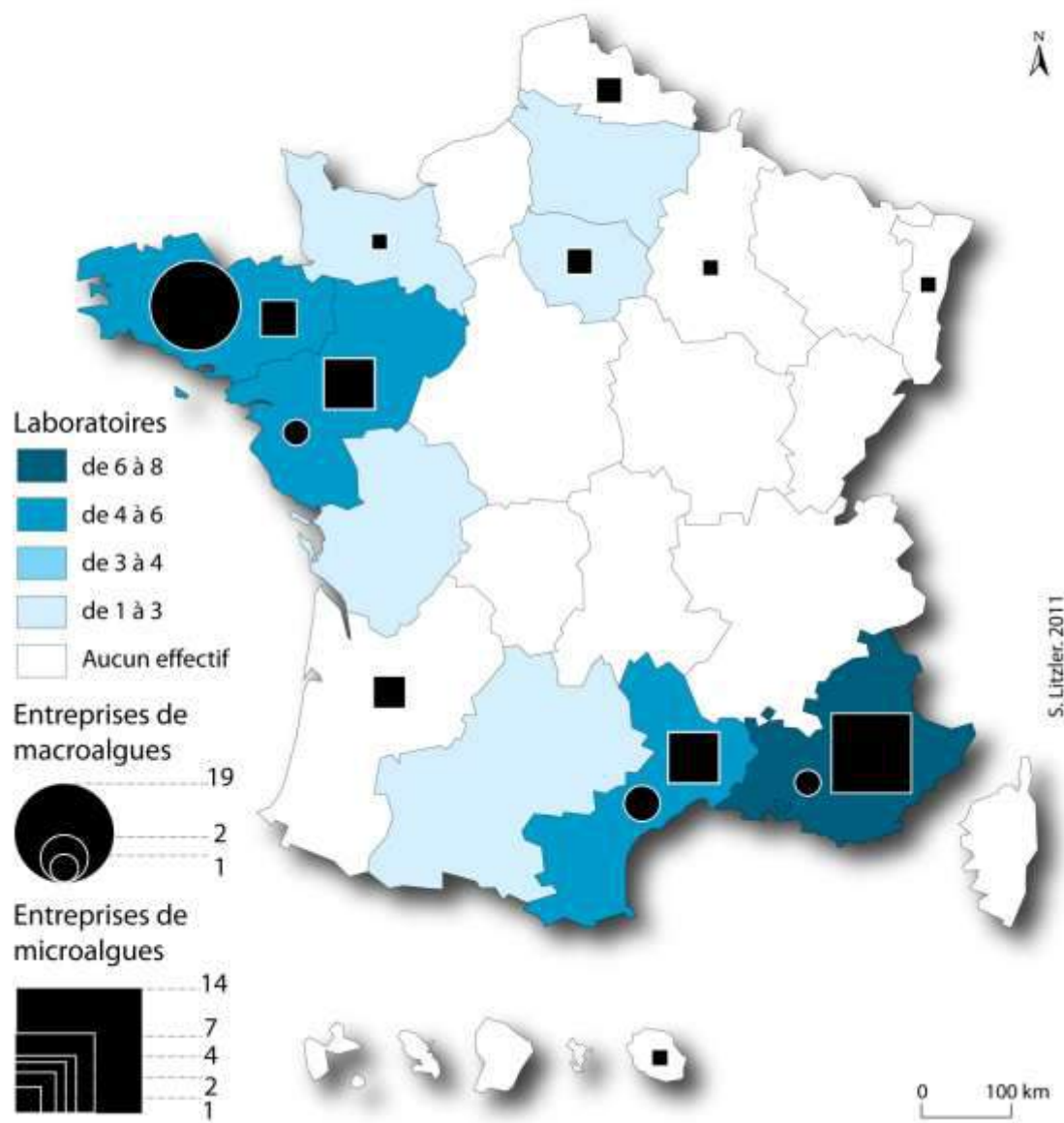


Figure 53 : Les laboratoires de recherche, les entreprises de macro-algues et de micro-algues par région françaises. (Source : Sophie Litzler, 2011)

Les entreprises de macro-algues se situent de façon quasi-exclusive en Bretagne. Celle de micro-algues, avec les producteurs de spiruline, sont très présentes en régions méditerranéennes mais leur localisation se répartit sur d'autres régions de France, notamment sur des régions plus continentales, éloignées des façades maritimes. En effet, on en retrouve dans une dizaine de régions allant de l'Alsace à la Normandie en passant par le Nord Pas de Calais, sans oublier l'Aquitaine. La Réunion possède aussi une entreprise dans le domaine.

2. Quelques chiffres

Les graphiques ci-dessous, établis à partir du recensement (non exhaustif) fait sur le secteur, donnent la répartition des acteurs par type d'activité (recherche, entreprises macro- et micro-algues) ainsi que la répartition de la recherche (nombre de laboratoires impliqués) selon la chaîne de la valeur des filières.

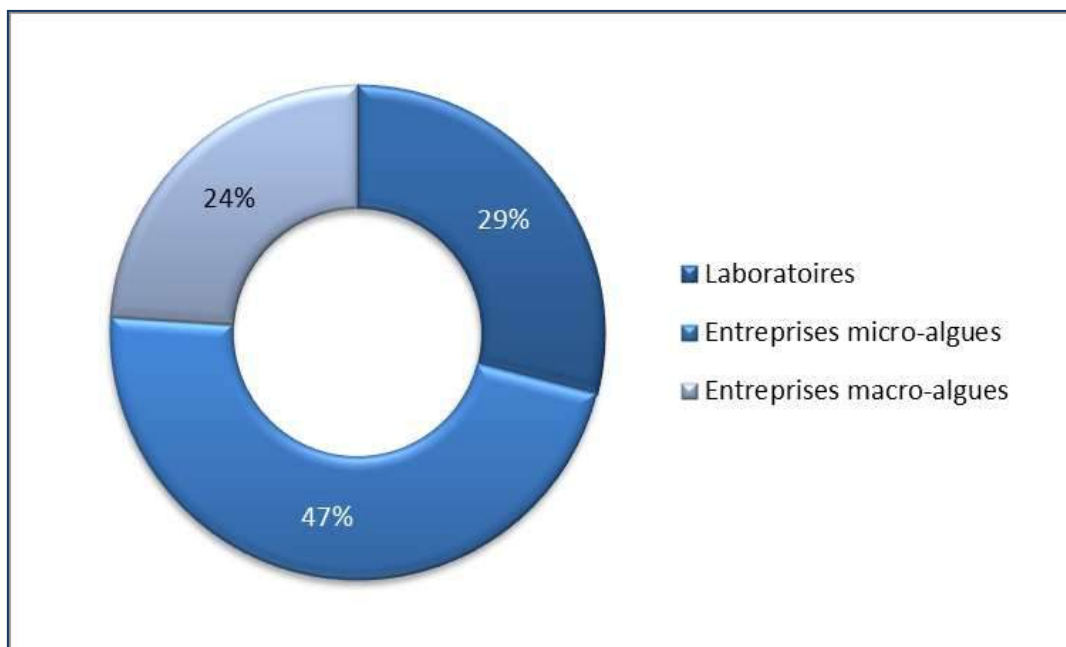


Figure 54 : Proportion des acteurs français dans les filières algues.

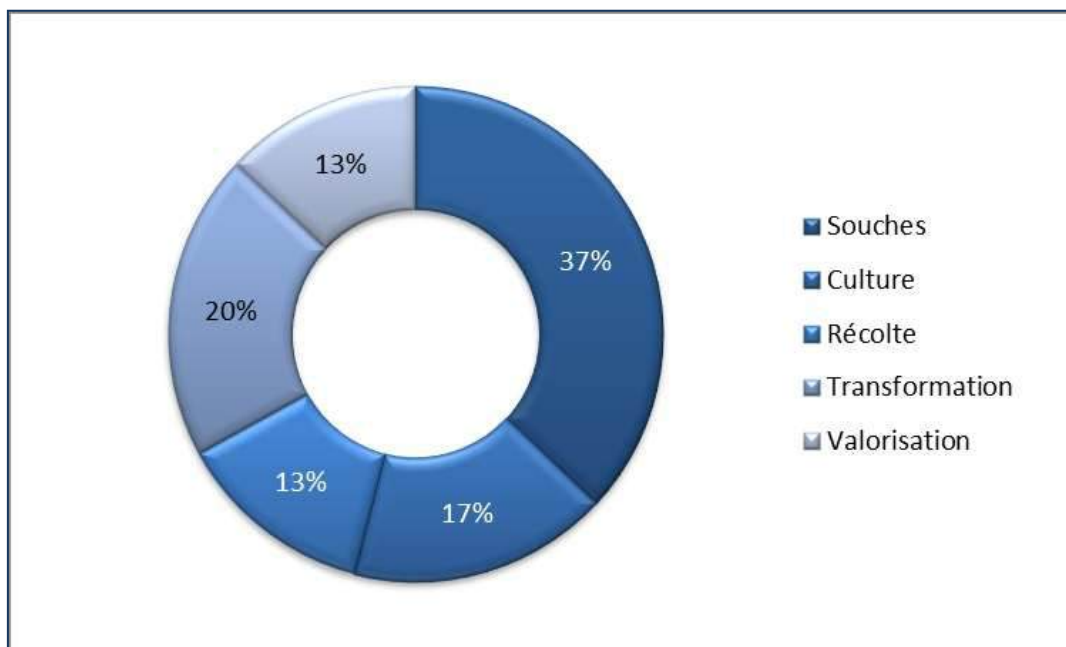


Figure 55 : Répartition des activités des laboratoires sur la chaîne de valeur.

On observe que la moitié des acteurs recensés sont des entreprises travaillant dans la filière micro-algue. Il importe de noter que nombre de micro-entreprises de la filière macro-algues n'ont pas été recensés, car difficile à identifier.

Le tiers des laboratoires français présents dans les filières algues travaillent sur les souches avec tous les domaines scientifiques s'y rattachant : génomique, métabolomique... toutes les approches « omiques ». Les autres activités de recherche sont présentes de façon équivalente.

C. Programmes et coopérations en cours

Les différents programmes en cours et/ou labellisés par les pôles de compétitivité sont répertoriés en annexes avec les différents partenaires impliqués et les budgets alloués. Ces projets illustrent bien l'existence de coopérations entre industriels et laboratoires publics. Un total de 51 projets a été répertorié pour un budget total d'au moins 350 millions d'euros.

Une brève exploitation de ces données a été faite et vous est présentée dans les graphiques ci-dessous.

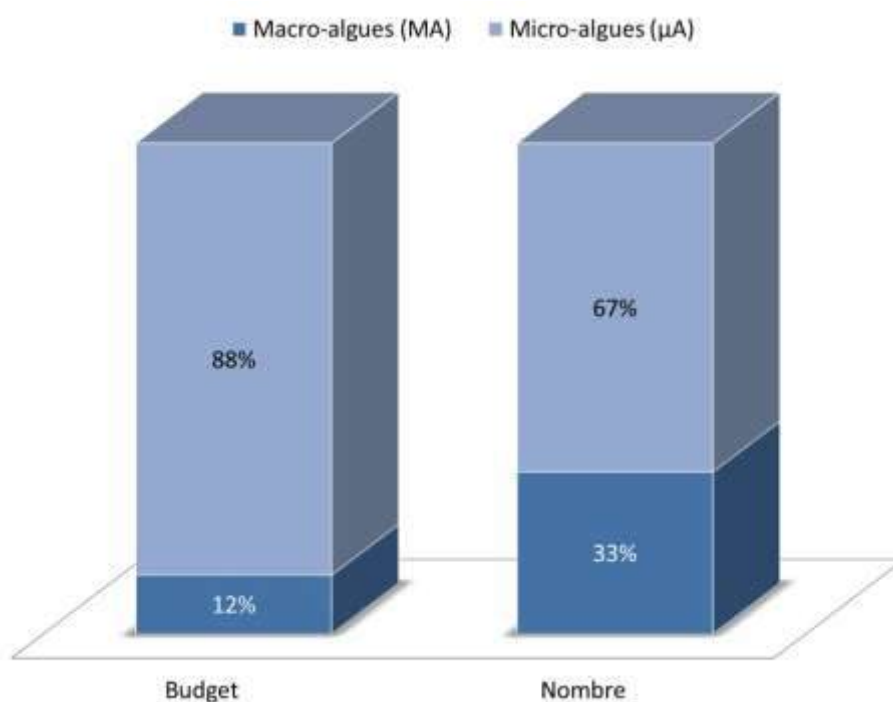


Figure 56 : Répartition des projets en fonction de la filière algues, en budget et en nombre.

La grande majorité des budgets consacrés aux projets concerne les micro-algues (88%), leur budget moyen est plus important que celui alloué aux macro-algues.

On retrouve une répartition équivalente lorsqu'on se place du point de vue de la répartition entre « recherche fondamentale » et « développement », en effet, deux tiers des projets de développement représentent 90% des financements. Le budget moyen est donc plus important pour les projets en développement que pour ceux en recherche fondamentale.

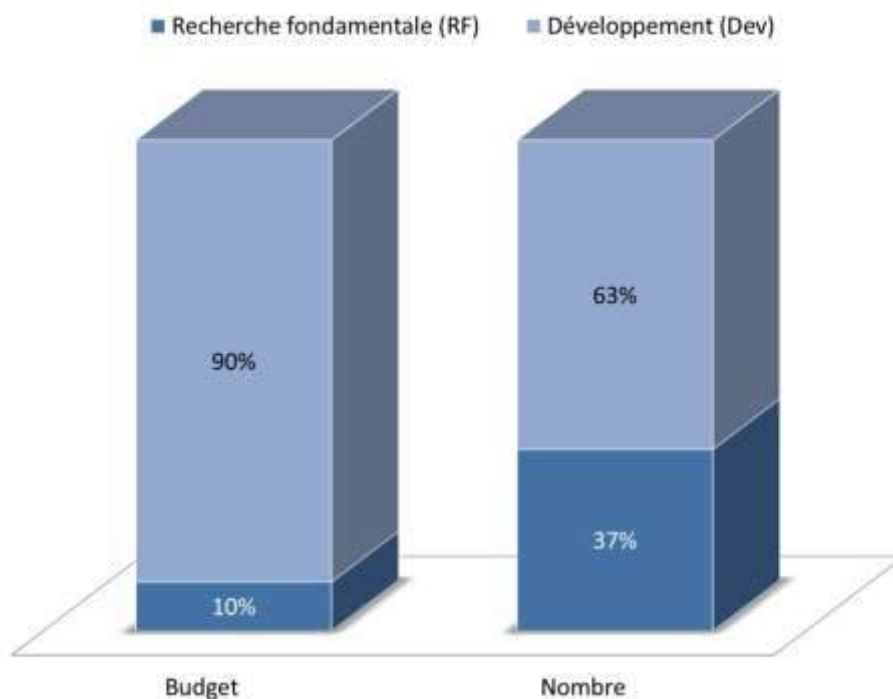


Figure 57 : Répartition des projets en fonction des activités, en budget et en nombre.

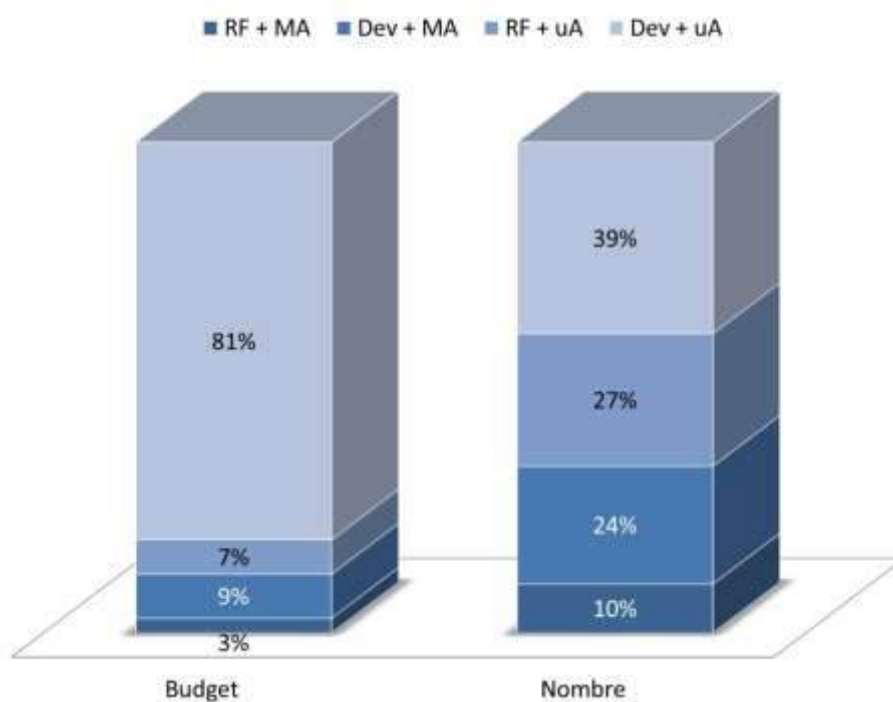


Figure 58 : Répartition des projets en fonction des filières et des activités, en budget et en nombre.

Ce graphique prend en compte les deux critères traités séparément précédemment. Il en ressort que les projets de « développement » sur les micro-algues mobilisent une part importante des moyens, ils représentent 40% des projets et 80% des budgets.

D. Analyse des filières algues en France

Un travail d'analyse de chacune des deux filières algues en France, micro puis macro-algues est présenté dans les pages suivantes.

Pour chaque filière, la chaîne de la valeur est présentée avec la typologie d'acteurs y intervenant et les différents verrous identifiés à chaque étape.

Sont ensuite présentés, pour les marchés à haute valeur ajoutée et pour ceux de masse, les applications actuelles et potentielles, les atouts et les difficultés que présentent les algues pour chaque secteur d'application.

Enfin, pour compléter cette partie, une analyse SWOT (atouts /attraits, forces/faiblesses) des deux filières a aussi été réalisée.

La filière micro-algues étant moins développée et aboutie que la filière macro-algues, une identification des marchés accessibles à court, moyen et long termes en fonction des premiers verrous de la chaîne levés a été faite.

1. Pour la filière micro-algues

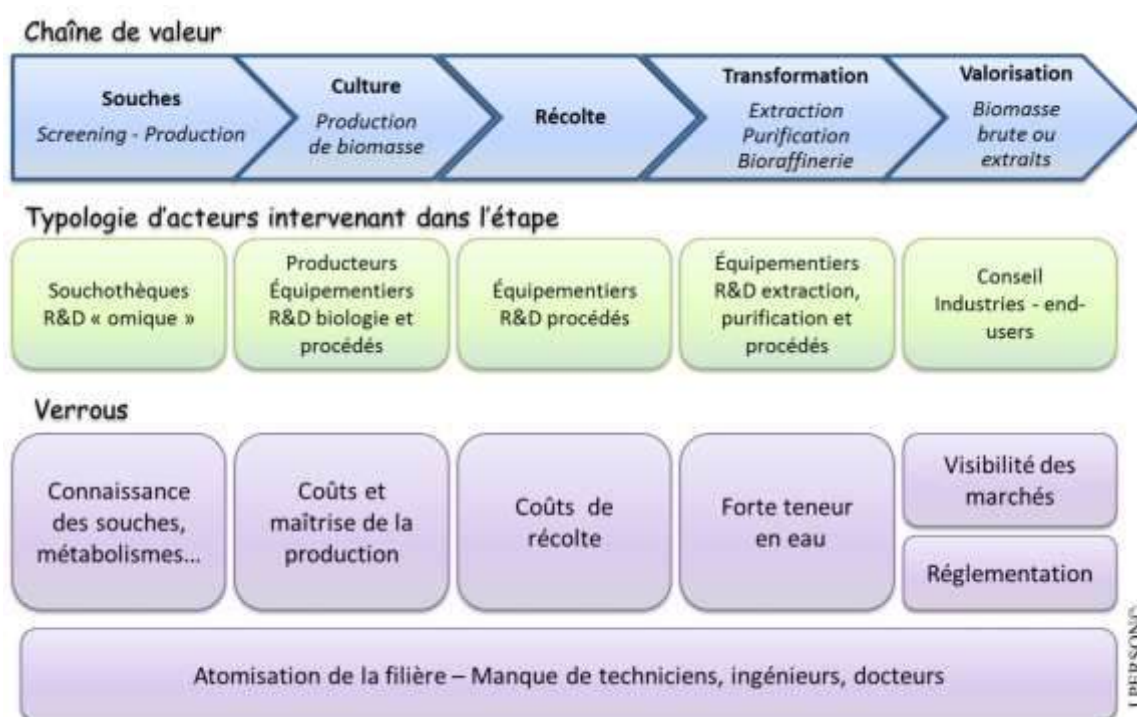


Figure 59 : Micro-algues, un aperçu de la filière sur la chaîne de valeur.

Tableau 15 : Micro-algues, atouts et difficultés dans les marchés de la haute valeur ajoutée.

Secteurs	Applications, Potentiels	Atouts	Difficultés
Cosmétiques	Principes actifs Colorants Anti-oxydants Protection solaire	- Actifs naturels innovants - Forte diversité d'espèces et de molécules - Forte teneur en anti-oxydants - Bonne image marketing	- Peu d'espèces cultivées à grande échelle - Très forte teneur en eau de la biomasse - Évolution de la réglementation
Compléments alimentaires Nutraceutique	Oméga-3 Caroténoïdes Protéines	- Importantes qualités nutritionnelles (oméga-3, protéines, vitamines) - Marchés existants	- Réglementation longue et compliquée - Coûts production élevés - Remédiation CO2 quasi-incompatible - Maîtrise des marchés
Santé humaine	Diagnostic de contrôle	- Très haute valeur ajoutée - Remplace utilisation de produits radioactifs	- Petit marché de niche - Remédiation CO2 impossible - Réglementation longue
Alimentation humaine	Aliments Colorants Ingrédients	- Qualités nutritionnelles - Colorants naturels - Combat sous-nutrition	- Réglementation longue et compliquée - Acceptabilité par les consommateurs

Tableau 16 : Micro-algues, atouts et difficultés dans les marchés de masse.

Secteurs	Applications, Potentiels	Atouts	Difficultés
Environnement	Remédiation CO2 Traitement effluents (lagunes)	- Consommation de CO2, d'azote et de phosphore - Systèmes de lagunage existent déjà	- CO2 et effluents pollués par molécules toxiques
Énergie	Biodiesel Biokérozène Bio-gaz	- Rendement d'huile à l'hectare 7 à 30 fois > au colza - Pas de compétition avec l'alimentaire - Co-valorisation	- Production de masse - Technologie industrielle - Grande surface nécessaire
Aquaculture	Aliment de qualité (protéines, oméga-3)	- 1ère maillon chaîne alimentaire aquatique - Qualités nutritionnelles	- Besoin d'intrants « propres » pour culture - Monoculture requise
Alimentation animale	Bétail Pet food	- Co-valorisation - Apport protéique - Réduit dépendance soja	- Production de masse - Technologie industrielle
Chimie verte Bio-matériaux	Bio-polymères Lipo-chimie	- Une nouvelle source pour bio-plastiques et agro-tensioactifs	- Production de masse - Technologie industrielle

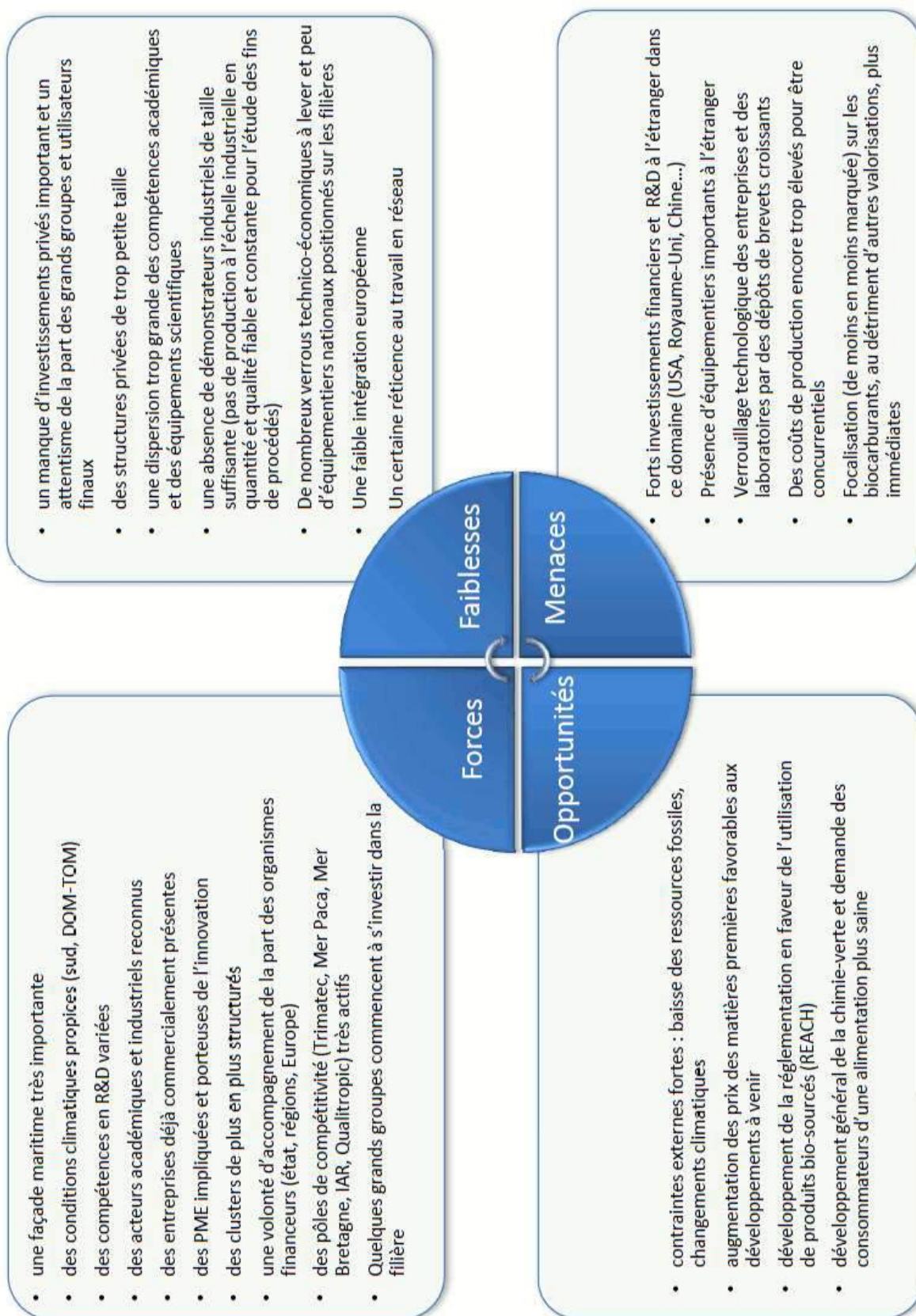


Figure 60 : Analyse SWOT de la filière micro-algues en France.

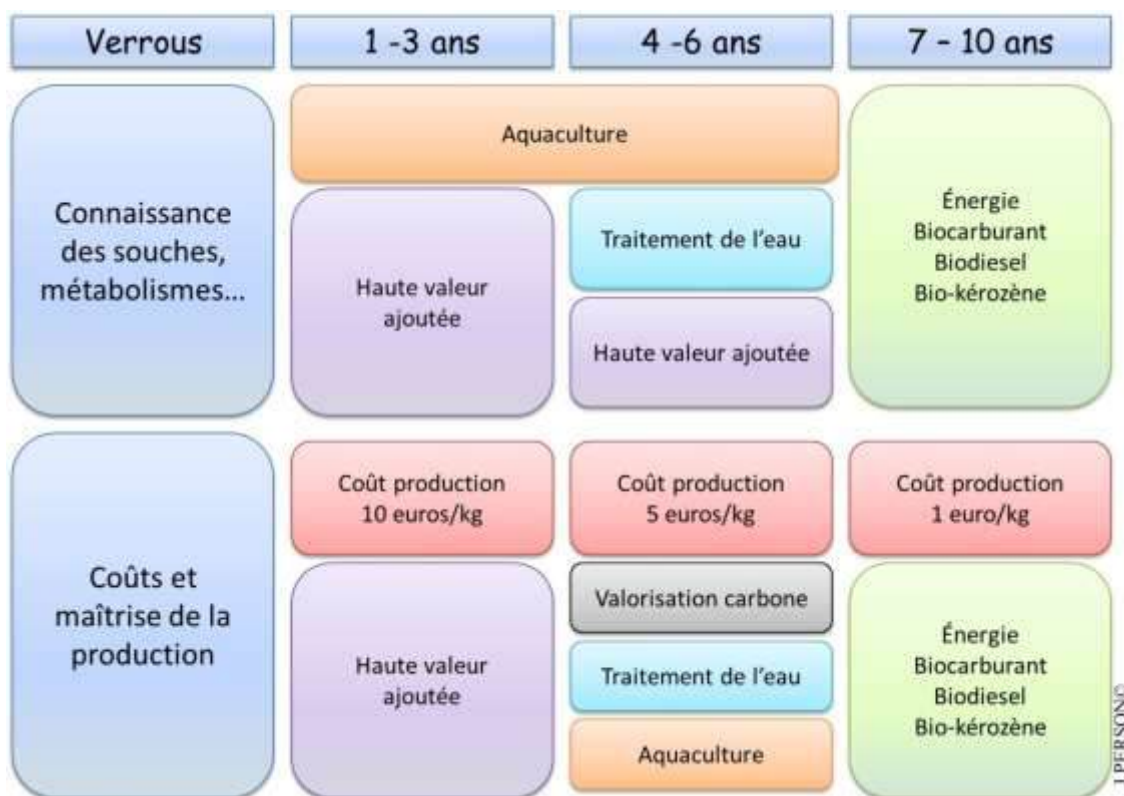


Figure 61 : Micro-algues, délais d'accessibilité des différents marchés en fonction des verrous levés.
(Source : Document du projet IEED GREEN STARS, modifié par nos soins)

2. Pour la filière macro-algues

Chaîne de valeur



Typologie d'acteurs intervenant dans l'étape



Verrous



Figure 62 : Macro-algues, un aperçu de la filière sur la chaîne de valeur.

Tableau 17 : Macro-algues, atouts et difficultés dans les marchés de la haute valeur ajoutée.

Secteurs	Applications, Potentiels	Atouts	Difficultés
Cosmétiques	Thalassothérapie Principes actifs Texturants	- Actifs naturels innovants - Forte diversité d'espèces et de molécules - Thalasso bien en place - Bonne image marketing - Marchés existants	-Renouvellement fréquent des actifs - Durabilité de l'exploitation de la ressource
Compléments alimentaires Nutraceutique	Minéraux Anti-cholestérolémiants	- Importantes qualités nutritionnelles (minéraux, fibres, protéines, vitamines) - Marchés existants	-Réglementation longue et compliquée - Disponibilité de la ressource
Santé humaine	Empreintes dentaires Tampons hémostatiques Immunostimulants	- Origine naturelle - fort potentiels diversité de molécules encore inexplorées	- Marché de niche, peu de volume
Alimentation humaine	Légume Texturant	- Qualités nutritionnelles - Ingrédient naturel - industrie colloïdes en place	-Réglementation longue et compliquée -Durabilité de l'exploitation de la ressource

Tableau 18 : Macro-algues, atouts et difficultés dans les marchés de masse.

Secteurs	Applications, Potentiels	Atouts	Difficultés
Environnement	Dépollution Détoxification	- Fixation métaux lourds - intérêt pour zones eutrophisées -Maitrise pollution eaux	- Étude d'impact à réaliser - Zones littorales protégées
Énergie	Bio-gaz Bioéthanol Biobutanol	- Biomasse humide - Technologie mature - Culture éolien off-shore - Pas de compétition avec surface agricoles	- Grandes surfaces nécessaires - Conflits d'usage - Études d'impacts manquantes
Aquaculture	Co-culture bivalves Élevage ormeaux & poissons	- Qualités nutritionnelles - Bien maîtrisée - Intérêt sanitaire	- Faiblesse de l'aquaculture métropolitaine
Alimentation animale	Bétail	- Co-valorisation - Minéraux + Fibres	- Durabilité de l'exploitation de la ressource
Agriculture	Engrais Phytosanitaire	- Bio-engrais - Bio-pesticides	- Durabilité de l'Exploitation de la ressource
Chimie verte Bio-matériaux	Intermédiaires Polymères	- Industrie des colloïdes en place	-Durabilité de l'exploitation de la ressource - Matière première non traditionnelle

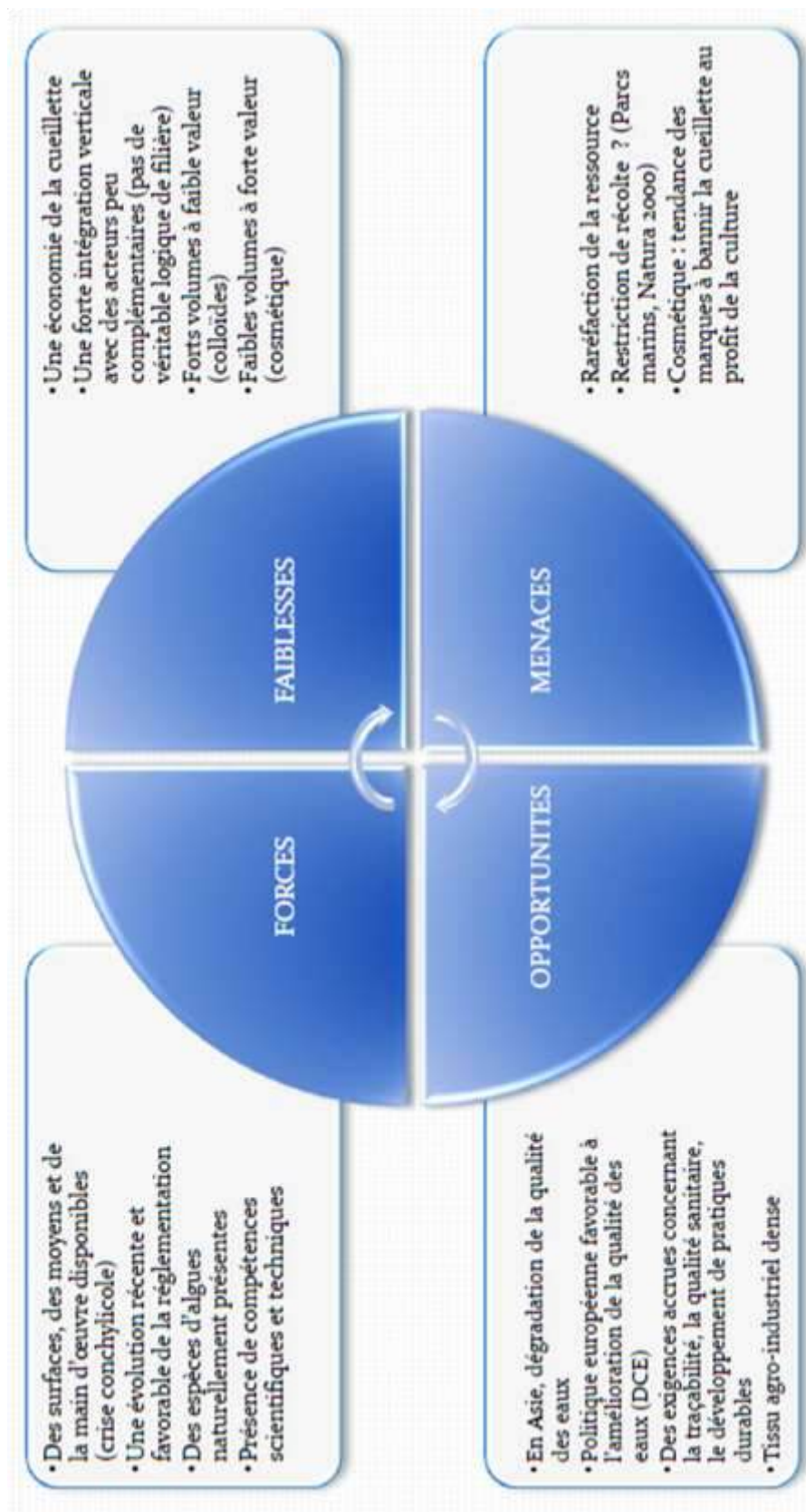


Figure 63 : Analyse SWOT de la filière macro-algues en France.
(Source : CEVA)

Feuille de route

Propositions stratégiques : Soutenir l'émergence et la compétitivité des filières algues en France

I. Réaliser l'état des lieux des filières algues et les caractériser en identifiant les verrous technico-économiques

- Objectifs :

- Identifier les différentes voies de valorisation des algues et les contraintes associées (coût, qualité et traçabilité du produit, impact environnemental, bilan énergétique...),
- Mettre en cohérence les coûts des produits issus des filières avec les marchés visés.

- Actions :

- Faire un état des lieux précis des filières existantes et en émergence en terme, d'acteurs (organismes de recherche, grands groupes, PME-PMI), de réglementation, de propriété industrielle, d'actions concertées déjà menées (exemple : feuilles de route de l'ANCRE, de l'Ademe pour les biocarburants, d'ALGOGROUPE) et de projets structurants (Net-Algae, Algasud, Atlanpole Blue Cluster, IDEALG...),
- Réaliser des études par filière : études de marché et études de faisabilité technico-économique (maturité de la filière, échéances de mise en œuvre de la filière concernée, besoins),
- Réaliser des feuilles de routes spécifiques à chaque filière : procédés à développer et efforts de R&D, cadre législatif, planification, marchés français, européen, mondial actuels et à l'horizon 2020,
- Réfléchir à la mise en place d'une bourse d'échange de produits/coproduits pour former une filière proche d'un concept de bioraffinerie : le coproduit d'un est peut-être le produit de l'autre. Recenser les expériences existantes en la matière, voir Espagne, Norvège...

II. Faire avancer le processus d'innovation pour lever les verrous technologiques

Cinq axes de travail ont été identifiés comme prioritaires.

A. Sélectionner les espèces puis les souches répondant aux besoins des filières

Objectif : Identifier-Optimiser des souches adaptées à l'exploitation industrielle.

Actions :

- Identifier les souchothèques publiques et privées, notamment dans les DROM COM,
- Structurer le réseau des souchothèques publiques et les outils permettant de les utiliser et de fiabiliser la ressource (accessibilité, traçage),
- Mettre en place un annuaire des laboratoires travaillant ou susceptibles de travailler sur le screening d'actifs food (nutraceutiques), feed, cosmétiques, et pharmaceutiques,

- Explorer la diversité des espèces ; encourager les projets de R&D sur la connaissance des espèces et leur biodiversité,
- Développer des technologies d'amélioration des souches,
- Séquencer les génomes et développer des modèles clefs.

B. Comprendre les mécanismes d'accumulation de composés d'intérêt

Objectif : Comprendre le lien entre les conditions du milieu, l'accumulation intracellulaire et la productivité globale.

Actions :

- Rechercher et étudier les conditions de forçage favorisant l'accumulation de composés d'intérêt,
- Identifier l'activité de gènes clés au cours de phases d'accumulation,
- Évaluer et optimiser l'effet de carences en milieu naturel (alternance jour/nuit, etc),
- Développer la connaissance sur la matière algale, de la production à la transformation,
- Proposer des prévisions de production, notamment en conditions extérieures en rapprochant les modèles de développement biologique de certaines algues dans des circonstances variables (situation normale, stress en nutriments, lumière variable,...) et la modélisation des phénomènes naturels (météo, ensoleillement,...). Conforter ces prévisions avec la réalité constatée,
- Développer une approche de biologie intégrative (étudier l'organisme dans son ensemble).

C. Améliorer les procédés de culture, de récolte et d'extraction, en optimisant leur productivité et en limitant leurs impacts.

Objectif : Augmenter la productivité en minimisant les coûts économiques, énergétiques, et l'impact environnemental et sociétal.

Actions :

- Réaliser une veille de propriété industrielle amont sur les procédés libres (provenant d'autres filières) et exploitables pour les filières algues,
- Développer les systèmes de production en fonction des filières, de la production en petits volumes (applications biotechnologiques), à la production à moyenne puis à grande échelle (applications énergétiques et agroalimentaires),
- Développer la culture intensive, notamment par l'optimisation de photobioréacteurs et la culture extensive par la maîtrise des facteurs climatiques impactant sur les cultures de plein champ,
- Développer l'automatisation, la métrologie, le contrôle, la mécanisation des procédés,
- Travailler sur des techniques durables de récolte et de traitement de la biomasse (extraction, purification), les mettre au point et les adapter aux différentes algues/souches,
- Améliorer la gestion des flux : eau, lumière, nutriments, CO₂, avec l'aide des modélisations numériques et travailler sur les procédés de recyclage des effluents.

D. Scaling up des procédés, analyse technico-économique et analyse d'impact

Objectif : Prédire de façon plus précise les taux de productivités réellement atteignables, les impacts et les coûts associés. Définir et valider les modèles économiques.

Actions :

- Étudier et évaluer la disponibilité, les performances et la toxicité des effluents liquides et gazeux industriels ou urbains en fonction des applications visées,
- Mettre en place des approches de lutte biologique intégrée pour limiter les contaminations biologiques (compétiteurs, prédateurs, virus),
- Développer des outils de suivi de culture (quantité et qualité), d'anticipation et de maîtrise du risque (être capable de détecter une infestation),
- Évaluer les risques et les impacts sur les écosystèmes naturels associés à la culture sur de grandes superficies de souches non autochtones ou sélectionnées génétiquement,
- Recueillir, compléter et valider les données pour l'Analyse du Cycle de Vie des systèmes de production à grande échelle.

E. Développer les synergies d'application : écologie industrielle et économie circulaire

Objectif : Tirer profit des « potentiels » des algues, en matière d'environnement et de traitement des déchets (liquides ou gazeux) pour le valoriser sur les marchés industriels adéquats.

Actions :

- Intégrer la culture d'algues au sein d'un écosystème industriel : traitement des effluents aqueux, récupération du phosphore, remédiation du CO₂ industriel...
- Intégrer les algues comme matière première possible dès la conception des procédés de « bio raffinerie » végétale développés pour d'autres agro-ressources sur le territoire.

III. Favoriser le développement des entreprises équiementières

Objectif : Disposer au niveau national de capacités industrielles pour construire des installations de production et de traitement des algues répondant aux différentes filières et marchés.

Actions :

- Développer les filières d'étude, de fabrication et d'installation de photobioréacteurs, de raceways, d'open pounds et de fermenteurs de grande dimension,
- Mettre en place des démonstrateurs pour lever les verrous technologiques de culture intensive et extensive à grande échelle. Développer des capteurs dédiés au suivi de ces cultures,
- Développer les outils de récolte et les installations de prétraitement des produits : séchage, broyage, conditionnement, ainsi que des installations et procédés de bioraffinage : écoextraction, transformation,
- Impliquer les équipementiers nationaux des autres filières dans les projets afin qu'ils puissent acquérir les compétences et les savoir faire pour la réalisation d'installations à grande échelle. Développer les prises de brevet sur les technologies.

IV. Travailler sur l'insertion des entreprises au sein du paysage environnemental et sociétal

Trois axes sont considérés comme prioritaires.

A. Identifier les contraintes réglementaires, les besoins en ressources et caractériser les verrous territoriaux

Objectifs : Connaître les emplacements potentiels pour les nouvelles entreprises et les contraintes liées à ces sites.

Actions :

- Apporter un soutien aux dossiers réglementaires (type loi sur l'eau, ICPE...),
- Définir les conditions d'implantation géographiques les plus adaptées : proximité de l'eau de mer, de l'eau douce, accès au foncier, ensoleillement, température, synergie avec des activités industrielles, agricoles, aquacoles...
- Identifier l'environnement technologique en amont : proximité de laboratoires, des entreprises, des effluents...
- Identifier l'environnement logistique en aval (utilisateurs finaux des produits) pour impacter au minimum le bilan CO₂ et environnemental,
- Recenser et localiser les sites de production soumis à des réglementations,
- Étendre ces critères aux DOM-TOM et à l'échelle mondiale (lagunes, zones hypersalées, etc.).

B. Évaluer et atténuer les impacts des entreprises

Objectif : Mettre en place une stratégie industrielle de développement durable.

Actions :

- Étudier l'acceptabilité environnementale (impacts potentiels sur les milieux naturels) et sociétale (faire face aux conflits d'usage potentiels) ; réfléchir à des méthodes de minimisation de l'impact environnemental,
- Mettre en place une harmonisation, sur les techniques et bases de données en ACV afin de pouvoir plus facilement établir une ACV pour chaque procédé et les chaînes de valeur industrielles envisagées.

C. Sensibiliser les organismes de formation aux besoins des industriels en ingénieurs et en techniciens

Objectif : Améliorer l'offre de formations et l'adéquation des compétences des diplômés aux besoins des filières.

Actions :

- Anticiper la demande des entreprises (techniciens, ingénieurs, doctorants),
- Mettre en cohérence les formations proposées avec la demande et les marchés,
- Développer les formations continues ou modules de formation pour les entreprises,
- Favoriser les échanges entre les établissements de recherche/formation et les industriels.

V. Soutenir la structuration des filières algues

Trois priorités ont été identifiées.

A. Créer des outils de R&D mutualisés

Objectif :

- Mettre en synergie les compétences des différents acteurs (académiques, industriels...),
- Offrir la possibilité technique aux porteurs de projet de transférer leurs technologies à l'échelle préindustrielle.

Actions :

- Favoriser la mise en place d'outils mutualisés, plateformes et démonstrateurs sur l'ensemble des étapes de la chaîne de valeur,
- Renforcer les banques de souches et d'extraits algaux,
- Utiliser de manière cohérente les appels à projets collaboratifs de l'État, des Régions et de l'Europe en s'appuyant sur les Pôles de compétitivité.

B. Favoriser la mise en commun d'outils de veille et de benchmark

Objectif : Renforcer l'utilisation par les entreprises et les laboratoires, des services supports à l'innovation présents dans les territoires.

Actions :

- Mettre en place une cellule de veille sur les brevets, les publications, les acteurs à l'échelle internationale (exemple étude de benchmark sur les clusters mondiaux travaillant sur les micro-algues lancée par les Pôles de compétitivité concernés),
- Renforcer la veille et la diffusion d'informations sur les appels à projets en s'appuyant notamment sur les Pôles de compétitivité,
- Développer un accompagnement et une stratégie sur la Propriété Industrielle,
- Aider aux démarches réglementaires et/ou toxicologiques (surtout pour l'alimentaire),
- Mobiliser les systèmes de l'innovation existants dans le soutien aux filières algues.

C. Identifier ou créer la structure adéquate qui représenterait les filières algues à l'European Algae Biomass Association (EABA)

Objectif : Répondre à un besoin d'un lieu de rencontre pour structurer, développer et animer les filières.

Actions :

- Identifier les structures existantes dans les filières macro- et micro-algues. Se mettre en relation avec l'EABA pour coordonner l'effort et travailler de façon concertée au niveau européen (collaborations, réponse aux appels à projets européens).

Annexes

I. Liste des projets labellisés par les pôles dans les filières algues

Tableau 19 : Projets Macro-algues

NOM du Projet	État avancement	Thématique/ Secteur	Objet	Porteur/ Coordinateur	Objectifs	Partenaires	Budget (M€)	Financement
ULVOLIGO	en cours /terminé	Cosmétique	Actifs cosmétiques marins extraits de l'Ulve	CEVA	L'ulve ou « laitue de mer » renferme des substances précieuses utilisables notamment en cosmétique. A la condition préalable de mettre au point le procédé enzymatique applicable à l'échelle industrielle qui permettra de produire les « oligo-ulvanes » et de les intégrer, après une phase de test, dans des produits pour la peau.	Station Biologique de Roscoff, Bioeurope	1,055	ANR 2007
ECOKELP	terminé	Écologie	avenir des forêts de laminaires et activité goémonière	SBR, Laboratoire « Adaptation et Diversité en Milieu Marin », CNRS-UPMC UMR 7144	Exploitation des laminaires menacée par la diminution de la ressource. Récoltes en forte baisse. Effet des changements climatiques et/ou des contraintes exercées par l'homme ? Étude poussée sur les évolutions d'un milieu très riche menacé dans sa biodiversité ; proposition de modèles de gestion durable d'un patrimoine naturel et d'une ressource économique essentiels	laboratoire « Végétaux Marins et Biomolécules », UMR 7139 CNRS-UPMC, - UMR Amure, - UBO-IFREMER, - IFREMER Brest, Station Marine de Wimereux, Parc Naturel Marin d'Iroise, Réserve Naturelle des 7 Îles, Danisco, CASEB Chili, Université Pontificale Catholique du Chili-Santiago ; Portugal, CCMAR, Université d'Algarve-Faro	1,899	ANR 2007
AQUACTIFS	en finalisation	cosmétique	cultiver des algues génétiquement identifiées pour la 'cosmétique bleue'	Agrimer	Sélection de plusieurs espèces de macro-algues pour leur potentiel de molécules actives, caractérisation génétique des molécules les plus prometteuses pour être produites en culture	SBR, C-Weed aquaculture, Biocéan	1,568	FUI , CT
WINSEAFUEL	en cours	Bioénergies	Production de macro-algues offshore	La Compagnie du Vent	production de macro-algues sur filières off shore, et valorisations en bioénergies et bioproduits	Aleor, Naskeo Environnement, CEVA, LBE, Elsa		ANR 2009

NOM du Projet	État avancement	Thématique/ Secteur	Objet	Porteur/ Coordinateur	Objectifs	Partenaires	Budget (M€)	Financement
CARPP	en cours	Culture	Production maîtrisée de l'algue rouge	Aleor		La Belle Fermanvillaise, Université de Caen Basse- Normandie, Syndicat Mixte pour l'Équipement du Littoral (SMEL)		?
DEEP OASES	en cours	biodiversité des océans		IFREMER Brest (environnement profond, microbiologie des environnements extrêmes)	Exploration de l'océan profond, étude des organismes (dont algues) adaptés à la toxicité des milieux. Développer des connaissances, amélioration des technologies de prélèvements et d'enrichissements des collections d'actifs marins (notamment pour valorisation dans domaine de la Santé)	SBR CNRS UPMC, Univ. Pierre et Marie Curie Paris, IUEM UBO, ESMISAB	6,722	ANR
SUDALAB	en cours/ terminé	algues alimentaires	maîtriser la qualité sanitaire de l'algue alimentaire en Bretagne	CEVA	à analyser et traiter les contaminants contenus dans l'algue alimentaire pour assurer la conformité du produit et le développement économique de la filière	Aléor/ Algaïa, Algues Services, Algues et Mer, Biocéan	0,187	DRAAF 2009
AGROGASOIL	en cours	bioénergies	production d'agrocarburant et biogaz à partir de sous- produits pêche/IAA et d'algues vertes	Le Floch Depollution	caractérisation du gisement des déchets existants et disponibles, mise en place de toute la chaîne de traitement, étude de l'opportunité énergétique sur différents mélanges de déchets, puis validation des méthodes de traitement et vérification de la qualité du biodiesel obtenu selon normes en vigueur	Moulin de la Marche, Monique Ranou, Biogas Nord, In Vivo Environnement, IDHESA, LEMAR- LEBHAM UBO, Biodimar-UBO	2,799	Oseo
AZOSTIMER	en cours	Agro fournitures	Production de fertilisants à base d'algues	AFI-Roullier		ForceA, Anaximandre, Laboratoire EVA, UMR INRA- Université de Caen, École supérieure de Chimie Rennes	3,8	FUI, CT

NOM du Projet	État avancement	Thématique/ Secteur	Objet	Porteur/ Coordinateur	Objectifs	Partenaires	Budget (M€)	Financement
ORMEAUX	en cours	Alimentation animale	développement de la filière des ormeaux et connaissance de l'espèce (alimentation Algues), diversification des entreprises ostréicoles vers l'algoculture et l'ormeau		nouvelle filière aquacole avec de belles perspectives économiques ; connaissance de l'espèce et chaîne alimentaire (algues), environnement, juvéniles sélectionnés, sains et résistants. Techniques d'élevage et d'approvisionnement en algues	Coquillages du Phare, Laboratoires LEMAR-LEBHAM-IUEM-UBO, Station de biologie marine-MNHN Concarneau, IFREMER La Tremblade, UMR CNRS 6521-UBO, Agrocampus Ouest-site de Begmeil	1,155	CT
VEGEAQUA	en cours	Alimentation animale	alimentation aquacole à partir de végétaux marins et terrestres	Écloserie Marine de Gravelines	introduire des ingrédients végétaux dans l'alimentation aquacole afin d'identifier les familles de poissons adaptées, ou adaptables, et d'évaluer la nécessité de développer des lignées génétiquement identifiées qui accepteront cette évolution. Associer génétique et nutrition pour parvenir à un produit satisfaisant en termes de qualité et de coût.	Les aquaculteurs bretons, la ferme marine du Douhet, les poissons du soleil, INRA Jouy en Josas-Rennes-StPée sur Nivelle-Sizun, Ifremer Brest-Palavas-Montpellier, SYSAAF	2,4	FUI, Oseo, CT
IDEALG	sélectionné	Biologie/ Biotechnologie/ Génomique	Biotechnologies pour la valorisation des macro-algues	Station Biologique de Roscoff	Valoriser la biomasse marine et sa diversité en développant notamment la biologie et la génomique des algues	UEB, UBO, UBS, Univ Rennes I, Univ Nantes, ENSC Rennes, AgroCampus Ouest, INRA, Ifremer, CEVA, C-Weed, Aleor, France Haliotis, Danisco, Bezhin Rosko	10	Investissements d'Avenir (Biotechnologies et Bioressources)

NOM du Projet	État avancement	Thématique/ Secteur	Objet	Porteur/ Coordinateur	Objectifs	Partenaires	Budget (M€)	Financement
CRAZY	en cours	biotechnologies	exploration des biopolymères de sucre	SBR	plate-forme de criblage moyen débit d'activités GH et PL sur une collection de polysaccharides et nouvelles enzymes de différentes origines (algues, plantes, bactéries...) pour leurs propriétés texturantes ou biologiques	NRA –BIBS-BIA Nantes, CEVA, IFREMER Biotechs et molécules marines, Univ. Méditerranée-AFMB, Univ.Evry val d'Essonne-LAMBE,	1,845	ANR 2008 Chimie des procédés pour le développement durable
LUTOR	labellisé, en instruction pour financement	agrofournitures	Nouveaux bioactifs d'origine marine (extraits d'algues et plantes halophytes) en agrofournitures	Timac AgrolInternational I-Groupe Roullier	nouveaux bioactifs d'origine marine (extraits d'algues et plantes halophytes) pour lutter efficacement contre les Orobranches	MAISADOURL Semences, - LBPV, Université de Nantes	2,65	(FUI 2011 envisagé)
NANOMERC	en cours	cosmétique	nanobiocharges d'Origine Marine produites par extrusion pour le contrôle de Rhéologie de Cosmétique	EPHYLA	Ces nano-biocharges, nées de l'alliage entre un extrait algal et une argile, permettent de stabiliser une émulsion (type crème ou lait) sans ajout de tensioactifs, qui peuvent être irritants vis-à-vis des peaux sensibles. Saut technologique par l'émulsion à froid	Lessonia, CNRS MPC IS2M, CEVA, CNRS GEPEA, UBS-LIMATB	1,737	Oseo, CT
ODONTOMER	en cours	cosmétique, pharmacie	nouvelle gamme de produits d'hygiène bucco-dentaire	YSLAB	valorisation d'actifs marins pour la production de produits d'hygiène bucco-dentaire et sans conservateurs	Algues et Mer, Univ Rennes 1 UPRES EA 1254, Univ.Rennes2 UPRES EA1274	0,479	Oseo, CT
ECOPAINT	terminé	actifs marins et ingénierie navale	peinture anti-fouling écologique à base de molécules marines	USTV/MAPIEM	Nouvelle génération de peintures marines à fonctionnalités antislissures et réduction de traînée hydrodynamique utilisant de nouvelles molécules actives et non-toxiques produites par certains organismes marins.	DCNS, IFREMER, BLANCOLOR	2,140	FUI

Tableau 20 : Projets Micro-algues

NOM du Projet	État avancement	Thématique/ Secteur	Objet	Porteur/ Coordinateur	Objectifs	Partenaires	Budget (M€)	Financement
SHAMASH	terminé	Bioénergies	Production de biocarburants par des micro-algues lipidiques	Équipe COMORE (INRIA)	Identifier et lever les verrous technologiques liées à la production de biocarburants à partir de micro-algues	LOV, LB3M, LM2P2, PBA, GPEB, Alpha biotech, PSA	2,6	ANR 2006
BIOSOLIS	terminé	Culture/ Bioénergies	Développement de photobioréacteurs solaires intensifiés pour la production de bioénergies	GEPEA	Développement de photobioréacteurs solaires à très haute productivité	LGCB, PROMES, Enki Innovation	1,8	ANR 2007
HYLIOX	terminé	Métabolique	Ingénierie enzymatique de l'hydrogénase pour une production photosynthétique d'hydrogène	BIP	déterminer les bases moléculaires de la sensibilité à l'oxygène des hydrogénases pour construire des hydrogénases recombinantes capables de fonctionner en présence d'oxygène	LB3M, LCCP, LCMBA, LBE/CSIC	2,2	ANR 2007
DIALOG	en cours	Enzymologie/ métabolisme	Lipides et Assimilation du CO ₂ par les diatomées	BIP	Étude des enzymes clés du métabolisme		0,15	ANR 2009
DEFFI	en instruction	Alimentation	Nouveaux aliments fonctionnels	University Medical Center of Groningen		ONIRIS, Alpha Biotech, CERELAB, EUROQUALITY, CAPSULAE, KALYS	7,5	Europe FP7
ALGOROUTE	en instruction	Bioénergies/ Chimie verte/ Alimentation/ Environnement/ Déchets	Mise au point de liants routiers à partir de micro-algues	LCPC		Université de Nantes (CEISAM), GEPEA, AlgoSource Technologies, Alpha Biotech	0,285	Région Pays de la Loire
WASTEBIOVAL	en instruction	Bioénergies/ Chimie verte/ Alimentation/ Environnement/ Déchets	Recyclage de déchets pour la production de micro-algues	University of Florence		AlgoSource Technologies	4	Europe FP7
BIOFAT	en cours	Bioénergies	Production de biocarburants par des micro-algues	ABENGOA	Démonstrateur de 10 ha de production de biofuels à partir de micro-algues	Univ Florence, Univ Ben Gurion, INRIA/Comore, AlgoSources Technologies	20	Europe FP7

NOM du Projet	État avancement	Thématique/Secteur	Objet	Porteur/ Coordinateur	Objectifs	Partenaires	Budget (M€)	Financement
AQUAFUELS	en cours	Bioénergies		European Biodiesel Board – EBB	Établir l'état de l'art des activités de R&D et de démonstration (pré-industrielle) de production de biofuels à partir d'algues ou de biomasse aquatique non alimentaire	Univ Florence, Diester Industrie, Univ Wageningen, Univ Ben Gurion, Univ Almeria, Irish Seaweed Centre, Roquette, Martin Ryan Institute, Univ Ghent, Algafuel, Imperial College of London, THE ACADEMY of SCIENCE of the CZECH REPUBLIC, STUDIO MARTINELLI	0,87	Europe FP7
LIPALG	en cours	Bioénergies	Production de lipides par micro-algues : diversité et influence des conditions de culture	GEPEA	Association de bancs de criblage haut débit de souches et d'étude en photobioréacteurs pour la recherche de souches pour la production de lipides d'intérêt énergétique	GEPEA, LB3M, CEMCA	0,11	ANR 2009
SUPRABIO	en cours	Chimie verte/ Alimentation/ Environnement/ Déchets	Raffinerie des ressources renouvelables : bois, paille, algues	Université d'Oxford	Production de micro-algues par recyclage des effluents d'une bioraffinerie intégrée. Fractionnement de la biomasse pour l'alimentation, et la chimie verte	AlgoSource Technologies, Borregaard Industries Ltd, Aalborg University, United Utilities Water PLC, Statoil ASA, BioGasol ApS, Biomass Technology Grup BV, Institut Max Planck, Institut Heidelberg, Algetech Industrier, Univ Manchester, GreenValue SA, Institut Wuppertal	18,9	Europe FP7
ALGO RAFFINERIE	en cours	Bioénergies/ Chimie verte/ Alimentation	Système intégré de raffinerie de micro-algues	INPT-LCA	Développement des technologies de bioraffinage des micro-algues pour une valorisation complète de la biomasse	AlgoSource Technologies, LGCB, GEPEA	0,73	ANR 2010
ALGOH2o	en cours	Bioénergies	Production biologique d'hydrogène à partir des micro-algues	LB3M	Optimisations génétiques, métaboliques, et procédé de la photobioproduction d'hydrogène par la micro-algue verte <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	LB3M, BIP, GEPEA, CEA Sacaly, LGCB	1,246	ANR 2010

NOM du Projet	État avancement	Thématique/ Secteur	Objet	Porteur/ Coordinateur	Objectifs	Partenaires	Budget (M€)	Financement
DIVHYDO	terminé	Bioénergies	Production biologique d'hydrogène à partir des micro-algues	LB3M	comprendre les bases moléculaires de la sensibilité à l'oxygène des hydrogénases en identifiant des enzymes présentant une sensibilité moindre à l'oxygène et en analysant les relations entre leurs séquences, leurs structures, leurs caractéristiques fonctionnelles et cette résistance	LEMIRE, BIP, IBS/LCCP, LMI	0,588	ANR 2006
SHAMASH PE	en cours	Bioénergies	Caractérisa- tion et test moteur de biocarburants micro-algues lipidiques	Alpha Biotech	Production de biocarburants à partir de micro-algues autotrophes	Alpha Biotech, Peugeot Automobiles SA, EADS, INRIA, M2P2, CIRAD	0,3	PSA/EADS/ INRIA/ALPHA BIOTECH
PHOTOBIOH2	terminé	Bioénergies	Production biologique d'hydrogène à partir des micro-algues	GEPEA	Production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables par voie photosynthétique et biomimétique	GEPEA, LB3M, LGCB, LCI, LCEMCA, CEA Saclay	0,72	ANR
SOLAR H2	En cours	Bioénergies	Hydrogène renouvelable à partir du soleil et de l'eau : biomimétisme moléculaire et génétique	Université Uppsala	produire de l'hydrogène renouvelable (H2) à partir de ressources environnementalement sûres	LB3M, BIP, Univ Genève, Univ Bielefeld, Univ Turku, ICIQ, Univ Berlin, Univ Bochum, Institut Max Planck, Univ Wageningen, Académie des Sciences Hongroise	5,5	FP7 : Programme ENERGY-2007- 3.5-01
DEFI-μALG	en instruction	Culture/ Bioénergies/ Chimie Verte	Plateforme de recherche en vue d'une production contrôlée et industrielle de micro-algues à grande échelle	GEPEA (Univ Nantes/CNRS...)	Mettre en place les opérations unitaires de l'exploitation industrielle solaire de micro-algues à grande échelle	GEPEA, LGCB, consortium industriel	--	Investissements d'Avenir (Démonstrateurs)
CRAZY	en cours	biotech	exploration des biopolymères de sucre	SBR	plate-forme de criblage moyen débit d'activités GH et PL sur une collection de polysaccharides et nouvelles enzymes de différentes origines (algues, plantes, bactéries...) pour leurs propriétés texturantes ou biologiques	NRA –BIBS- BIA Nantes, CEVA, IFREMER Biotechs et molécules marines, Univ. Méditerranée- AFMB, Univ.Evry val d'Essonne- LAMBE,	1,845	ANR 2008 Chimie des procédés pour le développement durable

NOM du Projet	État avancement	Thématique/ Secteur	Objet	Porteur/ Coordinateur	Objectifs	Partenaires	Budget (M€)	Financement
SYMBIOSE	en cours	Déchets/ Bioénergies	Étude et Optimisation du Couplage Micro-Algues- Bactéries Anaérobies pour la Production d'Énergie par Voie Biologique à partir de Biomasse Primaire et de Déchets Organiques	Naskeo Environnement	Adapter une production de micro-algues à un système de méthanisation pour compenser les variations d'intrants. Production de biométhane. Création d'un système fermé : recyclage des nutriments et du CO ₂ post- méthaniseur	LBE, Elsa, PBA, INRIA/Comore, Ecolag	2,5	ANR 2008
ALGOMICS	en cours	Métabolique	Études globales de la conversion et du stockage de l'énergie chez les micro-algues	LB3M		INSA Toulouse, CEA Grenoble, IBPC Paris, GENOSCOPE	1,621	ANR 2008
ALGOHUB	en cours	Alimentation	Une nouvelle filière au service de la nutrition et de la santé	Roquette Frères	Screenner les souches de micro-algues et identifier leurs potentialités sur les marchés de la santé et de la nutrition. Mise en place de culture en photobioréacteurs et extraction de molécules.	Greensea, Institut Paul Ricard, Bonduelle, Setubio, Eivalis, Patisfrance, Pierre Fabre, Groupe Glon, Institut Pasteur de Lille, Etap, Cellial, Algenics, Separex, Eco-solution	21,5	ISI 2008
PARALEX	en cours	algues et environnement	comment des micro- organismes pathogènes viennent à bout des marées rouges toxiques invasives	SBR	Identifier les parasites naturels présents dans des écosystèmes contaminés par des micro-algues invasives et toxiques afin de mieux comprendre leur rôle dans le rétablissement et la stabilité des écosystèmes marins côtiers.	Observatoire Océanologique de Banyuls, laboratoire Arago, UMR 7621; Ifremer Plouzané	2,09	ANR 2009
SALINALGUE	en cours	Bioénergies/ Alimentation/ Déchets	Production à grande échelle de micro- algues et mise en place d'une bioraffinerie	La Compagnie du Vent	Production de micro-algues extrémophiles sur de grandes surfaces. Bioraffinerie : valoriser l'ensemble de la micro-algue en molécule à valeur ajoutée, et en biodiesel. Remédiation du CO ₂ industriel.	Naskeo Environnement, IDEE Aquaculture, Air Liquide, LFSM, LM2P2, Green, LBE, Elsa, Tour du Valat, PBA, Comore	7,5	FUI 2009

NOM du Projet	État avancement	Thématique/ Secteur	Objet	Porteur/ Coordinateur	Objectifs	Partenaires	Budget (M€)	Financement
GREEN STARS	en instruction	Bioénergies/ Chimie verte/ Alimentation/ Environnement/ Déchets	Centre d'excellence mondial sur l'industrialisation des micro-algues et la production de bioénergies	INRA	Fédérer les équipes de R&D publiques et privées ; mettre en place un environnement d'excellence, avec des équipements du laboratoire au démonstrateur ; accélérer la levée des verrous technologiques et le transfert aux industriels	INRIA, UPMC, UM2, Veolia, Lafarge, PSA, La Compagnie du Vent, Fermentalg, Bioalgastral, Greensea, Naskeo Environnement	120	Investissements d'Avenir (Institut d'Excellence en Energies Décarbonées)
ALBIUS	en cours de finalisation	bioénergies, traitement des effluents	Production de micro-algues en photobioréacteurs couplée à une STEP	Bioalgastral	production de micro-algues à partir d'eaux en sortie de step, production de biofuel et biokérosène	Akuo, IGV	60	Investissements d'Avenir
TOPLIPID	labellisé, en instruction pour financement	Cosmétique, nutrition-santé	Développement à partir de micro-algues d'acides gras polyinsaturés dans la prévention de maladies chroniques et dégénératives, notamment des yeux	ARD-Soliance	culture de micro-algues riches en acides gras polyinsaturés pour lutter contre les effets du vieillissement, notamment maladies dégénératives du type DMLA (Dégénérescence Maculaire Liée à l'Age), Alzheimer, etc.	Yslab, Univ. Nantes EA2160 Mer Molécules Santé	0,866	instruction Oséo
VAMINC	labellisé, en instruction pour financement	cosmétique	des actifs marins apaiser l'inflammation neurogène cutanée	POLARIS	étudier, in vitro, les effets d'actifs marins sur l'inflammation neurogène cutanée : élancements, sensations de brûlures, de froid douloureux et picotements, grâce à un modèle de culture en laboratoire de neurones et de cellules de l'épiderme	Polymaris Biotechnology, Proclaim, CHU Morvan-UBO, Laboratoires dermatologiques d'Uriage	1,532	instruction en cours

NOM du Projet	État avancement	Thématique/ Secteur	Objet	Porteur/ Coordinateur	Objectifs	Partenaires	Budget (M€)	Financement
DEEP OASES	en cours	biodiversité des océans		IFREMER Brest (environnement profond, microbiologie des environnements extrêmes)	Exploration de l'océan profond, étude des organismes (dont algues) adaptés à la toxicité des milieux. Développer des connaissances, amélioration des technologies de prélèvements et d'enrichissement des collections d'actifs marins (notamment pour valorisation dans domaine de la Santé)	SBR CNRS UPMC, Univ. Pierre et Marie Curie Paris, IUEM UBO, ESMISAB	6,722	ANR
PAINTCLEAN	en cours	actifs marins et ingénierie navale	peinture anti- fouling écologique à base de molécules marines	NAUTIX	Pour limiter efficacement l'adhérence et la croissance des organismes indésirables, s'éliminer, salissures comprises, par l'effet de frottement de l'eau, sans effet toxique sur le milieu marin, les peintures antifouling de nouvelle génération se composeront de molécules actives, pour certaines d'origine marine	DCNS Brest, UBS-LBCM, Ifremer Brest, Centre de génie industriel Guidel	2,136	FUI
BIOPAINTROP	en cours	actifs marins et ingénierie navale	peinture anti- fouling écologique à base de molécules marines tropicales	ARVAM	recherche de nouvelles peintures antisalissures respectueuses de l'environnement en y intégrant des biomolécules issues des ressources marines tropicales de l'île de La Réunion. BioPainTrop permettra de proposer notamment aux entreprises de pêche de toute la zone intertropicale des peintures antifouling adaptées aux milieux marins tropicaux	NAUTIX, IPL Lille, Bioalgostral, LBCM-UBS, Univ Toulon (MAPIEM)	1,066	
SAFEOIL	en cours	Bioénergie	biocarburant à partir de micro-algues marines cultivées dans d'anciennes carrières de kaolin	SARP Industries	démonstrateur industriel de production de biodiesel à partir de micro-algues marines produites en bassins extérieurs	Imerys Ceramics France, Sodaf Geo Etanchéité, Ifremer Nantes, Audelcor	2,12	

NOM du Projet	État avancement	Thématique/ Secteur	Objet	Porteur/ Coordinateur	Objectifs	Partenaires	Budget (M€)	Financement
FISHBOX	en cours	Identification d'algues et de leur activité toxique	Automate de terrain pour la quantification spécifique de micro-organismes	CHRISAR	développement et validation d'un outil automatique de terrain pour l'identification et la quantification précise de micro-organismes (micro-algue, cyanobactérie,...) collectés sur filtres par analyse biomoléculaire TSA-FISH	IRD, ENSPC Paris, Université de Rennes I, VEOLIA, Mermec	3,100	FUI
SALTO	labellisé	algues et environnement, biotechnologies et biocapteurs	développement d'un système automatisé de surveillance des épisodes d'algues toxiques	Neotek- Ponsel	contrôle de la qualité et de la surveillance sanitaire des eaux littorales, anticiper les risques et protéger les populations et le milieu marin; nouvelles méthodes de description scientifique des micro-organismes (diagnose).	Dendris, Ifremer, Brest, CEA/SBTN, INSA Toulouse, Laboratoire LISE Paris-Jussieu, Univ.Nantes- LEMNA	4,026	

II. Programme du colloque (conférences et ART)

A. Mercredi 17 novembre 2010

13H00 – 13H30 : Accueil des participants

13H30 – 14H00 : Introduction – Allocution de Mr Alain GRIOT [MEEDDM]

Président de séance : Jack LEGRAND [CNRS – Univ de Nantes]

✿ État des lieux des filières algues dans le monde

14H00 – 14H45 : **Monde : « Algues : Une Opportunité Unique »**

Vikram PATTARKINE [Peace USA]

14H45 – 16H15 : **Europe**

Mario TREDICI [University of Florence – Italy]

Tapping the Algae Feedstock – Customized Cultivation Technology

Kai MUFFLER [University of Kaiserslautern –
Germany]

16H45 – 17H00 : **Présentation de la Technopôle Maritime du Québec**

✿ Etat des lieux des filières algues en France

17H00 – 17H55 : **Macro-algues**

Jean-François SASSI [CEVA]

Marché : réalités et perspectives

Besoins existants

Chaîne de production : techniques et coûts

Bilan ACV

17H55 – 18H50 : **La production de biomasse pour les marchés existants**

Philippe GRANVILLAIN [Greensea]

Marché : réalités et perspectives

Besoins existants

Dominique GRIZEAU [CNRS – Univ de Nantes]

Chaîne de production : techniques et coûts

Bilan ACV

18H50 – 19H45 : **Les perspectives de la filière micro-algues**

Jean-Paul CADORET [IFREMER]

Marché : réalités et perspectives

Besoins existants

Chaîne de production : techniques et coûts

Bilan ACV

B. Jeudi 18 novembre 2010

Ateliers de Réflexion Thématiques (ART) :

Coordinateurs : Antoine FINDELING [Veolia Environnement], Daniel MATHIEU [Trimatec]

08H30 – 10H00 : **ART1 : Les programmes de génomique fonctionnelle sur les algues: un atout pour les biotechs**

Laurent CURNAC [CEA – DSV]

La Génomique fonctionnelle, un atout pour la valorisation des macro-algues en biotechnologie

Catherine BOYEN [CNRS - Station biologique de Roscoff]

La Génomique fonctionnelle : une valeur ajoutée pour la biotechnologie des micro-algues

François-Yves BOUGET [Laboratoire Arago]

Vers une domestication des micro-algues pour la production d'énergie : rôle de la génomique fonctionnelle

Gilles PELTIER [CEA-DSV]

Propriété intellectuelle dans le domaine de la production d'énergie par les algues

Christian VINCENT [CEA-DSV]

10H30 – 12H00 : **ART2 : Culture et Récolte des Macro- et Micro-algues**

Jack LEGRAND [CNRS - Univ. de Nantes]

Olivier LEPINE [Alpha Biotech]

Production de macro- et micro-algues

Jean-Paul BRAUD [Innov'Alg]

Modélisation et optimisation de l'utilisation de la lumière en photobioréacteurs

Jérémy PRUVOST [GEPEA]

État de l'art sur la récolte des micro-algues: l'expérience du GEPEA sur les technologies membranaires

Matthieu FRAPPART [GEPEA]

Production de micro-algues par fermentation

Pierre CALLEJÀ [Fermentalg]

Valorisation d'effluents industriels pour la production de micro-algues

Olivier LÉPINE [Alpha Biotech / AlgoSource Technologies]

12H00 – 13H30 : **ART3 : Gestion des flux (énergie, nutriments...) / Extraction / Purification**

Jean-Paul CADORET [*Ifremer*]

Alexis RANNOU [*Soliance*]

Colette BESOMBES [*Univ La Rochelle*]

Hervé BALUSSON [*OLMIX*]

Pierre COLLET [*LBE INRA*]

Hervé LAIMEY [*HITEX*]

14H45 – 16H15 : **ART4 : Cosmétique et nutraceutique / Pharmaceutique / Agroalimentaire / Alimentation animale**

Frédéric BOUVIER [*Roquette Frères*]

Eric DESLANDES [*Univ Bretagne Occidentale*]

Jean-Paul BRAUD [*Innovalg*]

Aude CARLIER [*Algenics*]

Jean-Michel KORNPORST [*Univ. de Nantes*]

Marc VAN AKEN [*SBAE*]

16H45 – 18H15 : **ART5 : Production d'énergie et applications environnementales**

Olivier BERNARD [*INRIA*],

Anne-Sophie LEPEUPLE [*Veolia Environnement*]

Verrous scientifiques et technologiques

Marc ROUSSET [*CNRS*]

Jean-François SASSI [*CEVA*]

Bruno SIALVE [*Naskeo*]

Réalités industrielles : scale-up et production

Laurent BROMET [*SARP Industries*]

Frédérique FERREY [*Lafarge*]

Isabelle LOMBAERT-VALOT [*EADS*]

Günter WALENTA [*Lafarge*]

Complémentarité et interaction entre les filières

Jean-Paul CADORET [*IFREMER*]

Thomas LASSERRE [*Biocar, La compagnie du Vent*]

Jean-François ROUS [*Sofiproteol*]

18H15 – 19H00 : **Session posters**

C. Vendredi 19 novembre 2010

09H00 – 10H30 : ART6 : Chimie et Agromatériaux

Yannick LERAT [CEVA]
Pierre CALLEJA [Fermentalg]
Yves GROHENS [Univ. Bretagne Sud]
Nicolas MALANDAIN [ID Composite]
Gérard MIGNANI [Rhodia]
Jean-Marc PUJOL [Rhodia]

11H00 – 12H30 : Restitution et propositions issues des ART

Antoine FINDELING [Veolia Environnement]
Daniel MATHIEU [Trimatec]
Hélène GUYOT-MASSARI [Biotech.Info/
Bio.énergies]

14H30 – 16H00 : Vers la structuration des filières algues en France

Position des pouvoirs publics.

***Mise en perspective des propositions face aux grands projets
structurants français et mondiaux.***

Responsable Daniel THOMAS [IAR]

Avec la participation de

Gérard ANTONINI [ANR]
Pascal BARTHELEMY [IFP]
Pierre GALTIER [ADEME]
Jean-Marc GROGNET [DGCIS]
Marc ROQUETTE [Roquette Frères]

III. Posters scientifiques présentés

BERNARD Olivier [INRIA]

- Projet Shamash : production de biocarburant à partir de micro-algues

BONDU Stéphanie [UBO]

- D'une biomasse d'algue aux molécules bioactives : Purification de molécules à activités cytotoxiques et immunostimulantes à partir d'une algue rouge *S. chordalis*

BOUGARAN Gaël [IFREMER]

- Intégration d'outils moléculaires et biochimiques pour l'étude de la physiologie des micro-algues : Exemple du métabolisme azoté chez *Isochrysis affinis galbana*
- Amélioration de la productivité lipidique de *Isochrysis affinis galbana* par un processus de sélection-mutation

CLEMENT-LAROSIERE Barbara [LGPM]

- Valorisation du CO₂ par *Chlorella vulgaris*

DEGRENNÉ Benoit [Université de Nantes]

- Production de bioénergies par des micro-algues

DESLANDES Éric [UBO]

- Antioxidant and antitumoral activities of 31 Marine Algae from Brittany coasts (France)

FRAPPART Matthieu [GEPEA]

- Récolte de micro-algues par techniques membranaires : évaluation des performances de la filtration tangentielle et dynamique

GANZEL Guillaume [ESETA]

- Photobioréacteurs à micro canaux pour la production à grande échelle de micro-organismes photosynthétiques

HADJ-ROMDHANE Farid [GEPEA]

- Recyclage des milieux de culture de phytoplancton à très grande échelle

JAOUEN Pascal [GEPEA]

- Procédé de récolte de la cyanobactérie *Arthospira platensis* : Application au Spatial

JUBEAU Sébastien [GEPEA]

- Développement intégré de procédés pour la valorisation de la micro-algue *Porphyridium Cruentum*

LAURENTI Dorothée [IRCELYON]

- Biocarburant de 3^{ème} génération à partir de micro-algues

LE CHEVANTON Myriam [IFREMER]

- Sélection de souches bactériennes d'intérêt pour la culture de micro-algues

LEFRANC-MILLOT Catherine [Roquette]

- Lutein : resources and promises
- Roquette and microalgae : the synergy between an expert network and a huge health potential

LI-BEISSON [Université de Marseille]

- Production de lipides par les micro-algues

MAKHLOUFI Ilyes [Université du Maine]

- Valorisation des acides gras polyinsaturés à longue chaîne de la série n-3 (oméga 3) produits par des micro-algues marines

MARCHAL Luc [Université de Nantes]

- Système Intégré de Raffinerie de Micro-algues ALGORAFFINERIE

MARCHETTI Julie [IFREMER]

- Effet de la lumière bleue sur la composition biochimique et la réponse photosynthétique d'*Isochrysis affinis galbana*

MASSART Amaury [Université de Mons]

- Composition du milieu de culture de la micro-algue « *Chlorella vulgaris* » dans le but de concilier un taux de croissance élevé et une forte accumulation de lipides pour la production de biodiesel

MOHSINE Hoda [Université de Marrakech]

- Teneur en lipides totaux chez quelques espèces de micro-algues appartenant aux Chlorophycées, Bacillariophycées et Cyanobactéries : criblage en vue d'une utilisation dans la production des biocarburants.

PELTIER Gilles [CEA-DSV]

- Une plate-forme de biotechnologie des micro-algues pour la production d'énergie

PRUVOST Jérémie [GEPEA]

- Programme ANR-BIOSOLIS : Développement de photobioréacteurs solaires intensifiés en vue de la production à grande échelle de bioénergies par micro-organismes photosynthétiques
- Programme de recherche LipAlg (PI Énergie CNRS) : « Production de lipides par micro-algues : diversité et influence des conditions de culture. »
- Étude et modélisation des limitations cinétiques par le transfert de masse et la source de carbone sur la croissance de micro-organismes photosynthétiques (micro-algues – cyanobactéries) en photobioréacteurs
- Ingénierie des photobioréacteurs : présentation des activités du laboratoire GEPEA

SERIVE Benoît [*IFREMER*]

- Composition pigmentaire d'espèces phytoplanctoniques originales au moyen d'un procédé de dérégulation CLHP-UV DAD

SERREC Gaëlle [*Station Biologique de Roscoff*]

- Description du porphyran par hydrolyses enzymatiques spécifiques et analyse structurale des produits de dégradation.

SIALVE Bruno [*NASKEO*]

- SYMBIOSE : Étude et optimisation du couplage micro-algues – digestion anaérobie pour la production d'énergie par voie biologique à partir de biomasse primaire et de déchets organiques

SUBRA-PATERNAULT Pascal [*Université de Bordeaux*]

- Du CO₂ comprimé pour produire des extraits actifs à partir de sources marines

SYLVESTRE Julien [*Photofuel*]

- An introduction to AlgoSun Technology

VASSEUR Christophe [*Laboratoire ECOLAG*]

- Intérêts des consortia naturels dans la production de biomasse

IV. Liste des participants au colloque

NOM	Prénom	Organisme
ADAM	Fanny	GREEN - Université d'Avignon
AGOSTINI	Sylvia	Université de Corse
ALADJIDI	Grégoire	Demeter Partners
ALLAF	Karim	Université de La Rochelle LEPTIAB
ANTONINI	Gérard	ANR
ATTIA	Gwendoline	LA COMPAGNIE DU VENT GROUPE GDF SUEZ
AUDO	Mariane	CNRS laboratoire CEISAM
BALUSSON	Hervé	OLMIX
BARAONA	Patrick	Pôle Mer PACA
BARRAL	Katia	AIR LIQUIDE
BARTHÉLÉMY	Pascal	IFP Énergies nouvelles
BATAILLE	Laure	FERMENTALG
BAUDOUIN	Stanislas	Seprosys sas
BEAUCHART	Aurélie	Transferts LR
BEAUMONT	Guillaume	Agro-Biotech-Accélérateur
BELHAKEM	Mostefa	Université de Mostaganem
BELLAVANCE	Laurent	Technopole maritime du Québec
BEN AROUS	Juliette	Air liquide
BERNARD	Olivier	INRIA
BERNARDI	Thierry	BioFilm Control
BESOMBES	Colette	Université de La Rochelle LEPTIAB
BESSON	Alexandre	LISBP Toulouse
BLANC	Guillaume	CNRS
BLANCHER	Jérôme	Pôle de compétitivité TRIMATEC
BONDU	Stéphanie	BIODIMAR-UBO
BOUGARAN	Gaël	Ifremer Laboratoire Physiologie et Biotechnologie des Algues
BOUGET	François-Yves	CNRS
BOURTOURAULT	Olivier	Aléor SAS
BOUVIER	Frédéric	Roquette Frères
BOYEN	Catherine	CNRS
BRAUD	Jean Paul	Innovalg
BRICOUT	Stéphanie	EADS IW
BROMET	Laurent	Sté SARP Industries
BROSSAT	Maude	L'Oréal

NOM	Prénom	Organisme
BRUSSON	Jean Michel	Total
BRUYERE	Céline	CReeD- Veolia Environnement
BUENDIA	Jean	ADEBIOTECH
CABIGLIERA	Morgan	AllBiopharma
CADORET	Jean Paul	Ifremer
CAILLAT	Philippe	Roquette Frères
CALLEJA	Pierre	FERMENTALG
CAMUS	Nathalie	Gdf SUEZ
CARLIER	Aude	Algenics
CHAGVARDIEFF	Pierre	CEA
CHARTON	Michaël	INRA/INP-ENSIACET
CHOQUERT	Martine	MEDDTL
CLEMENT-LAROSIERE	Barbara	École Centrale Paris
COLLET	Pierre	LBE - INRA
COLLIN	Séverine	Institut Pasteur
COLOMBAN	François	DANONE RESEARCH
COMBES	Noémie	ADEBIOTECH
CONSTANS	Laure	Suez Environnement
CORDEVANT	Christophe	Eco-Solution
CORFA	Julie	Soliance
CORREC	Gaëlle	Roscoff CNRS
CORTIER	Anne	Roquette Frères
COURNAC	Laurent	CEA
COUTANCEAU	Emmanuelle	Crédit Agricole Private Equity
DA GAMA	Rafael	Seppic France
DANIEL	Jean-Claude	SCF/DCI
DARTEVELLE	Laurence	Station biologique de Roscoff CNRS
DE BAENE	Frédéric	Eco-Solution
DEJOYE	Céline	GREEN - Université d'Avignon
DELABRE	Karine	Veolia Environnement Recherche et Innovation
DELOBEL	Dominique	ALGAESTREAM SA
DEMAREST	Nicolas	Lebas Technologies
DEMERS	Serge	ISMER
DEREUX	Sandrine	Pôle de compétitivité Industries & Agro-Ressources
DESCHAMPS	Chantal	agence économique de Bretagne
DESLANDES	Éric	Université de Brest

NOM	Prénom	Organisme
DEVIGNE	Arnaud	Go avec Engineering
DORVEAUX	Xavier	Veolia
DUBLOC	Mathieu	ADEBIOTECH
DUFOUR-SCHROIF	Cosima	L'Oréal
DUMANGE	Boris	POLE IAR
DUMAS	Joëlle	GIP Genopole
DURAN	Elie	Phycosource
DURIEZ	Marine	indépendant
DUVAUCHELLE	Dominique	Eco-Solution
FEREY	Frédérique	Lafarge Centre de Recherche
FINDELING	Antoine	Veolia Environnement Recherche et Innovation
FLEURY	Sylvie	SAUR
FOUILLAND	Éric	CNRS ECOLAG
FOURAGE	Laurent	PROTEUS
FRAPPART	Matthieu	UMR CNRS 6144 GEPEA
FREMEZ-GARREAU	Alexa	Atlanpole
GALLIER	Jean Michel	EARL Transon
GALTIER	Pierre	ADEME
GANDOLFO	Robert	pole mer PACA
GANZEL	Guillaume	ESETA
GAUD	Marie	ITERG
GEA	Manuel	ADEBIOTECH / BM Systems
GENTY	Hélène	INRA transfert
GERAERT	Pierre-André	ADISSEO
GIRAUDEAU	Pascal	Ceris Ingénierie
GODARD	Alain	Collectis SA
GONTHIER	Marie Hélène	Technopole maritime du Québec
GOUPIL	Sébastien	Ministère de l'agriculture et de la pêche
GRANVILLAIN	Philippe	Greensea
GRAS	Emeric	Saint-Gobain
GRIGNON-DUBOIS	Micheline	Université Bordeaux 1
GRIOT	Alain	MEDDTL
GRIZEAU	Dominique	GEPEA
GROGNET	Jean-Marc	DGCIS
GROHENS	Yves	Université de Bretagne Sud
GROSLAMBERT	Sylvie	Université de Liège

NOM	Prénom	Organisme
GUERRINI	Olivier	GDF SUEZ Dir Rech & Innovation
GUILLARD	Marine	UTC
GUILLOU	Alain	CRBM
GUYOT-MASSARI	Hélène	Biotech.Info / Bio.énergies
HABOUZIT	Frédéric	INRA
HACHE	Jean	Adebiotech
HADJ-ROMDHANE	Farid	GEPEA CRTT Saint-Nazaire
HALLOUIN GUERIN	Florence	Atlanpole Blue cluster
HELAINÉ	Dominique	ENVIA Conseil
HERROUIN	Guy	POLE MER PACA
HILDEILFINGER	Jean-Claude	H & B Pharma-Biotech
HILDEILFINGER	Séverine	ADEBIOTECH
HISBERGUES	Michaël	Eco-Solution
HUCHET-CADIOU	Corinne	UMR U915 PFT CARDEIX
JAOUEN	Pascal	GEPEA UMR CNRS 6144
JOVIC	Marc	Veolia Environnement Recherche et Innovation
JUBEAU	Sébastien	Laboratoires GEPEA – Université de Nantes
KAMMOUN	Agnès	Atlanpole Blue Cluster
KORNPROBST	Jean-Michel	Université de Nantes
KUDLA	Bernard	Eco-Solution
LAEUFFER	Frédéric	TOTAL
LAFOUX	Aude	CARDIEX
LAIMEY	Hervé	HITEX
LANDO	Danielle	ADEBIOTECH
LANNOU	Grégory	Université de technologie de Troyes
LARAKI	Kenza	Océanopôle Tan Tan
LASSERRE	Thomas	Biocar, La compagnie du vent (Groupe GDF Suez)
LAURENT	Nadia	ESITPA, École d'Ingénieurs en Agriculture
LAURENTI	Dorothée	CNRS
LE CHEVANTON	Myriam	Ifremer Laboratoire Physiologie et Biotechnologie des Algues
LE SOURD	Frédéric	Station biologique de Roscoff CNRS
LECURIEUX	Laura	Pôle de compétitivité TRIMATEC
LEFRANC	Catherine	ROQUETTE FRÈRES
LEGENDRE	Anouk	X-TU Architectes
LEGRAND	Jack	GEPEA - CNRS
LEJARS	Laurent	Chambre agriculture du Loiret

NOM	Prénom	Organisme
LEMARCHAND	Simon	ADEBIOTECH
LEPEUPLE	Anne-Sophie	Veolia Environnement Recherche et Innovation
LEPINE	Gaspard	INRA
LEPINE	Olivier	Alpha Biotech
LERAT	Yannick	CEVA
LI-BEISSON	Youghua	SVBME / LB3M
LITZLER	Sophie	Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
LOMBAERT-VALOT	Isabelle	EADS Innovation Works
LOPEZ	Filipa	École Centrale Paris
LOREC	Joël	Eclosarium
LOUIS	Stéphanie	POLE IAR
LOZANO	Paul	CIRAD
LUCCHETTI	Aurélie	ESETA
LUCQUIN	Denis	SOFINNOVA PARTNERS
LUGUEL	Christophe	POLE IAR
LUMIA	Guy	CEA
LUTIN	Florence	EURODIA INDUSTRIE S.A.
MAGNES	Pierre	Firmus
MALANDAIN	Nicolas	ID Composite
MALINGE	Jean	total petrochemicals France
MARCHAL	Luc	Université de Nantes
MARCHETTI	Julie	Ifremer
MARLANGE	Romain	CEA
MARTY	Éric	Emertec gestion
MASSART	Amaury	Université du Mons-FPMs
MASSON	Christophe	Cosm
MATHIEU	Daniel	Pôle de compétitivité Trimatec
MENIN	Rudy	Biospringer
MENOURY	Émilie	Atlanpole Blue cluster
MIGNANI	Gérard	RHODIA
MODESTIN	Emma	éducation nationale
MOHSINE	Hoda	Faculté des sciences Semlalia, Marrakech.
MONTAGNE	Xavier	IFP Énergies nouvelles
MUFFLER	Kai	Institute of bioprocess Engineering university of Kaiserslautern
NORMAND-PLESSIER	France	Adebiotech
ORIEZ	Vincent	AlfaLaval sas

NOM	Prénom	Organisme
PANET	Micheline	CMEF
PASQUALINI	Vanina	Université de Corse (UMR CNRS SPE)
PATTARKINE	Vikram	Peace USA - USA
PELTIER	Gilles	CEA
PENCREAC'H	Gaëlle	MMS - IUT de LAVAL, Département Génie Biologique
PERES	Anthony	NATVENTI
PERRIER	Beatrice	PSA Peugeot Citroën
PICHOT	François Joseph	Parcs St Kerber
PIEN	Sébastien	SMEL
PIERRE	Stéphanie	AQUABIOMASS
POITRENAUD	Maelen	Veolia Environnement Recherche et Innovation
PORTAL-SELLIN	Rachel	Pôle Mer Bretagne
POTIER	Claire	Astek Grand Ouest
POTIER	Guy	Algues & mer
POUPON	Patrick	Pôle Mer Bretagne
PRIGENT	André	Bretagne Cosmétiques
PROUX	Vanessa	SUP'BIOTECH
PRUVOST	Gilles	CVG
PRUVOST	Jérémy	GEPEA – Université de Nantes
PRZYBYLA	Cyrille	Ifremer
PUJOL	Jean-Marc	Association Chimie du Végétal
RAMIREZ	Liz	IRCELYON
RANNOU	Alexis	Soliance
RENGEL	Ana	Armines-CEP
REUNAVOT	Mélanie	Agrocampus ouest
REVEAU	Guillaume	SAUR
ROMARI	Khjadidja	FERMENTALG
ROQUETTE	Marc	Roquette Frères
ROUS	Jean-François	Sofiproteol
ROUSSET	Marc	CNRS
ROUX	Sylvain	IUT Laval
SAGET	Sylvie	CEM21
SAHUT	Claire	CEA
SAINT-JEAN	Bruno	Ifremer Laboratoire Physiologie et Biotechnologie des Algues
SAMSON	Jérôme	Seventure Partners
SANCHEZ	Ivan	Air liquide

NOM	Prénom	Organisme
SASSI	Jean-François	CEVA
SCHILD	Mathias	PICOTY S.A.
SEKHER	Nadia	IFREMER
SENNELIER	Thomas	OSEO
SERGERE	J-Christophe	SETUBIO
SERIVE	Benoît	IFREMER
SIALVE	Bruno	Naskeo Environnement
SIAUT	Magali	Fermentalg
SIRVEN	Aude	Collectis SA
SOURDIVE	David	Collectis SA
SUBRA-PATERNAULT	Pascale	CNRS
SYLVESTRE	Julien	PhotoFuel SAS
THOMAS	Daniel	Pôle IAR
THOMAS	Yolène	VIGICELL
TRAMOY	Philippe	CBDM.T - Market & Business Intelligence
TREDICI	Mario	Université de Florence - Italie
TREMBLIN	Gérard	MMS Université du Maine
VAN AKEN	Marc	SBAE
VARELA	Joao	University of Algarve
VASSEUR	Christophe	CNRS ECOLAG
VAULOT	Daniel	CNRS
VERHOEST	Christelle	LABOREIEC
VIA ORDORIKA	Lorena	Aquatox
VIAN	Maryline	GREEN - Université d'Avignon
VINCENT	Christian	CEA/Direction des Sciences du Vivant
VOYATZAKIS	Ariane	Oseo
WALENTA	Günther	Lafarge Centre de Recherche
ZOUGHAIB	Assaad	Armines-CEP

V. Articles parus dans la presse suite au colloque « Algues : Filières du futur ! »





N° et date de parution : 20534 - 29/01/2011
 Diffusion : 300000
 Périodicité : Quotidien
 leMonde1_20534_4_9.pdf
 Site Web : <http://www.lemonde.fr>

Press index
 Page : 4
 Taille : 95 %
 163 cm2

ANDREW LLOYD & ASSOCIATES
 International Technology Markets
 Strategy and Communication

La filière française doit maintenant s'organiser

« LA FRANCE peut devenir un territoire référent sur les filières algues, à condition qu'elle s'organise vite. Faute de quoi, d'autres pays effectueront le saut technologique et industriel avant elle », soulignait l'association Adebiotech, lors d'un colloque organisé en novembre 2010.

Dans le domaine des biocarburants algaux, la France dispose en effet d'équipes de recherche de premier plan, au CNRS, à l'Institut de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer), au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) ou à l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria). En outre, elle est l'une des

plus actives en Europe en matière de brevets : ses chercheurs et ses ingénieurs en ont déposé pas moins de 120 en 2009.

Pourtant, regrette Adebiotech, « la collaboration entre les acteurs publics et privés est insuffisante ». « Les freins à l'innovation ne sont pas d'ordre scientifique ou technique, mais économique et réglementaire », note l'association.

« Les compétences sont là »

Pour Antoine Findeling, directeur du département des sciences du vivant de Veolia Environnement, la filière est arrivée à un tournant. « Les ressources doivent être mises en commun, plaide-t-il. Les compétences sont là. Ce qui

manque, c'est un démonstrateur industriel. »

Ce sera chose faite, avec le projet Salinalgue. Porté par la Compagnie du vent (GDF-Suez) et associant plusieurs centres de recherche, il vise à créer, sur des salines inexploitées du Midi de la France, une installation pilote de culture en milieu ouvert d'une microalgue locale, *Dunaliella salina*.

Les études doivent être lancées début 2011, pour parvenir, en 2013, à un premier démonstrateur, sur dix hectares. Puis, à partir de 2015, à une production préindustrielle, sur plusieurs centaines d'hectares, d'aliments pour animaux, de colorants et de biocarburants. D'un coût de 7,5 millions d'euros, ce pro-

gramme vient de recevoir un financement de 3,9 millions d'euros du Fonds unique interministériel (FUI), destiné à soutenir la recherche appliquée.

D'autres projets sont en préparation. Un des plus avancés, Safeoill, prévoit d'expérimenter une culture semi-industrielle de microalgues dans le Morbihan, dans un bassin sur substrat de kaolin.

Dans les prochaines années, plusieurs centaines de millions d'euros devraient être mobilisés dans ce secteur par les industriels, les organismes de recherche et les pouvoirs publics, dans le cadre des Instituts d'excellence pour des industries décarbonées. ■

P.L.H.

Algo-carburants, où en est-on en France ?

Posté par Frédéric DOUARD le 2/14/11 • Dans la catégorie Algocarburants

Article publié dans le magazine *Bioénergie Internationale* n°13 de février 2011.



Photo Innovalg à Bouin en Vendée

Le colloque « Algues et filières du futur » qui a été organisé par l'association ADEBIOTECH à Romainville près de Paris les 17, 18 et 19 novembre 2010, était le premier du genre en France. Il a

été l'occasion de faire le point sur les avancées, les verrous et les perspectives des filières macro et micro-algues. La manifestation qui a rassemblé 280 délégués chercheurs, industriels en place et start-up de biotechnologies n'était pas à 100% tournée vers les bioénergies. Malgré cela 35% des participants étaient originaires du secteur de l'énergie, ce qui démontre bien l'intérêt du sujet pour ces biocarburants de troisième génération que sont les algocarburants. Cet article est un condensé des discussions et a été rédigé à partir des notes prises par Adebiotech durant le colloque.

Un état des lieux des filières dans le monde a précédé les discussions.

Vikram Pattarkine de Peace-USA a commencé par rappeler que les algues sont une alternative aux diminutions des ressources pétrolifères, au réchauffement planétaire et à l'utilisation des plantes terrestres comme carburant. Il a ajouté que des millions ont été investis dans les filières à biocarburants de première génération et que cela a mener à la désorganisation de la filière alimentaire en 2008. Les biocarburants de seconde génération (forêt, Jatropha curcas, ...) ne peuvent selon lui pas résoudre non plus le problème de l'industrialisation de ce type de ressources. C'est la troisième génération, celle des algues, qui ouvre le plus de perspectives à ses yeux. Et le challenge est double aujourd'hui : l'extraction des lipides, qui peut être faite en une seule étape afin d'éliminer des coûts énergétiques importants, et l'utilisation des eaux usées. Il souligne enfin que la rentabilité requiert une proximité forte entre le traitement et les sites de production, et requiert l'optimisation à tous les niveaux. C'est à ces conditions que les algocarburants peuvent être viable sachant que le marché mondial à 2017 est évalué à 80 milliards \$.....

..... Lire la suite en commandant le magazine.

Bibliographie

I. Liens internet

<http://www.actu-environnement.com/ae/news/algues-algocarburants-depollution-11398.php4>

http://www.afd-ld.org/~fdp_bio/content.php?page=cara_plantes&skin=modi

<http://www.algaestream.com/1.aspx>

<http://www.climatebabes.com/documents/Algae%20market.pdf>

http://www.entrevoisins.org/aerien/energie_renouvelable_prototype/Pages/algues_carburant_avion.aspx

<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/012/i1092e/i1092e02a.pdf>

<http://www.journaldunet.com/economie/agroalimentaire/enquete/le-marche-du-pet-food-les-aliments-pour-chiens-et-chats-est-domine-par-nestle-et-mars/les-industriels-du-pet-food-se-lechent-les-babines.shtml>

<http://www.scribd.com/doc/35347678/carraghenanes>

<http://www.servicevie.com/bien-manger/guide-des-aliments/ingredients-pour-la-cuisson/agar-agar-gelose/a/1481>

http://fr.wikipedia.org/wiki/Acide_alginique

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Agar-agar>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Algoculture#Photobior.C3.A9acteurs>

http://fr.wikipedia.org/wiki/Algue#Classification_des_algues

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Carragh%C3%A9nane>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Filtration>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz%C3%A9ification>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Liqu%C3%A9faction>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Ulvane>

II. Documents

A. Présentations des intervenants du colloque

Les présentations issues du colloque « Algues : filières du futur ! », à la fois celles de l'état des lieux des filières algues dans le monde et en France, et celles présentées lors des divers ateliers de réflexions thématiques sont présentées dans l'annexe 3 dans la présentation du programme du colloque

B. Rapports et publications

- Abed, R.M.M., S. Dobretsov, K. Sudesh. (2008). "Applications of cyanobacteria in biotechnology." *Journal of Applied Microbiology* 106 (1) : 1–12
- Barrington, K., T. Chopin, S. Robinson. (2009). "Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine temperate waters". *Integrated mariculture: a global review*. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper* 529: 7–46.
- Benedetti-Cecchi, L., F. Cinelli. (1993) "Early patterns of algal succession in a midlittoral community of the Mediterranean Sea: a multifactorial experiment." *J Exp Mar Biol Ecol* 169: 15–31
- Benedetti-Cecchi, L., S. Nuti, F. Cinelli. (1996). "Analysis of spatial and temporal variability in interactions among algae, limpets and mussels in low-shore habitats on the west coast of Italy." *Mar Ecol Prog Ser* 144: 87–96
- Berg-Nilsen, J. (August 2006). "Production of Micro algae-based Products." *Nordic Innovation Centre*
- Bouvet, A. (2010). "État des lieux de la filière algues sur le quartier maritime de Paimpol : enjeux et perspectives." *Rapport de stage*
- Brennan, L. and P. Owende (2010). "Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and coproducts." *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 14(2): 557-577.
- Briand, X. & P. Morand. (1997). "Anaerobic digestion of *Ulva* sp. 1. Relationship between *Ulva* composition and methanisation." *Journal of Applied Phycology* 9: 511–524.
- Bruton, T., H. Lyons, Y. Lerat, M. Stanley, M. Bo Rasmussen. (February 2009). "A Review of the Potential of Marine Algae as a Source of Biofuel in Ireland." *Sustainable Energy Ireland*
- Cadoret, J.-P. et O. Bernard. (2008). "La production de biocarburant lipidique avec des micro-algues : promesses et défis". *Journal de la Société de Biologie*, 202 (3) : 201-211.
- Carlsson, A. S, J. B. Van Beilen, R. Möller, D. Clayton. (September 2007). "Micro- and Macro-algae: utility for industrial applications." *EPOBIO project*
- CEVA. (Novembre 2010). "Étude des potentialités industrielles des macrophytes marins des écosystèmes lagunaires de la Région Languedoc-Roussillon." *CEVA pour ALGASUD*
- Chisti, Y. (2007). "Research review paper - Biodiesel from microalgae" *Biotechnology Advances* 25: 294–306
- Chynoweth, D. (2002). "Review of biomethane from maritime biomass"
- Documents de soumission du Projet d'Institut d'Excellence en Énergie Décarbonée GREEN STARS. (2011)

- FAO Aquatic Biofuels Working Group. (July 2010). "Review paper Algae-based Biofuels: applications and co-products." FAO
- Ferrell, J., V. Sarisky-Reed, et al. (May 2010). "National Algal Biofuels Technology Roadmap." U.S. Department of Energy
- Florentinus, A., C. Hamelinck, S. de Lint, S. van Iersel. (January - April 2008). "Worldwide potential of aquatic biomass." Ecofys Bio Energy group, Copyright Ecofys 2008
- Fulks, W. and K. Main (1991). "Rotifer and Microalgae Culture Systems. Proceedings of a US-Asia Workshop, Honolulu Hawaii." The Oceanic Institute, Honolulu Hawaii
- Gunaseelan V.N. (1997). "Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review." Biomass and Bioenergy **13** (1-2), 83-114
- Marfaing, H. (Novembre 2010). "L'algue alimentaire : une réglementation stricte pour un aliment d'avenir." Option Qualité **298**: 15-20.
- Milner, H.W. (1953). "Outdoor mass-culture units: rocking tray." In: Burlew, J.S. (Ed.), Algal Culture from Laboratory to Pilot Plant. Carnegie Institution, Washington, DC, No 600, p. 108-113
- Mollo, P., M. Deniel. (Mai 2010). "Du Plancton dans l'alimentation." Les Lettres d'info Valorial, Nutrition et Santé. No. 36
- Perez, R. (1997). "Ces algues qui nous entourent : conception actuelle, rôle dans la biosphère, utilisations, culture." IFREMER
- Person, J. (2009). "Coûts de production des micro-algues : Étude et amélioration." Rapport de stage Nutrocéan-ISMER
- Raymundo-Piñero, E., M. Cadek, F. Béguin. (2009). "Tuning carbon materials for supercapacitors by direct pyrolysis of seaweeds." Advanced Functional Materials **19** (7) : 1032-1039
- Sassi, J.-F. (2009). "Industrial Applications of Algal Polysaccharides." CEVA
- Sialleli, J., S. Roy. (Décembre 2010). "L'utilisation des micro-algues pour la production de biocarburants en Allemagne." Ambassade de France en Allemagne
- TecKnowMetrix. (Novembre 2010). "Données marché dans le secteur des micro-algues." TecKnowMetrix pour ALGASUD
- Vergara-Fernandez A, G. Vargas, N. Alarcon, A. Velasco. (2008). "Evaluation of marine algae as a source of biogas in a two-stage anaerobic reactor system." Biomass Bioenergy **32**(4):338-344.
- Whistler, R. L., J. N. BeMiller. (1993). "Industrial Gums: Polysaccharides and Their Derivatives." Third Edition. Academic Press, Inc

RÉSUMÉ

Le livre turquoise répond à une volonté soutenue par les pôles de compétitivité et les ministères de poursuivre la dynamique lancée par le colloque « Algues : filières du futur ! » organisé par Adebiotech qui avait réuni plus de 250 acteurs en novembre 2010 dans les locaux de Biocitech.

La première partie est consacrée à l'analyse de l'état des lieux scientifiques et techniques des filières micro-algues et macro-algues en France. Les principaux marchés et applications actuels et potentiels sont identifiés. La participation d'experts internationaux (USA, Canada et Europe) a permis de recueillir des témoignages sur la situation de la filière Algues à l'étranger.

La seconde partie présente les perspectives issues des diverses réflexions menées lors du colloque, consolidées par un travail de fond poursuivi avec les acteurs des filières. L'identification des verrous scientifiques, techniques et économiques de chaque filière a été réalisée, renforcée par l'analyse du contexte français actuel.

Cette concertation collective et fédératrice aboutit à la rédaction d'une feuille de route qui synthétise les différentes propositions stratégiques concrètes, validées par l'ensemble des acteurs. Elle est élaborée dans le but de développer, de structurer et de pérenniser les filières algues en France. La concertation a montré aussi la volonté de tous à collaborer pour augmenter la visibilité de ces filières.

ABSTRACT

The Turquoise book is driven by the competitive clusters and state departments to build upon the momentum initiated by the symposium "Algae: sector of the Future". This event was organized by Adebiotech and gathered over 250 participants at Biocitech premises in November 2010.

The first part of the document is devoted to the analysis of the scientific and technical state of the art of microalgae and macroalgae sectors in France. The existing and potential markets and applications are identified. The participation of international experts (U.S., Canada and Europe) has provided accounts on the situation of algae sectors abroad.

The second part presents the perspectives stemming from the various discussions held during the symposium, and consolidated substantial contributions from stakeholders in the sector. The identification of scientific, technical and economic bottlenecks for each sector is carried out and reinforced by the analysis of current French context.

This dialogue leads to the drafting of a roadmap summarizing the various policy proposals, validated by all stakeholders with the aim to develop, structure and sustain the algae sectors in France. The consultation also demonstrates the willingness of all members to work together in order to increase the visibility.