



HAL
open science

Évaluation du gisement potentiel de ressources algales pour l'énergie et la chimie en France à horizon 2030

Guillaume Kerlero de Rosbo, Olivier Bernard

► **To cite this version:**

Guillaume Kerlero de Rosbo, Olivier Bernard. Évaluation du gisement potentiel de ressources algales pour l'énergie et la chimie en France à horizon 2030. [Rapport Technique] ADEME. 2014, pp.164. hal-01102032

HAL Id: hal-01102032

<https://inria.hal.science/hal-01102032>

Submitted on 11 Jan 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉVALUATION DU GISEMENT POTENTIEL DE RESSOURCES ALGALES POUR L'ENERGIE ET LA CHIMIE EN FRANCE A HORIZON 2030

Juillet 2014

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par
ENEA Consulting et INRIA

Contrat n°1301C0033

Coordination technique : Aude-Claire HOUDON / Alice GUEUDET Service Bioressources –
Direction Productions Energies Durables – ADEME Angers



RAPPORT FINAL

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée sous la supervision et avec la participation active d'acteurs français référents sur le sujet, tant dans l'administration que le secteur de la recherche et l'industrie :

- ADEME
 - Aude-Claire Houdon, Direction Energies et Productions Durables, Service Bioressources, biocarburants avancés en charge du suivi de la mission
 - Alice Gueudet, Direction Energies et Productions Durables, Service Bioressources, chimie et matériaux biosourcés, en charge du suivi de la mission
 - Bruno Gagnepain, Direction Energies et Productions Durables, Service Bioressources, biocarburants
 - Aicha El Khamlichi, Recherche & Prospective / Recherche et Technologies Avancées (RTA) / CCSV
 - Claire Delalande, Direction villes et territoires durables, Service Friches urbaines et Sites pollués
 - Thomas Eglin, Direction Energies et Productions Durables, Service Agriculture et Forêts
 - Jean-Christophe Pouet, responsable du Service Bioressources
- AIRBUS : Yohan Allouche, Responsable projets de recherche carburants
- CIMENT CALCIA (Italcementi): Christophe Lombard, Département R&D, Chef de projet CO₂
- FRANCE AGRIMER : Tarek Mhiri, Direction Marchés, études et prospective, Service Evaluation, prospective, analyses transversales, Chef de l'unité Analyses transversales
- GrDF : Anthony Mazzenga, Chef du pôle Stratégie
- LA COMPAGNIE DU VENT : Thomas Lasserre, Responsable du pôle Bioénergies

Les auteurs tiennent également à remercier les personnes suivantes pour leur contribution à l'étude :

Philippe Potin - Station Biologique de Roscoff et Université Européenne de la Bretagne
Raymond Kaas – IFREMER
Laura Lecurieux-Belfond – Pôle TRIMATEC

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

A PROPOS D'ENEA CONSULTING

ENEA Consulting est une société de conseil de 25 personnes, spécialisée sur la transition énergétique et le développement durable.

ENEA accompagne les leaders de l'industrie, les institutionnels, les investisseurs, les équipementiers et les entrepreneurs, en France et dans le monde. ENEA intervient en conseil stratégique, en conseil à l'innovation, en accompagnement aux projets ainsi qu'en tant qu'expert sur ses sujets : énergies renouvelables, stockage d'énergie, captage et valorisation du CO₂, efficacité énergétique, hydrogène, accès à l'énergie et bioénergies.

Sur les bioénergies en particulier, ENEA a développé son expertise sur les algues et micro-algues, la méthanisation, la gazéification et la production de biocarburants. En travaillant à la fois sur les gisements, les technologies de production, les vecteurs d'utilisation et leurs marchés, ENEA a développé une profonde connaissance de ces filières.

Depuis 2007, ENEA œuvre également pour l'accès à l'énergie dans le monde, via des missions d'accompagnement pro bono au profit d'acteurs sociaux (2000 jours de conseil, 50 missions, 20 pays, 15 études en diffusion libre). Au-delà d'un engagement éthique et d'un souhait de contribuer au développement, ce modèle créé du sens et de la valeur, force à l'innovation et fédère les équipes.

A PROPOS D'INRIA – BIOCORE

BIOCORE (Biological control of artificial ecosystems) est une équipe-projet commune à INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique - Unité de Recherche de Sophia-Antipolis), l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique - sites de Sophia Antipolis et LBE Narbonne) et l'UPMC/CNRS Laboratoire Océanographique de Villefranche sur mer (LOV).

Le but global de BIOCORE est de contribuer à préserver l'environnement, en développant de nouvelles sources d'énergie, en évitant la pollution des eaux ou l'utilisation de produits chimiques pour les cultures. Dans cette optique, l'objectif est d'appliquer et de développer des méthodes de l'automatique (modélisation, identification, estimation, régulation, contrôle optimal, théorie des jeux) et de la théorie des systèmes dynamiques aux écosystèmes artificiels.

Auteurs :

Guillaume KERLERO de ROSBO – Chef de projet, ENEA Consulting
Olivier BERNARD – Directeur de recherche, INRIA

Contributeurs :

Francis MAIRET – Chargé de Recherche, INRIA
Monique RAS DE MONCUIT – Chargée de Recherche, Station Biologique de Roscoff
Ghjuvan GRIMAUD – PhD INRIA
Etienne DELCLAUX – Ingénieur INRIA
David REY – Ingénieur de recherche, INRIA
Luc PAYEN – Consultant, ENEA Consulting

SOMMAIRE

Glossaire.....	7
Introduction	9
Contexte	9
Objectifs de l'étude	10
Résumé de l'étude.....	11
1 Les algues et leurs applications.....	23
1.1 Les micro-algues	23
1.2 Les macro-algues	25
2 Les chaînes de production et de transformation des algues	29
2.1 Les micro-algues	29
2.1.1 Technologies de culture des micro-algues	31
2.1.2 Technologies de récolte et concentration.....	34
2.1.3 Technologies de séchage.....	36
2.1.4 Technologies d'extraction	38
2.1.5 Technologies de post-traitement.....	41
2.2 Les macro-algues	44
2.2.1 La culture et récolte des macro-algues	45
2.2.2 Technologies de pré-traitement et d'extraction.....	48
2.2.3 Technologies de post-traitement pour une production de biocarburants.....	48
2.3 Conclusion	51
3 État des lieux des filières algales : marchés et acteurs.....	53
3.1 La filière micro-algues.....	53
3.1.1 Les micro-algues dans le monde.....	53
3.1.2 Les micro-algues en France	63
3.1.3 Estimation des tailles de marchés potentiels pour les micro-algues françaises à 2030.....	65
3.2 La filière macro-algues.....	67
3.2.1 Les macro-algues dans le monde.....	67
3.2.2 Les macro-algues en France.....	70
3.2.3 Estimation des tailles de marchés potentiels pour les macro-algues françaises à 2030.....	75
4 Potentiel physique de production et de valorisation des algues en France à horizon 2030..	76
4.1 Méthodologie employée	76
4.1.1 Estimation du potentiel physique maximum de production de biomasse algale	77
4.1.2 Couches limitantes utilisées et hypothèses retenues	83
4.1.3 Cas particulier des DOM-COM	87
4.1.4 Du potentiel « biomasse » au potentiel « produits »	89
4.1.5 Modulation par l'analyse des marchés.....	89
4.1.6 Synthèse comparative et valeur ajoutée de la présente approche par rapport à l'état de l'art.....	90
4.2 Potentiel des micro-algues – Résultats et analyses.....	91
4.2.1 Potentiel physique maximum de production de biomasse	91

4.2.2	Potentiel physique maximum pour les produits micro-algaux	99
4.2.3	Comparaison des potentiels « physique » et « marché » pour les différents produits micro-algaux (hors carburants).....	102
4.2.4	Scénarios de co-valorisation et de développement de bio-raffineries.....	104
4.3	Potentiel des macro-algues – Résultats et analyses.....	106
4.3.1	Potentiel physique maximum de production de biomasse macro-algale	106
4.3.2	Potentiel physique maximum pour les produits macro-algaux et comparaison avec les tailles de marché ..	109
5	Conclusions générales sur le potentiel des filières algales françaises	111
	Le potentiel des micro-algues	111
	Un potentiel physique en biomasse substantiel...à modérer.....	111
	Pour la production de biocarburants 3G : un potentiel élevé, un enjeu sur les ressources en azote	112
	Pour la production de produits non-énergétiques.....	112
	Le potentiel des macro-algues	113
	Du potentiel théorique à une réalité pour 2030.....	113
	Pour aller plus loin : la nécessité d'une analyse complémentaire centrée sur les coûts de production et la future compétitivité des produits algaux	114
	Des besoins en R&D pour accéder à la maturité technico-économique.....	114
	Bibliographie	116
	Annexe 1 – Arbres technologiques	122
	Annexe 2 - Principaux projets français de R&D	127
	Sur les micro-algues	127
	Sur les macro-algues.....	132
	Annexe 3 – Analyse des marchés des produits algaux non énergétiques.....	134
1	Produits micro-algaux	134
1.1	Alimentation et nutrition humaine.....	135
1.1.1	Oméga 3	135
1.1.2	Algues entières comme compléments alimentaires	138
1.1.3	Pigments comme colorants alimentaires	141
1.2	Alimentation animale	143
1.2.1	Alimentation des poissons (aquaculture).....	143
1.2.2	Aliments pour autres animaux (volaille, bétail)	145
1.2.3	Additifs alimentaires pour autres animaux (volaille, bétail).....	147
1.3	Chimie verte	149
1.3.1	Plastiques bio-sourcés.....	149
1.3.2	Autres applications en Cosmétique et Pharmaceutique	151
2	Produits macro-algaux	153
2.1	Algues légumes.....	153
2.1.1	Analyse du marché algal.....	153
2.1.2	Synthèse des hypothèses de potentiel retenues pour ce(s) marché(s).....	153
2.2	Colloïdes algaux.....	155

2.2.1 Analyse du marché algal.....	155
2.2.2 Synthèse des hypothèses de potentiel retenues pour ce(s) marché(s).....	156
Annexe 4 – Sélection des terrains éligibles à la culture des algues	157
Annexe 5 – Synthèse méthodologique comparative et valeur ajoutée de la présente étude	159
Annexe 6 – Règles de conversion des tonnages de biomasse en tonnages de produits algaux .	162

Glossaire

AGPI	Acides Gras PolyInsaturés (PUFA en anglais)
AGV	Acides Gras Volatiles
ALA	Acide α -linoléinique (omega 3)
ARA	Acide arachidonique (omega 6)
B2B	<i>Business to Business</i> (commerce réalisé entre entreprises),
B2B2C	<i>Business to Business to Customer</i> (commerce réalisé entre entreprises mais où le client final, généralement un particulier, joue un rôle important dans l'expression du besoin)
BDD	Base de données
CAPEX	Coûts d'investissement (de l'anglais <i>Capital Expenditures</i>)
CO ₂	Dioxyde de carbone
DCO	Demande Chimique en Oxygène
DHA	Acide Docosahexaénoïque (omega 3)
EPA	Acide Eicosapentaénoïque (omega 3)
ETBE	Ethyl tertio-butyl ether
GES	Gaz à Effet de Serre
GLA	Acide γ -linoléinique (omega 6)
H ₂ S	Sulfure d'Hydrogène ou hydrogène sulfuré
HVA	Haute Valeur Ajoutée
HVO	<i>Hydrotreated Vegetable Oils</i>
IREP	Registre français des émissions polluantes
ISDND	Installation de Stockage des Déchets Non Dangereux
JV	<i>Joint Venture</i> (entreprise commune entre deux entreprises ou plus)
MS	Matière Sèche
MVA	Moyenne Valeur Ajoutée
M&HVA	Moyenne et Haute Valeur Ajoutée
OP	Open Pond ou Bassin ouvert
OPEX	Coûts d'opération (de l'anglais <i>Operational Expenditures</i>)
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PET	Polyéthylène
PBR	Photobioréacteur
PHA	PolyHydroxyAlcanoate
PLA	Poly-acide lactique (de l'anglais <i>Poly-Lactic Acid</i>)
PUFA	PolyUnsaturated Fatty Acids (AGPI en français)
REACH	Registration, Evaluation, Authorization and restriction of Chemicals
R&D	Recherche et Développement
RW	Raceway
SIG	Système d'Information Géographique
STEP	Station d'épuration

TCLC	Taux de Croissance en Lumière Continue
TGD	Triglycérides
UIC	Union des Industriels de la Chimie
$\omega 3$	Omega-3
ZEE	Zone Economique Exclusive

Introduction

Contexte

Face aux enjeux environnementaux et climatiques, des alternatives à l'utilisation des ressources fossiles sont recherchées, tant pour la production de carburants que de produits chimiques. Une des alternatives attirant le plus d'attention consiste à utiliser directement la biomasse (matière organique végétale) comme source d'énergie et de molécules chimiques sans attendre sa fossilisation géologique en hydrocarbures.

Le développement en parallèle des différents usages de la biomasse (alimentation, matériaux, chimie, énergie...) pose cependant des questions sur la disponibilité des différentes ressources végétales à court, moyen et long terme.

L'approche adoptée jusqu'à présent consistait à développer les cultures agricoles pour la production de biocarburants dits de première génération. La Commission Européenne souhaite aujourd'hui restreindre la conversion de terres en cultures destinées à la production de biocarburants et accroître les effets bénéfiques pour le climat des biocarburants utilisés dans l'Union européenne. Mi-octobre 2012, elle a proposé de limiter la part des biocarburants de première génération à 6 % dans l'atteinte de l'objectif de 10 % d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale des transports en 2020. Le but est de contribuer à stimuler le développement d'autres biocarburants, dits avancés, dont les émissions de gaz à effet de serre devront être nettement inférieures à celles des combustibles fossiles et qui n'interféreront pas directement avec la production alimentaire mondiale.

L'ADEME, en accord avec sa propre feuille de route et dans la lignée de la politique Européenne, souhaite promouvoir des solutions dont l'impact sur le climat serait encore amélioré, et pour lesquelles les impacts liés à l'occupation des sols et aux conflits d'usage, sur l'alimentation et la déforestation en particulier, soient réduits.

Dans ce contexte, les algues présentent un potentiel particulièrement intéressant. Comme les autres biomasses, les algues présentent une composition biochimique permettant des applications dans l'alimentaire, la production de carburants (dits alors de 3^{ème} génération) ou encore de molécules d'intérêt pour la chimie, la pharmacologie ou la cosmétique. Les principaux avantages des algues sur les autres biomasses sont les suivantes :

- Une productivité bien supérieure aux plantes terrestres, notamment en raison de leur cycle reproductif plus court.
- La possibilité de développer de nouveaux usages pour la biomasse sans créer de tension sur les marchés des matières premières alimentaires.
- La possibilité de cultiver les algues en mer ou sur des terres non arables sans compétition non plus avec l'alimentation pour l'usage des sols.
- La possibilité de rendre des services environnementaux parallèlement à leur production : traitement des eaux et valorisation du CO₂.

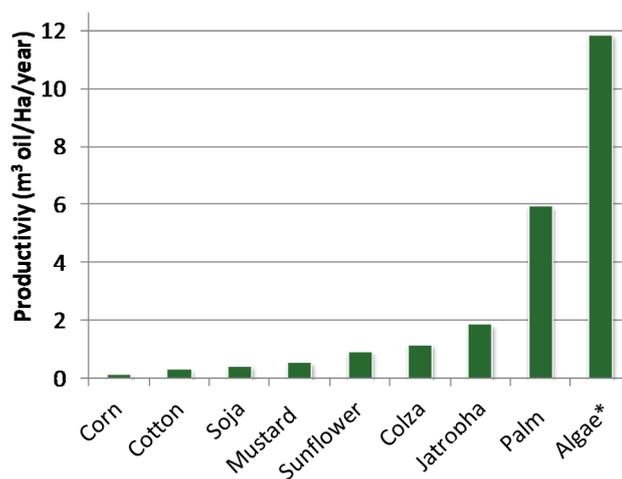


Figure 1 – Productivité en huile des micro-algues et de diverses plantes terrestres en m³/ha/an [1]
 (*hypothèses : productivité de 20 g/m²/jr et 15 % d'huile en matière sèche)

L'ADEME a financé en 2010 une étude consacrée à l'« État des lieux des travaux de recherche français et européen en biomasse et sa mobilisation pour l'énergie et la chimie - Élaboration de recommandations pour une stratégie de travaux à mener ». Sa conclusion était notamment d'intensifier les travaux sur l'estimation du potentiel des algues pour l'énergie et la chimie du végétal.

Objectifs de l'étude

La présente étude vise à évaluer le gisement potentiel français de ressources algales (micro et macro-algues) pour la production de biocarburants avancés et de molécules d'intérêt, ce à l'horizon 2030. Cette évaluation, reposant à la fois sur les ressources nationales (potentiel physique de production sans utiliser de terres agricoles) et sur ce que l'on sait aujourd'hui des marchés concernés et de leur projection à 2030, est faite à travers les étapes et sous-objectifs suivants :

- Réalisation d'un état de l'art technologique de l'exploitation d'algues (micro et macro) et des produits possibles,
- Description de la situation actuelle en France, et comparaison avec les principaux contextes étrangers,
- Évaluation de la ressource potentiellement exploitable en métropole et dans les DOM-COM, et des volumes de production de matière sèche de biomasse algale que cela pourrait représenter,
- Conversion en volumes de production techniquement atteignables pour les différents produits pouvant être issus des filières algales,
- Prospective 2030 : en fonction de la situation de départ, du potentiel technique total et des contraintes réglementaires et marché, identification des situations atteignables en 2030 et des leviers possibles.

Ce rapport s'organise en cinq grandes parties :

- Partie 1 – Présentation des algues et de leurs applications
- Partie 2 – État de l'art des chaînes de production et des technologies impliquées
- Partie 3 – État des lieux des filières algales en France et dans le monde : marchés, acteurs, contextes pays
- Partie 4 – Étude prospective du potentiel français de production d'algues et principaux produits dérivés à 2030
- Partie 5 – Conclusions générales sur le potentiel des filières algales françaises

Considérant que pour modéliser et projeter le potentiel des algues dans le futur, il est nécessaire de bien comprendre la situation actuelle, tant en termes de performances que d'usages, les trois premières parties font l'état des lieux technologique et marché des filières algales, tant micro que macro, et tâchent de répondre à des questions telles que : « comment les algues sont-elles produites ? », « à quoi peuvent-elles être utilisées ? », « quel est l'état de ces marchés aujourd'hui ? », « la situation française est-elle en phase avec la situation mondiale ? ». La Partie 4 décrit la méthodologie proposée pour estimer le potentiel physique français de production de biomasse algale et de produits dérivés, présente analyse les résultats obtenus et compare ce potentiel physique à des estimations de marchés projetées à 2030. Enfin, la Partie 5 donne les conclusions générales de l'étude, fournit des pistes d'approfondissement et des recommandations pour le développement de la filière.

1 Les algues et leurs applications

1.1 Les micro-algues

Les micro-organismes photosynthétiques peuvent être procaryotes (cyanobactéries) ou eucaryotes (micro-algues stricto sensu), selon la présence ou non d'un noyau cellulaire. Apparues il y a 3 milliards d'années, les cyanobactéries sont à la source, par endosymbiose¹³, des chloroplastes des cellules végétales. Par abus de langage, **on regroupe sous le terme « micro-algues » l'ensemble des microorganismes photosynthétiques**. C'est cette définition largo sensu que l'on retiendra ici.

Les débouchés potentiels pour les produits micro-algaux sont variés et dépendent de la composition biochimique des algues, qui elle-même varie selon les espèces ou encore les conditions de culture et de croissance.

Les micro-algues peuvent ainsi trouver des applications dans l'alimentation / nutrition humaine, l'alimentation animale, la chimie, l'énergie ou encore la fabrication de produits cosmétiques et pharmaceutiques.

Les principales familles de molécules justifiant l'intérêt porté aux micro-algues sont les suivantes :

Les lipides (5-40% MS) : de réserve (triglycérides) ou membranaires (phospholipides et glycolipides). En fonction des procédés utilisés, tout ou partie de ces lipides peut être converti en carburants (biodiesel typiquement) ; ils présentent par conséquent un intérêt énergétique. Ils contiennent également des acides gras saturés et polyinsaturés (AGPI ou PUFAs, « PolyUnsaturated Fatty Acids ») comme les oméga-3 : EPA¹⁴ (C20:5¹⁵), DHA (C22:6), ALA (C18 :3), ou les oméga-6 : GLA (C18 :3) ou ARA (C20:4) avec des applications dans le domaine de la nutrition/santé (compléments nutritionnels en substitution aux huiles de poissons). Dans certaines conditions de culture (typiquement un stress azoté), la teneur en huile de certaines espèces de micro-algues peut monter jusqu'à 60-70% (au détriment de la productivité).

Les protéines (15-65% MS) : certaines espèces présentent une teneur élevée en protéines et acides aminés, ainsi que des profils d'acides aminés très proches des sources de protéines classiques (e.g. soja), les rendant particulièrement attractives pour l'alimentation humaine ou animale (nourriture pour poissons notamment).

Les sucres ou carbohydrates (10-50% MS) : présents sous formes de polysaccharides (e.g. amidon), oligo- ou monosaccharides (e.g. glucose), les sucres peuvent éventuellement être convertis en bioéthanol, bien que cela demeure difficile, la plupart des sucres présents dans les micro-algues étant plus difficile à fermenter que les sucres d'autres biomasses terrestres.

Les pigments (0,5-1,5% MS) : notamment,

- les caroténoïdes : principalement β -carotène (orange, jusqu'à 14% MS chez *Dunaliella salina*) et asthaxantine (rouge, particulièrement présente chez *Haematococcus pluvialis*, jusqu'à 4% MS), dans une moindre mesure lutéine et zéaxanthine (jaune).
- les phycobiliprotéines : phycocyanine (bleu, particulièrement présente chez la Spiruline) et phycoérythrine (rouge, particulièrement présente chez *Porphyridium purpureum*).
- la chlorophylle (verte), pigment commun à toutes les micro-algues.

Ces pigments peuvent être vendus en tant qu'extraits purifiés, ou directement sous forme de poudre d'algue riche en pigment. Ils sont utilisés comme colorants alimentaires, additifs pour nourriture animale (coloration des poissons, volailles), et trouvent également des applications dans la cosmétique et la pharmaceutique (anti-inflammatoires, anti-cancéreux, marqueurs fluorescents en immunologie, etc.)

¹³ Association symbiotique où l'un des organismes, appelé endosymbionte, est présent à l'intérieur des cellules de son hôte.

¹⁴ EPA : Acide Eicosapentaénoïque ; DHA : Acide Docosahexaénoïque ; ALA : Acide α -linoléique ; GLA : Acide γ -linoléique ; ARA : Acide arachidonique

¹⁵ C20:5 signifie que la molécule a vingt atomes de carbone et cinq double liaisons

Les vitamines : A, B1, B6, B12, C, E, etc. Quasiment toutes les vitamines essentielles se retrouvent chez les micro-algues, en plus ou moins grande quantité en fonction des conditions de culture. Ces vitamines, tout comme certains minéraux également présents, augmentent la qualité nutritionnelle des micro-algues.

Ci-dessous figurent des exemples de produits reposant sur la valorisation des micro-algues ou de leurs composants cellulaires.



Spiruline pour alimentation humaine (Hawaïan Pacific)



Gélules de β -carotène pour alimentation humaine (Body Science)



Nourriture pour poissons (HBH)



Biodiesel (Seambiotic)

Figure 8 – Exemples de produits issus des micro-algues

Les micro-algues peuvent être considérées selon plusieurs angles d'approche, synthétisés en Figure 9, afin de générer ces produits.

Tout d'abord, la complexité biologique et biochimique des micro-algues en tant qu'êtres vivants, combinée à leur très grande diversité génétique (plus de 30 000 espèces référencées, une diversité naturelle probablement plus proche de la centaine de milliers voire du million d'espèces), en font une source immense de molécules d'intérêt que l'on peut extraire et utiliser pour de nombreuses applications industrielles existantes et restant à découvrir. Pour les applications énergétiques, les lipides et sucres issus des micro-algues peuvent être utilisés et convertis en biocarburants par les mêmes procédés que pour les molécules issues de plantes alimentaires (biocarburants dits de « 1^{ère} génération »).

Ensuite, les micro-algues constituent une biomasse en soi, valorisable dans son entier en alimentation ou en énergie à travers des procédés de valorisation énergétique de la biomasse (utilisés notamment pour produire des biocarburants à partir d'autres biomasses et dits de « 2^{nde} génération » : méthanisation, procédés thermo-chimiques...).

Enfin, de nouvelles voies, encore peu matures, sont étudiées pour utiliser la micro-algue elle-même comme réacteur biologique capable de produire et exsuder certaines molécules et composants. Typiquement, de nombreux travaux de recherche ont été menés pour évaluer la faisabilité de production directe de dihydrogène à partir de micro-algues (par biophotolyse directe ou indirecte, « dark fermentation », photo-fermentation ou encore par combinaison de ces deux dernières). Néanmoins, ces voies exploratoires demeurent encore sujettes à d'importants verrous métaboliques (objectif de rendement de 5% et d'une capacité de production en continu de 4h d'ici 2018 [2]) et ne font par conséquent pas l'objet d'une analyse détaillée dans cette étude.

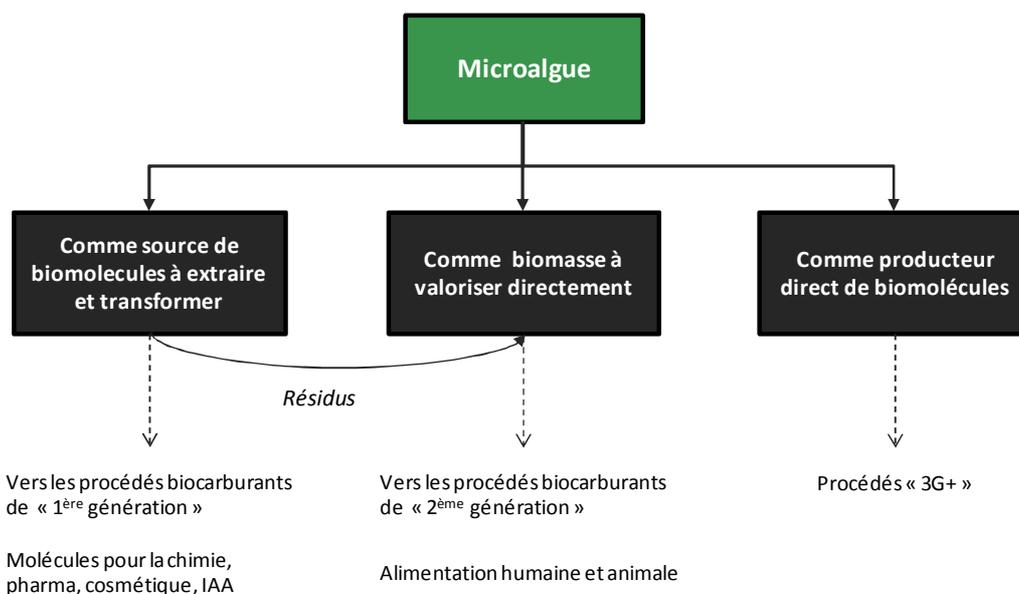


Figure 9 – Principaux modes d'utilisation des micro-algues

1.2 Les macro-algues

Le terme de macro-algues est un terme générique englobant tous les organismes aquatiques eucaryotes¹⁶ photosynthétiques multicellulaires non terrestres. Ce terme n'a aucune valeur taxonomique, les macro-algues regroupant des espèces aux métabolismes extrêmement variés, issues de lignées évolutives distinctes regroupées en trois ensembles :

- Les Chlorophytes ou « algues vertes », ancêtres des plantes terrestres,
- Les Rhodophytes ou « algues rouges », partageant un ancêtre commun avec les algues vertes, et
- Les Phéophyceae ou « algues brunes », issues d'une endosymbiose secondaire¹⁷ d'une algue rouge.

Contrairement aux micro-algues, la plupart des macro-algues sont visibles à l'œil nu et se développent généralement de manière sédentaire en se fixant à un support solide grâce à un crampon. Cette biomasse fixée se retrouve autant sur la frange littorale (limite à marée haute) qu'à 20-30 m de profondeur, soit dans des zones à peine découvertes aux marées basses. Les marées, l'exposition aux vagues, mais aussi la température de la mer et la luminosité (latitude géographique et turbidité de l'eau) constituent les éléments dictant la diversité des populations d'algues dans un environnement donné. La plus grande diversité en algues se trouve surtout dans des régions offrant une multitude d'environnements propices à leur croissance.

On répertorie aujourd'hui environ 8000 espèces de macro-algues dans le monde, dont 1 200 espèces de macro-algues vertes, 6 000 espèces de macro-algues rouges et 800 espèces de macro-algues brunes. La France, de par son espace maritime sur l'hexagone et ses départements d'outre-mer, possède la deuxième zone économique exclusive (ZEE) du monde avec 11 035 000 km² d'espace maritime (derrière les États-Unis). Au sein de cet espace maritime d'envergure, la diversité des algues marines est importante. La France compte plus de 700 espèces d'algues différentes référencées, principalement autour des côtes Bretonnes [3].

Cependant, seules 15 espèces sont autorisées à la vente en tant qu'algue alimentaire¹⁸. Cette réglementation conduit donc à une récolte et exploitation réduite sur ces 15 espèces. D'autres espèces telle que *Laminaria hyperborea* peuvent être aussi récoltés mais pour une valorisation dans l'industrie chimique.

¹⁶ Disposant d'un noyau cellulaire

¹⁷ Pour une explication plus détaillée, voir [90]

¹⁸ *Alaria esculenta*, *Laminaria digitata*, *Laminaria japonica*, *Ascophyllum nodosum*, *Chondrus crispus*, *Enteromorpha*, *Ulva*, *Fucus*, *Gracilaria*, *Himantalia*, *Palmaria palmata*, *Porphyra*, *Saccharina latissima*, *Undaria pinnatifida*. 6 autres algues sont utilisables indirectement. Pour plus de détails sur les restrictions d'utilisation et les références réglementaires, voir le site du CEVA [89]

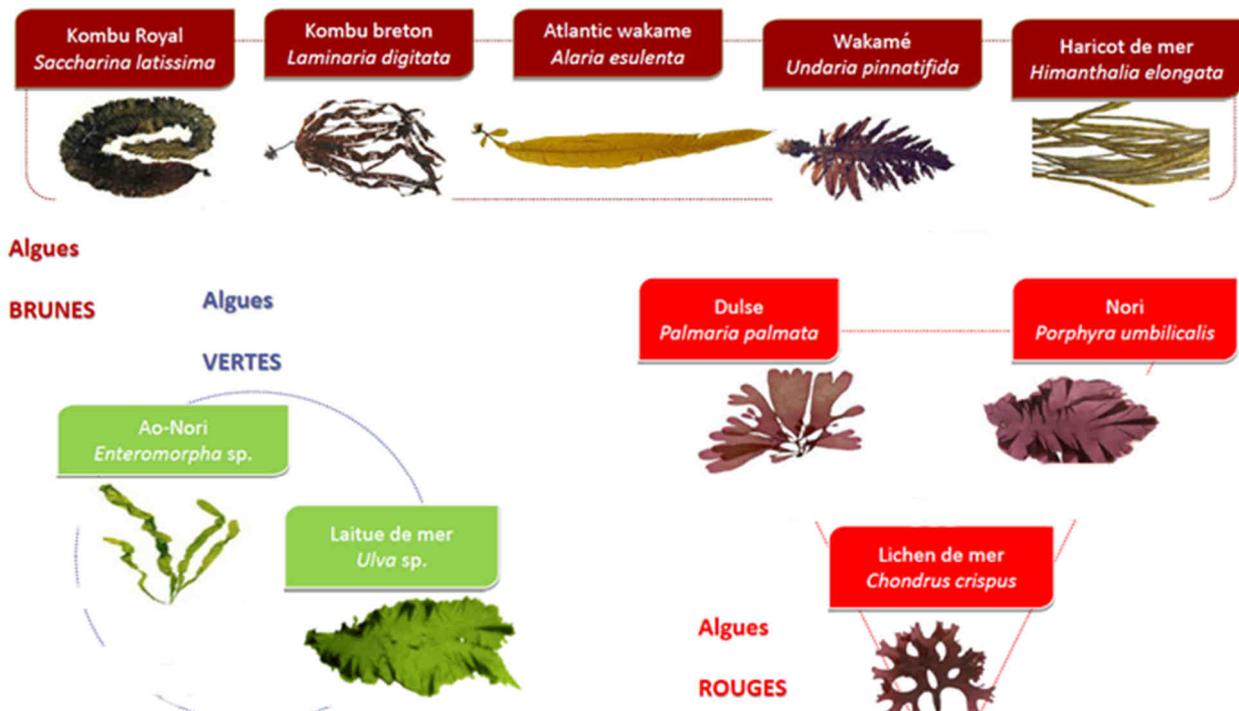


Figure 10 – Quelques exemples de macro-algues autorisées pour l'alimentation humaine et récoltés sur les côtes bretonnes [4]

En termes de secteurs, les débouchés potentiels pour les produits macro-algaux sont de même nature que pour les micro-algues. En effet, les macro-algues peuvent être utilisées pour l'alimentation humaine, l'alimentation animale, la chimie, ou encore la fabrication de produits cosmétiques et pharmaceutiques.

Les produits susceptibles d'être obtenus sont cependant légèrement différents des micro-algues. Les macro-algues renferment des composés chimiques qui leur sont propres et encore inconnus dans d'autres plantes terrestres. Les possibilités de valorisation dépendent là-aussi de la composition biochimique des algues, variable selon les espèces, les conditions de culture et de croissance, etc. Les principales catégories de composants et molécules justifiant l'intérêt porté aux macro-algues (particulièrement les brunes et rouges), sont décrites ci-dessous [5].

Les minéraux, puisés dans la mer, que ce soit des macro-éléments (sodium, calcium, magnésium, potassium, chlore, soufre, phosphore) ou des oligo-éléments (iode, fer, zinc, cuivre, sélénium, molybdène, etc.). Les minéraux peuvent représenter jusqu'à 40% de la masse sèche des algues brunes. L'iode, notamment, est particulièrement concentrée chez les macro-algues, notamment les laminaires (algues brunes) et gracilaires (algues rouges), chez qui les concentrations peuvent atteindre jusqu'à 1g/kg.

Les protéines, particulièrement présentes chez les algues rouges (jusqu'à 30-40% de la matière sèche, contre jusqu'à 20% pour les algues vertes et 5-11% pour les algues brunes). A noter à nouveau l'importance des conditions de culture. Par exemple, dans des conditions de milieux particulièrement riches en azote (nitrate, urée ou ammoniac), le contenu en protéines des algues vertes peut augmenter jusqu'à 40% de la matière sèche.

Les vitamines : on trouve notamment des teneurs intéressantes en provitamine A chez les algues rouges, en vitamine C chez les algues brunes et vertes, et en vitamine E chez les algues brunes. Les macro-algues sont par ailleurs une source de vitamine B12, vitamine absente chez les plantes terrestres.

Les pigments caroténoïdes (environ 0,1% de la matière sèche), utilisés comme antioxydants. Les algues brunes produisent notamment fucoxanthine, β -carotène et violaxanthine. Les algues rouges, du β -carotène, α -carotène et leurs dérivés dihydroxylés : zéaxanthine et lutéine. Les algues vertes, comme les végétaux aériens terrestres, produisent plutôt de la chlorophylle a et b et du β -carotène.

Les polyphénols (jusqu'à 15% de la matière sèche, notamment dans les fucales) : polymères de phloroglucinol, les polyphénols constituent un groupe de molécules très variées en fonction de leur structure et de leur degré de poly-

mérisation, ce qui leur confère des activités biologiques différentes. Ces composés ont des actions antioxydantes et antibactériennes [6].

Les phycolloïdes ou hydrocolloïdes sont des polysaccharides (sucres complexes) solubles présents uniquement chez les algues. Ces polymères jouent un rôle de structure, maintien et résistance des algues en tant que composant des parois cellulaires, ou bien un rôle de réserve, en s'accumulant dans le cytoplasme cellulaire. Ils représentent jusqu'à 45% de la masse sèche des algues brunes. Le Tableau 3 détaille les différents phycolloïdes présents dans les algues.

Contrairement à certaines micro-algues, les macro-algues sont très peu riches en lipides, avec moins de 5% de la matière sèche. Ces lipides sont néanmoins intéressants d'un point de vue qualitatif, avec une proportion importante d'acides gras essentiels. Les acides gras polyinsaturés représentent notamment une part importante de la fraction lipidique des algues rouges, certains oméga-3 comme l'EPA constituant la moitié de ces acides gras chez des espèces comme *Porphyra sp.* et *Palmaria palmata* [5].

Phycolloïdes	Source	Espèces type	Structure chimique	Propriétés	Valorisation industrielle
Alginates	Paroi d'algues brunes	<i>Laminaria</i> , <i>Ascophyllum</i> et <i>Macrocystis</i> 15-45% MS	Polymères de deux acides hexuroniques (acide β -D-mannuronique et acide α -L-guluronique)	Texturantes, épaississantes, gélifiantes, stabilisantes ou encore cryo-protectrices ¹⁹	Additifs alimentaires (E400 à E405) Industrie agroalimentaire (PGA ²⁰ : émulsifiants et stabilisants d'émulsions huile / eau, typiquement pour sauces et vinaigrettes prêtes à l'emploi)
Carraghénanes²¹	Paroi d'algues rouges	<i>Chondrus crispus</i> , <i>Kappaphycus alvarezii</i> , <i>Eucheuma denticulatum</i> ... 15-45% MS	Polymères linéaires de galactoses plus ou moins sulfatés	Stabilisantes épaississantes et gélifiantes.	Agents épaississant, de gélifiant, de stabilisant d'émulsions ou de suspensions, utilisés dans l'alimentation, le textile, les cosmétiques (dentifrices, shampooings, rouges à lèvres) et l'industrie pharmaceutique.
Agars	Paroi d'algues rouges	<i>Gracilaria</i> et <i>Gelidium</i>	Polymères d'agarose ²² et d'agaropectine ²³ .	Stabilisantes et gélifiantes.	Applications alimentaires (90%), Applications biotechnologiques (10%)
Ulvanes	Paroi d'algues vertes	<i>Ulva spp</i> , <i>Enteromorpha spp</i> 8-30% MS	Polymères de L-rhamnose sulfatés en position 3, acide D-glucuronique et acide Liduronique, (minoritairement D-galactose, D-glucose et D-xylose)		Non commercialisés aujourd'hui. Potentiels précurseurs de sucres rares pour la chimie fine, source d'oligosaccharides pour cosmétique ou phytopharmaceutique, agents texturants pour la viscosation de formulations ou conception de gels thermoréversibles à texture contrôlée avec précision
Fucoïdanes	Paroi d'algues brunes	<i>Laminaria</i> , <i>Ascophyllum</i> et <i>Macrocystis</i> 3-30% MS	Polymères de fuco-ses sulfatés, autres sucres neutres et acide uronique		Co-produits des alginates. Non commercialisés aujourd'hui, pas d'application commerciale évidente à ce jour.

Tableau 3 – Caractérisation des principales familles de phycolloïdes macro-algaux (adapté de [5]). Afin d'être valorisées en produits, les différentes biomolécules d'intérêt vont devoir être extraites de l'algue et éventuellement purifiées ou transformées.

¹⁹ Les propriétés physiques des alginates varient en fonction de la composition de l'alginate (proportion et enchaînement des deux monomères) et des éléments qui lui est associé. Par exemple, les gels d'alginate de calcium sont durs et thermostables tandis que les gels d'acide alginique, doux, élastiques et fusibles, sont substituables à la gélatine [5].

²⁰ PropylèneGlycol-Alginates, ou hydroxypropyl-alginates.

²¹ Il existe trois types de carraghénanes plus ou moins sulfatés et aux proportions plus ou moins élevées chez chaque algue « carraghénophyte » [2]: le lambda-carraghénane, épaississant non gélifiant, prédominant chez *Gigartina ascicularis* par exemple, le kappa-carraghénane, épaississant soluble à chaud et donnant en refroidissant un gel dur et doux, prédominant chez *Kappaphycus alvarezii* par exemple (le « cottonii » du commerce), et l'iota-carraghénane, donnant des gels plus élastiques, prédominant chez *Eucheuma denticulatum* par exemple (« spinosum » dans le commerce).

²² Homopolymère neutre d'agarobioses, unité disaccharidique constituée d'un D-galactose d'un 3,6-anhydro-L-galactopyranose.

²³ Polymère d'unités d'agarobiose pures et d'unités d'agarobiose substituées par des groupes sulfates, méthy ou encore pyruvate.

2 Les chaînes de production et de transformation des algues

Cette partie a pour objectif de broser un panorama des modes de production des algues et des produits qui en sont issus, de la variété des chaînes procédés impliquées et des enjeux associés.

Des arbres technologiques complets sont fournis afin de donner une vision d'ensemble. Les principales technologies existantes ou en développement sont ensuite décrites dans différentes sous-sections correspondant aux différentes étapes de la chaîne de production : culture, récolte et concentration, extraction, post-traitement. Pour chaque technologie décrite, les informations suivantes sont fournies :

- Principe
- Avantages et inconvénients
- Maturité actuelle
- Potentiel futur

Il est important de mentionner que ces informations sont pour la plupart qualitatives (la filière micro-algue demeurant peu mature dans l'ensemble, et les projets étant très différents les uns des autres, peu d'informations quantitatives sont aujourd'hui disponibles et consolidées) et comparatives, l'objectif principal étant avant tout de faire ressortir les avantages et inconvénients relatifs de chaque technologie au sein d'une catégorie donnée. Ces évaluations sont issues d'un travail bibliographique complet et de l'expertise des auteurs sur le sujet (dires d'experts). A chaque fois que cela s'avère possible et pertinent, des ordres de grandeur quantitatifs sont donnés. De même, l'indicateur de « potentiel » (faible, modéré, élevé) donné est une indication qualitative et relative reposant sur l'expertise des auteurs et doit par conséquent être prise avec les précautions nécessaires.

2.1 Les micro-algues

L'utilisation des micro-algues comme biomasse ou source de biomolécules d'intérêt nécessite un certain nombre d'étapes technologiques détaillées en Figure 11. A chaque étape, de nombreuses technologies sont disponibles. Certaines étapes, indiquées entre parenthèses, peuvent parfois être évitées en fonction des technologies utilisées en amont et des besoins en aval. Le choix des procédés utilisés doit être fait au cas par cas et de manière intégrée, en fonction de ce que l'on souhaite produire, des objectifs technico-économiques de production, des micro-algues utilisées, etc.

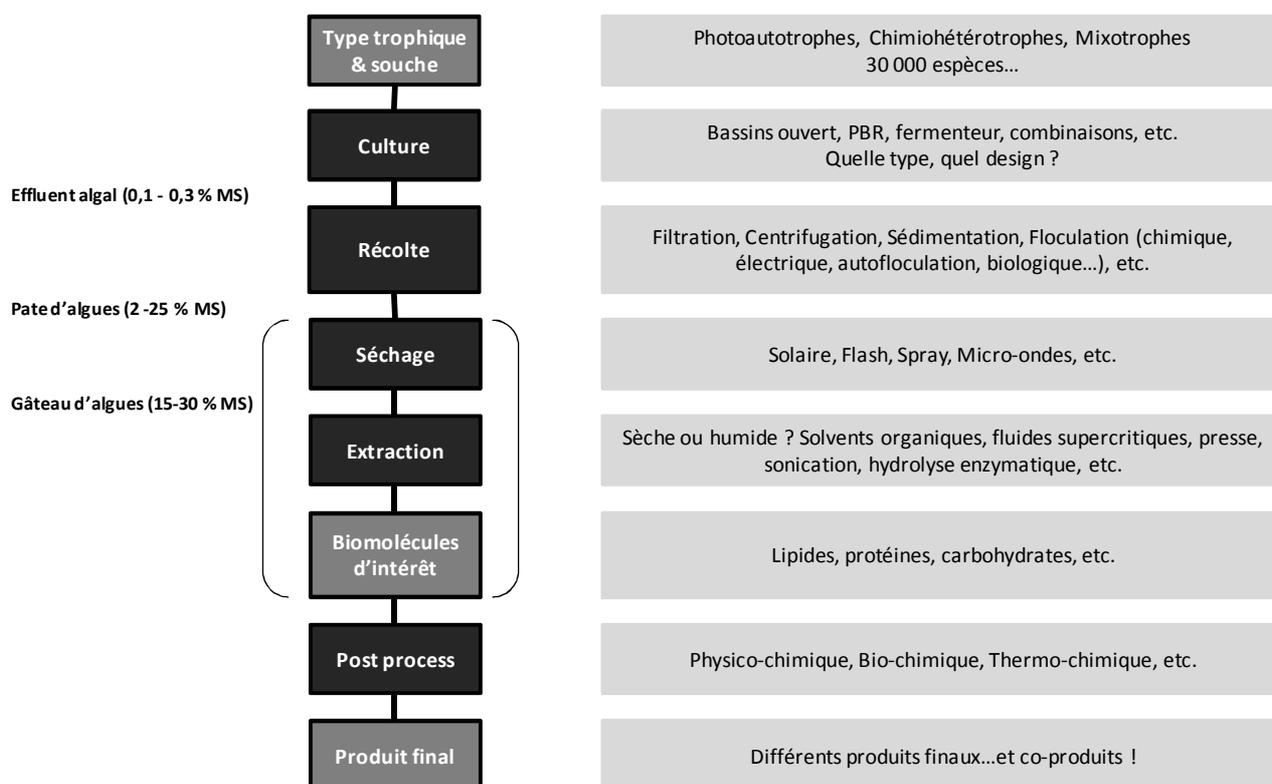


Figure 11 – La chaîne micro-algues : de nombreuses étapes, de nombreuses possibilités

La Figure 12 donne une vision détaillée des différents chemins technologiques susceptibles d'être empruntés, du type de micro-algue aux produits finaux. Cet ensemble des possibles est représenté sous forme d'un arbre technologique. La bande de gauche rappelle les principales étapes présentées en Figure 11. Les procédés sont représentés en vert (technologiquement mature pour des applications algues) ou orange (en développement pour les algues) tandis que les produits et intermédiaires sont indiqués en noir. Cet arbre, complexe, vise avant tout à donner une vision d'ensemble des possibilités et de la multiplicité des possibilités afférente à cette filière. Pour plus de lisibilité, une version agrandie est également fournie en Annexe 1 – Arbres technologiques. Les sections suivantes décrivent individuellement les différents maillons de cette chaîne technologique et comparent les principales technologies susceptibles d'être utilisées à chaque étape.

ARBRE TECHNOLOGIQUE DES MICRO-ALGUES

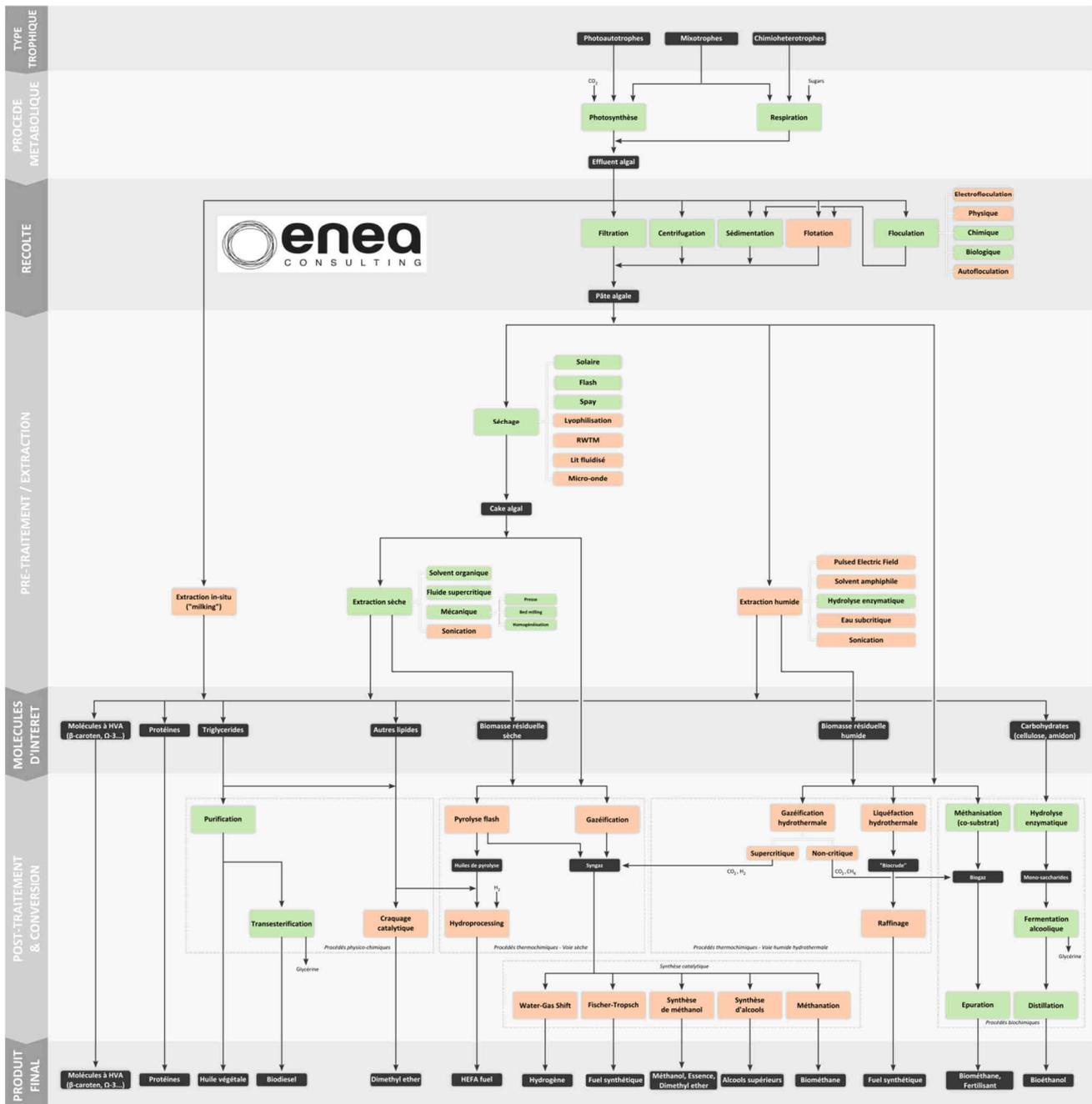


Figure 12 – Arbre technologique de production et utilisation des micro-algues

2.1.1 Technologies de culture des micro-algues

2.1.1.1 Le milieu de culture

Les micro-algues sont cultivées dans des réacteurs spécialisés leur fournissant les différents éléments nécessaires à leur croissance. Pour survivre et se reproduire dans ce milieu aqueux, les micro-algues ont besoin :

- D'une source de carbone
- D'une source d'énergie
- D'une source d'électrons pour assimiler le carbone
- De macronutriments (azote, phosphore, etc.)
- De micronutriments (vitamines, fer, ...).

Selon le « type trophique » (du grec *trophe* : nourri) de l'algue, la source de ces différents besoins va être différente, comme indiqué sur la Figure 13. Par exemple, les algues phototrophes utilisent la lumière du soleil comme source d'énergie tandis que les chimiotrophes doivent trouver cette énergie dans des molécules chimiques. De même, les algues capables d'utiliser le CO₂ comme source de carbone sont appelées autotrophes tandis que les hétérotrophes utilisent le carbone de molécules organiques. Quasiment toutes les combinaisons de types trophiques existent dans la nature, néanmoins deux combinaisons prédominent :

- Les photoautotrophes, pratiquant la photosynthèse comme métabolisme principal
- Les chimiohétérotrophes, pratiquant la respiration comme métabolisme principal

A noter que la majorité des espèces sont capables d'adapter leur métabolisme aux conditions du milieu (présence ou non de lumière, présence ou non de matière organique...), on parle alors d'algues mixotrophes.

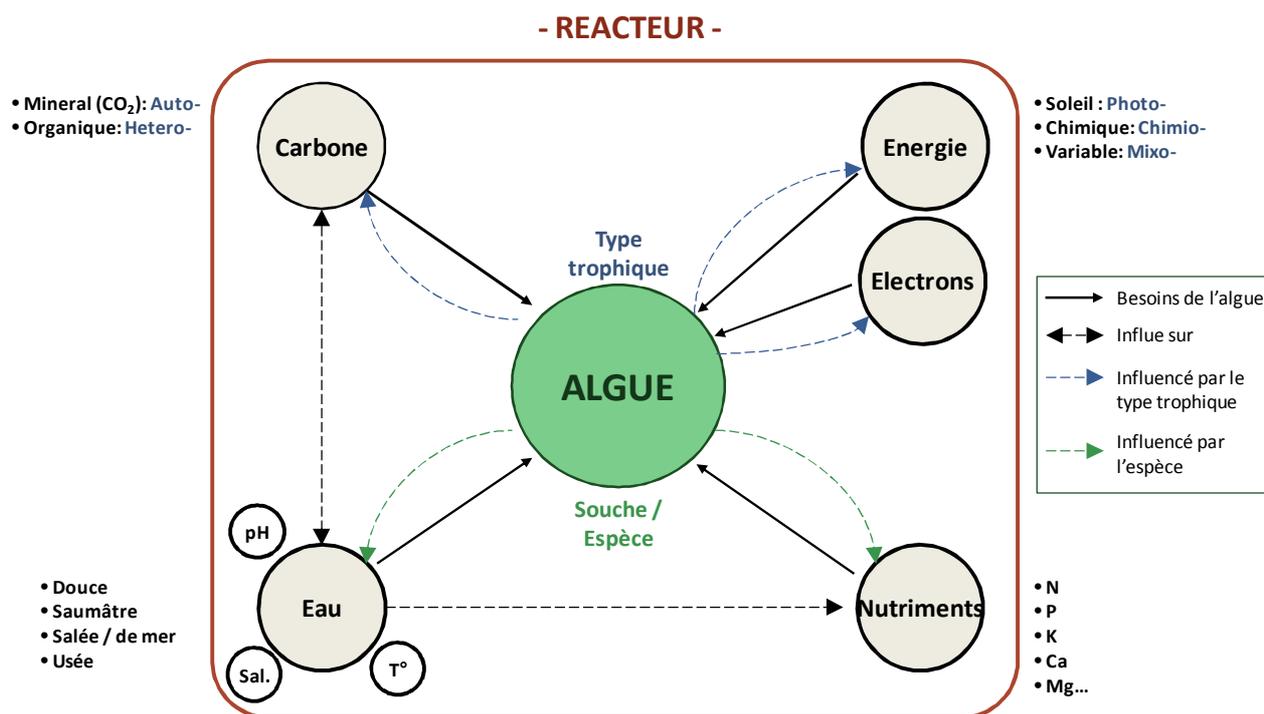


Figure 13 – Représentation schématique d'un réacteur de culture de micro-algues et des besoins de l'algue selon son type trophique

Par ailleurs, chaque espèce (ou souche) d'algue utilisée va être plus ou moins adaptée à certains paramètres du milieu de culture, tels que la salinité de l'eau, sa composition en oligoéléments ou sa température. Les besoins en nutriment vont également varier en fonction des algues.

Ces paramètres sont en outre interdépendants : la spéciation des formes de carbone inorganique dissous (carbonate, CO₂, bicarbonate) dépend du pH et de l'alcalinité. Les formes assimilables (principalement CO₂ dissous et bicarbonate pour les espèces disposant de mécanismes de concentration) seront donc plus ou moins accessibles aux algues en

Chaque famille de systèmes de culture présente ses avantages et ses inconvénients. Le Tableau 4 ci-dessous récapitule les principaux arguments en faveur de l'un ou l'autre ainsi que les principales stratégies mises en œuvre pour compenser les défauts de chaque système.

	« Open ponds »	Photobioréacteurs	Fermenteurs
Principaux avantages	<ul style="list-style-type: none"> Plus simple, facile à construire et opérer Plus faibles CAPEX (~100 k\$/ha) & OPEX Plus mature que les PBR Montée en échelle plus simple (multiplication des unités) 	<ul style="list-style-type: none"> Plus haute productivité volumique (plus fortes densités, moindre contamination) Meilleur contrôle des conditions opératoires Meilleure sélectivité de l'espèce et du produit final 	<ul style="list-style-type: none"> Productivité bien supérieure (x10 par rapport aux PBR, due aux concentrations importantes atteignables) Pas de contrainte géographique Hautement industrialisable, mature
Principaux challenges	<ul style="list-style-type: none"> Plus faible productivité (risque de contamination, plus faible densité, agitation moindre, plus forte photo-inhibition) Moindre contrôle et moindre fiabilité de production Dépendance au climat (ensoleillement, température) Pertes en eau et CO₂ par évaporation Plus forte empreinte au sol 	<ul style="list-style-type: none"> CAPEX ~10 fois supérieur aux Open ponds (~ 1 M\$/ha) Maintenance (encrassement) et décontamination beaucoup plus difficile Accumulation d'oxygène et inhibition de la photosynthèse OPEX supérieurs (énergie d'agitation, de compensation des pertes de charge, régulation thermique, maintenance, etc.) Montée en échelle plus difficile 	<ul style="list-style-type: none"> CAPEX élevés Compétition avec d'autres microorganismes sur les produits (bactéries, champignons) OPEX élevés dus au besoin en source de carbone externe et stérilisée Bilan énergétique globalement inefficace, à moins d'utiliser des déchets comme source de carbone et/ou énergie Emissions de CO₂
Principales stratégies pour surmonter ces challenges	<ul style="list-style-type: none"> Travailler dans des conditions extrêmes avec des algues adaptées (haute salinité, haute alcalinité, etc.) pour limiter la contamination Utiliser un mélange de souche locales pour limiter la contamination Poser une bâche transparente sur le bassin ou construire le bassin sous serre pour limiter la contamination Développer des procédés de récolte à moindre coût pour compenser la moindre densité de culture 	<ul style="list-style-type: none"> Adapter le design des PBR et les conditions opératoires à chaque algue Favoriser les PBR d'extérieur Combiner apport de CO₂ et homogénéisation du milieu Développer des designs innovants (matériaux bas coût, matériaux poreux au gaz, mesures anti-encrassement, orientation suivant le soleil, etc.) Développer des systèmes de rupture (voir ci-dessous) 	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation d'eaux usées et de déchets comme source de carbone, d'énergie et de nutriments Développement de réacteurs hybrides (avec flash lumineux) pour algues mixotrophes

Tableau 4 – Analyse comparative des principales familles de systèmes de culture des micro-algues

Dans les concepts de rupture en cours de développement pour les photobioréacteurs, on peut citer notamment :

Les systèmes immergés :

- Principe : utilisation de sacs plastiques immergés et poreux aux gaz.
- Avantages : plus faible CAPEX, utilisation de l'eau comme support structurel et comme régulateur thermique et échangeur gazeux ; en milieu marin les vagues servent d'agitateur.
- Inconvénients : *non identifiés*
- Développeurs : Algasol Renewables & NASA, Solix Biosystems.

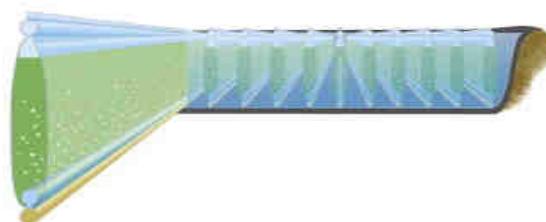


Figure 15 – PBR immergé, Solix Biosystems



Figure 16 – Illumination naturelle interne, Algae Tec.

Les systèmes à illumination naturelle interne :

- Principe : containers fermés avec collecteurs externes de lumière solaire (lentilles de Fresnel et fibre de verre).
- Avantages : régulation thermique non nécessaire, stérilisation facile, faible dépendance à la météo.
- Inconvénients : 50% de pertes de conduction lumineuse et encore très onéreux. Rendements à valider.

- Développeurs : Algae Tec.

Le système de culture sera choisi in fine en fonction de l'algue cultivée, du ou des produits finis voulus, de l'échelle de production visée, des conditions climatiques et environnementales locales ou encore des capacités d'investissement.

2.1.2 Technologies de récolte et concentration

La séparation des algues du milieu de culture est une étape critique. En effet, la solution algale présente dans le réacteur de culture est très diluée (0,1 – 0,3% matière sèche) et particulièrement stable. Cette stabilité a pour principales raisons :

- La faible taille des micro-algues et leur faible différence de densité avec le milieu de culture, ce qui les pousse à y rester en suspension.
- Une membrane chargée négativement chez la plupart des micro-algues, les empêchant de s'agréger. L'intensité de cette charge est fonction du type d'algue, du milieu de culture et de son pH.

Ce caractère dilué et cette stabilité rendent la récolte des micro-algues difficile. Plusieurs techniques sont souvent combinées afin d'atteindre les performances voulues. L'eau récoltée est quant à elle généralement recyclée et renvoyée vers le milieu de culture.

Les principaux critères influençant le choix de la technologie ou combinaison de technologies de concentration et récolte des micro-algues sont les suivants:

- Type de souche utilisée : morphologie (taille, densité) et physiologie (tolérance au stress)
- Débit de culture à traiter
- Efficacité de séparation et siccité finale (fonction des étapes ultérieures d'extraction et transformation)
- Impact sur la qualité de la biomasse en sortie en lien avec les applications visées
- Coût d'investissement et coûts d'opération (consommation d'énergie, de consommables, maintenance, etc.)

A l'issue de cette étape, on obtient une solution concentrée ou une pâte algale qui, en fonction des technologies utilisées, contient entre 2 et 25% de matière sèche.

2.1.2.1 Centrifugation

Les algues sont séparées du milieu de culture sur la base de leur différence de densité en utilisant la force centrifuge (rotation à grande vitesse augmentant la force de gravité).

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Efficace : jusqu'à 15-30% MS²⁴ ▪ Rapide ▪ Pas de contrainte particulière sur le type d'algue ▪ N'utilise pas de produits chimiques 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CAPEX très élevés²⁵ ▪ Consommation énergétique élevée²⁶ ▪ Maintenance relativement importante ▪ Capacités de traitement (débits de milieu de culture) limitées par unité
MATURITE	POTENTIEL
Commerciale, principale technique utilisée aujourd'hui	Trop chère pour les applications carburant, mais potentiel élevé pour produits à HVA ²⁷ (efficace, adapté aux petits volumes)

²⁴ MS : matière sèche

²⁵ 275 000 US\$ pour une capacité de 110 000 L/h environ; 2230 centrifugeuses nécessaires pour récolter les algues de 4000 ha de bassins ouverts soit 613 M\$ [83], soit un budget récolte d'environ 150 000 \$/ha.

²⁶ 2,8 MWh pour 10 millions de litres de milieu de culture (soit 10 t_{MS} de biomasse à récolter) [85]

²⁷ HVA : haute valeur ajoutée

2.1.2.2 Sédimentation

Les algues sont séparées du milieu de culture sur la base de leur différence de densité (supérieure au milieu) sans aucune action particulière, certaines algues sédimentant d'elles même une fois le brassage du milieu arrêté. Les micro-algues sédimentées sont ensuite récoltées par raclage.

La sédimentation n'est pas une technologie de récolte en soi mais plutôt une façon, lorsque leur densité / taille le permet, de pré-concentrer les algues et de réduire la consommation énergétique du procédé de récolte.

Cette technologie peut être optimisée par une étape de floculation préalable.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût faible ▪ Possibilité de traiter de larges volumes en continu (à l'image des stations de traitement des eaux) ▪ N'utilise pas de produits chimiques (sauf floculation associée) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adapté à certaines algues uniquement : de grande taille et densité, non mobiles i.e. sans flagelle (sauf floculation associée) ▪ Peu efficace : concentration finale faible (<5% MS) ▪ Lent
MATURITE	POTENTIEL
Commerciale	Potentiel faible sans floculation associée (peu efficace ; peu cher mais non pertinent pour les algues riches en lipides car moins denses)

2.1.2.3 Flottation

Les algues sont séparées du milieu de culture sur la base de leur différence de densité (inférieure au milieu). Cette flottation peut être naturelle (algues riches en lipides par exemple) mais s'avère généralement insuffisamment efficace. Elle est plus généralement induite par l'utilisation de bulles d'air (« flottation par air dissous » ou « Dissolved Air Flotation – DAF ») ou de microbulles d'hydrogène issues de l'électrolyse de l'eau (« électro-flottation »). Les micro-algues se retrouvant à la surface sont ensuite récoltées par écrémage.

Cette technologie peut également être optimisée par une étape de floculation préalable.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ N'utilise pas de produits chimiques ▪ Naturelle : faibles CAPEX & OPEX, faible conso. énergétique ▪ DAF : mature dans le traitement des eaux usées 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Peu efficace : concentration finale faible <5% MS ▪ Electro-flottation : consommation énergétique très élevée (électrolyse de l'eau nécessaire) ▪ Electro-flottation : mauvaise tenue des électrodes en eau salée
MATURITE	POTENTIEL
Démonstration	Potentiel élevé (DAF surtout, déjà éprouvée pour le traitement des eaux ; flottation naturelle trop lente dans beaucoup de cas ; électro-flottation trop énergivore)

2.1.2.4 Floculation

La floculation consiste en une concentration des cellules par agrégation suite à une modification de la polarité électrique de leur membrane externe. Cette technique permet d'augmenter l'efficacité d'autres technologies généralement placées en aval, comme la sédimentation, la flottation voire la centrifugation. Cette floculation peut être :

- **Chimique** : utilisation de produits chimiques type sels ferreux (Al, Fe) ou polymères ioniques qui neutralisent les charges membranaires et permettent aux algues de s'agréger en floccs,
- **Biologique** : utilisation de produits biologiques (ex : Chitosan),
- **Électrique** : application d'électrodes dans le milieu, créant une différence de potentiel et le regroupement des algues (chargées négativement) vers l'anode, où elles perdent leur polarité et peuvent alors s'agréger,
- **Acoustique** : utilisation d'ultrasons, les algues s'accumulent dans les zones de faible potentiel,
- **Auto-floculation** : une augmentation du pH peut également modifier l'équilibre ionique et la stabilité de la suspension algale (précipitation de Mg, Ca, P...) et entraîner leur agrégation.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Chimique : mature dans l'industrie du traitement de l'eau ▪ Possibilité de traiter de larges volumes en continu ▪ Electro & Acoustique : pas besoin de floculant (ni de son recyclage) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Peu efficace : concentration finale faible <5% MS ▪ Chimique : pollution aux métaux incompatible avec de nombreuses applications algales ▪ Chimique & Biologique : coût élevé du floculant ▪ Electro : encrassement de la cathode
MATURITE	POTENTIEL
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Chimique : commerciale ▪ Biologique : commerciale ▪ Autres : R&D / pilote 	Potentiel élevé (couplable avec la plupart des autres solutions pour améliorer leur efficacité)

2.1.2.5 Filtration

Les algues sont séparées du milieu de culture sur la base de leur différence de taille. Cette filtration peut être plus ou moins fine :

- Filtration classique : frontale (fluide circulant perpendiculairement à la membrane) ou tangentielle (fluide circulant parallèlement à la membrane, milieu de culture traversant par différentiel de pression)
- Microfiltration
- Ultrafiltration

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mature dans le secteur du traitement de l'eau ▪ N'utilise pas de produits chimiques ▪ Efficace : jusqu'à 25% MS ▪ Frontale : très simple 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Problèmes de colmatage ▪ Frontale : réservée aux algues de grande taille (>40 µm) ▪ OPEX élevés (changement des membranes et pompage)
MATURITE	POTENTIEL
Commerciale	Potentiel élevé

2.1.3 Technologies de séchage

Une fois les algues concentrées et séparées du milieu de culture, une pâte algale est obtenue. La durée de vie de celle-ci est limitée et il est donc nécessaire de la traiter rapidement. La sécher peut être à la fois une manière de la conserver plus longtemps et un pré-requis à l'utilisation de certaines techniques d'extraction.

2.1.3.1 Séchage solaire

Évaporation de l'eau grâce à l'énergie solaire, sous serre ou à l'air libre.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technologie la moins chère 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lent (heures voir jours, pas d'apport externe de chaleur) ▪ Nécessite de larges surfaces au sol ▪ Dépendant du climat ▪ Risque de détérioration de la qualité de la biomasse
MATURITE	POTENTIEL
Commerciale	Potentiel faible

2.1.3.2 Séchage Indirect Par Vapeur

La pâte d'algues passe dans un sécheur horizontal à tubes de vapeur.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Efficace 	Procédé très onéreux : <ul style="list-style-type: none"> ▪ CAPEX élevés ▪ Conso. énergétique élevée (génération de vapeur) ▪ Besoins en maintenance élevés
MATURITE	POTENTIEL
Démonstration	Potentiel modéré (applications HVA éventuellement)

2.1.3.3 Séchage flash

La pâte d'algue est pulvérisée dans un courant ascendant d'air ou de gaz chaud, auquel se mêle l'eau évaporée. Le gaz et le solide sont ensuite séparés dans un collecteur de type cyclone. Les résidus de solides présents dans la fraction gaz peuvent également être récoltés par filtration.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Très rapide 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consommation énergétique élevée (3,2 kWh/kg à 30 %MS [7]) ▪ Possible détérioration de certains composants (vitamines, pigments)
MATURITE	POTENTIEL
Commerciale	Potentiel élevé pour applications alimentaires

2.1.3.4 Séchage spray

Même principe que les sécheurs flash, la pâte d'algue est pulvérisée dans un courant d'air chaud / vapeur / gaz chaud, cette fois descendant. L'algue séchée est récupérée en bas de l'équipement.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Très rapide (quelques secondes) ; La pâte est généralement laissée plus longtemps pour stérilisation et décomposition simultanée des cellules ▪ Conserve un nombre important de constituants cellulaires 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consommation énergétique très élevée (6,4 kWh/kg à 30 %MS [7])
MATURITE	POTENTIEL
Commerciale	Potentiel élevé pour applications alimentaires

2.1.3.5 Lyophilisation

Surgélation des algues puis sublimation de la glace afin d'éliminer l'eau.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mature dans l'industrie agro-alimentaire ▪ Conserve le volume, l'aspect et la forme de l'algue traitée ▪ Favorise l'extraction des huiles par solvant 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conso. énergétique très élevée ▪ Procédé très onéreux
MATURITE	POTENTIEL
R&D (Labo)	Adapté aux produits à très HVA

2.1.3.6 Refractance Window® Heat Transfer (RWTM)

La pâte d'algues passe sur un tapis en plastique transparent positionné au-dessus d'eau chaude à 99°C et est réchauffée par l'énergie infrarouge à pression atmosphérique [8].

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technique douce conservant la qualité de la biomasse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conso. énergétique très élevée ▪ Procédé très onéreux
MATURITE	POTENTIEL
Démonstration	Potentiel à valider (applications alimentaires principalement visées)

2.1.3.7 Sécheur a lit fluidisé

Évaporation de l'eau par application d'air chaud sur une plaque tournante.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technique douce conservant la qualité de la biomasse ▪ Vapeur ou chaleur non requise 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CAPEX élevés ▪ Faible capacité de séchage, la pâte doit déjà présenter une siccité élevée
MATURITE	POTENTIEL
Démonstration	Potentiel modéré

2.1.3.8 Micro-Ondes

Évaporation de l'eau grâce à de l'énergie électromagnétique.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût de séchage par unité d'humidité inférieur au séchage par vapeur ▪ Temps de séchage rapide 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CAPEX élevés ▪ Consommation importante d'électricité ▪ Séchage potentiellement non homogène
MATURITE	POTENTIEL
R&D	Potentiel modéré. Intérêt en cas d'électricité peu chère.

2.1.4 Technologies d'extraction

Selon les produits visés et comme expliqué en Figure 9, il peut s'avérer nécessaire d'extraire les biomolécules d'intérêt de l'algue pour ensuite éventuellement les purifier et/ou transformer. Les technologies d'extraction et de transformation sont souvent intrinsèquement liées aux produits visés.

Pour extraire les différentes molécules algales d'intérêt, il est nécessaire d'accéder à l'intérieur de la cellule. Dans un grand nombre de cas cela nécessite une destruction de la membrane cellulaire grâce à une étape de broyage ou de lyse de la cellule. Ce broyage peut être mécanique (homogénéisation à haute pression, autoclavage, broyage à billes, ultrasons, etc.), chimique/biologique (lyse enzymatique, acidification, utilisation de solvants, etc.), ou encore électromagnétique. Tout comme les procédés de récolte, les procédés de lyse cellulaire peuvent être combinés en fonction des performances obtenues et des besoins des procédés situés en aval. Les critères de performance considérés sont l'absence de détérioration ou dénaturation des produits ou de la biomasse résiduelle, l'obtention de fractions aisément séparables, la faible consommation énergétique, le faible coût d'investissement.

2.1.4.1 Presse mécanique

Broyage des cellules et extraction mécanique des huiles par presse (à vis par exemple). Cette technique peut être simplement utilisée comme technique de broyage avant utilisation de solvants.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mature pour l'extraction d'huile à partir d'autres ressources ▪ N'utilise pas de produits chimiques 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Efficacité relative : récupère jusqu'à 75-80% de l'huile ; une partie de l'huile pressée reste sur la biomasse résiduelle, nécessitant souvent une extraction supplémentaire par solvant ▪ Nécessite une séparation de l'eau si séchage partiel des algues en amont ▪ CAPEX relativement élevés ▪ Conso. énergétique élevée ▪ Maintenance élevée
MATURITE	POTENTIEL
Commerciale	Potentiel limité

2.1.4.2 Solvants organiques

Utilisation de solvants organiques (benzène, éther, hexane) pour dégrader la membrane cellulaire et solvater les huiles ou autres biomolécules (pigments, etc.) qui sont ensuite récupérées par distillation. Possible utilisation conjointe avec une presse mécanique.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relativement peu cher ▪ Efficace : récupère jusqu'à 90 voire 95% de l'huile (dont 65% de triglycérides) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produits chimiques toxiques et corrosifs (risques proportionnels aux volumes manipulés) ▪ Cadre réglementaire associé contraignant ▪ Faible sélectivité ▪ Résidus de solvants dans le produit ▪ CAPEX & conso. énergétique additionnels associés à la régénération du solvant
MATURITE	POTENTIEL
Commerciale, technique la plus utilisée pour l'extraction d'huiles	Potentiel limité à terme (sera remplacé par des solutions non chimiques, comme les fluides supercritiques, dès que ces dernières seront compétitives)

2.1.4.3 Fluides supercritiques (CO₂, H₂O)

Extraction à l'aide d'un fluide (eau, CO₂) à l'état supercritique (haute température et haute pression) pénétrant dans les cellules et entraînant leur lyse.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Efficace : rendement proche de 100% ▪ Bonne sélectivité / pureté des produits ▪ Rapide ▪ Faible impact environnemental ▪ N'utilise pas de produits chimiques <p>CO₂ :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ séparation facile à température ambiante ▪ extraction sélective par ajustement des conditions P/T ▪ Mature dans l'agro-alimentaire (Ex : café) ▪ valorisation du CO₂ <p>H₂O :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Extraction humide (séchage non nécessaire) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CAPEX relativement élevés ▪ Conso. énergétique élevée ▪ Procédé sensible fonctionnant à haute pression ▪ Fonctionne mieux avec cellules partiellement lysées
MATURITE	POTENTIEL
CO ₂ : Commerciale – H ₂ O : R&D	Potentiel très élevé

2.1.4.4 Lyse enzymatique

Utilisation d'enzymes pour dégrader la membrane cellulaire. L'eau sert de solvant.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Extraction humide (séchage non nécessaire) ▪ Récupération facilitée des huiles (pas de solvant organique) ▪ Faible impact environnemental ▪ N'utilise pas de produits chimiques 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Procédé très onéreux
MATURITE	POTENTIEL
Commerciale	Potentiel modéré

2.1.4.5 Ultrasons

Les ondes ultrasons créent une alternance de zones haute pression et basse pression. Des bulles d'air se forment dans les zones basse pression et grossissent par intermittence au passage de l'onde jusqu'à atteindre une taille critique et exploser. Leur explosion génère des ondes de choc qui détruisent la membrane cellulaire des algues. L'eau sert de solvant.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Extraction humide (séchage non nécessaire) ▪ Très efficace ▪ Récupération facilitée des huiles (pas de solvant orga.) ▪ Faible impact environ. ▪ N'utilise pas de produits chimiques 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consommation énergétique élevée
MATURITE	POTENTIEL
R&D / pilote	Potentiel modéré (faisabilité technico-économique à démontrer)

2.1.4.6 Extraction in situ (« milking »)

La R&D s'oriente de plus en plus vers des solutions d'extraction continue et de récupération des molécules d'intérêt directement dans le milieu de culture, en les extrayant des micro-algues vivantes sans avoir à récolter ni à sécher ces dernières. Ces techniques reposent sur des principes de fragilisation de la membrane cellulaire (champs électromagnétiques, acidification) afin de laisser passer les molécules d'intérêt par osmose (différence de concentration entre le milieu cellulaire et le milieu de culture). Cette solution est typiquement étudiée pour la récupération des lipides libres, qui remontent en surface par différence de densité et peuvent ainsi être écrémés. La biomasse pauvre en lipides peut alors sédimenter et être récupérée pour concentration ou séchage additionnel.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Évite les étapes de récolte et de séchage des micro-algues, réduisant considérablement les coûts d'extraction ▪ Technique non-destructive 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Débit de production encore faible ▪ Aujourd'hui limité à quelques espèces ▪ Difficulté de récupération d'autres molécules que lipides
MATURITE	POTENTIEL
R&D	Potentiel modéré (très fort potentiel à long terme si les verrous techniques sont levés)

2.1.5 Technologies de post-traitement

Le post-traitement inclut les différentes étapes de transformation et purification des algues après récolte ou sous-produits des algues obtenus après extraction. Les technologies susceptibles d'être employées sont variées et dépendantes du type de produit visé, de la quantité et qualité de la biomasse algale ou des molécules d'intérêt extraites, ainsi que de considérations économiques.

Ces procédés reposent sur des principes physicochimiques, biochimiques ou encore thermochimiques différents. Peuvent être distingués les procédés de transformation et/ou purification de molécules d'intérêt préalablement extraites des micro-algues et les procédés de transformation des algues entières ou des résidus d'extraction.

2.1.5.1 Transesterification

Procédé physicochimique. Certains lipides, les triglycérides (TGD), vont réagir avec du méthanol pour produire des ester méthylique (biodiesel) et du glycérol en présence d'un catalyseur. La glycérine et le biodiesel sont séparés puis séparément purifiés. L'alcool et le catalyseur sont séparés des résidus de purification et recyclés en tête de procédé.

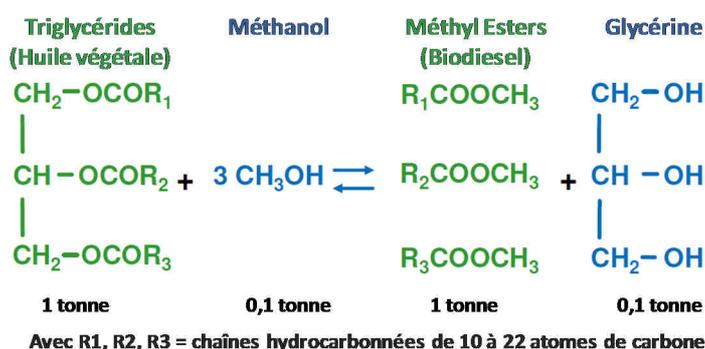


Figure 17 – Réaction de transesterification, transformant des lipides (triglycérides) en biodiesel (et glycérol)

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Voie la plus mature, utilisée pour produire du biodiesel à partir d'huiles issues d'autres biomasses (huile de palme, de colza, etc.) ▪ Réaction chimique relativement simple ▪ Haut rendement : 98% ▪ Bonne cinétique: production de carburant sous certaines conditions en environ 2 heures ▪ Co-production de glycérol valorisable 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ne valorise que les TGD (pas les glyco- et phospholipides), nécessite une forte sélectivité du procédé d'extraction pour les TGD ▪ Nécessite l'optimisation des conditions de culture vers le stockage de lipides, généralement au détriment de la productivité ▪ Ne fonctionne bien qu'avec une huile peu riche en acides gras libres (« free fatty acids » ou FFAs) i.e. raffinées, car les FFAs sont convertis en savon, diminuent le rendement, peuvent entraver la réaction et rendent la récupération du glycérol plus difficile ▪ La présence d'eau diminue le rendement (hydrolyse)
MATURITE	POTENTIEL
Commerciale	Potentiel élevé

2.1.5.2 Fermentation alcoolique

Procédé biochimique durant lequel les sucres simples extraits des algues subissent une fermentation alcoolique impliquant des micro-organismes (généralement des levures ou des bactéries) et des enzymes. Des carbohydrates plus complexes comme l'amidon peuvent également être fermentés après une étape d'hydrolyse enzymatique (amylases). L'éthanol obtenu est récupéré par distillation et déshydratation. Le bioéthanol obtenu présente certaines limites (cf. inconvénients) qui peuvent être compensées par sa conversion en ETBE ("Ethyl tertio-butyl ether") par un ajout d'isobutène.



Figure 18 – Réaction de fermentation alcoolique, transformant les sucres en bioéthanol

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> Procédé mature pour d'autres applications Fort potentiel de mélange de l'éthanol avec de l'essence Bon impact environnemental, y compris local, par rapport à l'essence (émissions d'HC et de CO : - 5% à -10%) Conditions opératoires (P/T) peu contraignantes <p>Conversion en ETBE :</p> <ul style="list-style-type: none"> Stabilité accrue du mélange (risque de séparation de phase diminué) Évaporation plus faible Même indice d'octane 	<ul style="list-style-type: none"> Sucres issus des micro-algues (type amidon) difficiles à fermenter, rendements en alcool très faibles²⁸ Évaporation plus forte (avec un mélange à 5% de bioéthanol, le taux d'évaporation de l'essence peut atteindre 50%), nécessité de diminuer la volatilité des carburants pour ajouter de l'éthanol Teneur énergétique plus faible ~ 1/3 des essences traditionnelles Augmentation des émissions d'aldéhydes Si faible teneur en éthanol et présence d'eau: possibilité de séparation des phases Une forte teneur en éthanol est agressive pour les moteurs qui doivent être adaptés (e.g. Véhicules « Fuel Flexible ») <p>Conversion en ETBE :</p> <ul style="list-style-type: none"> L'iso-butène est issu de sources fossiles La conversion en EBTE augmente les coûts et les émissions
MATURITE	POTENTIEL
R&D	Potentiel modéré

2.1.5.3 Hydrogénation

Transformation des lipides (chaines carbonées insaturées) de l'huile végétale en leurs alcanes correspondants (chaines carbonées saturées) par réaction avec du dihydrogène à haute pression (5-200 bars) et relativement haute température (150-200 °C) en présence d'un catalyseur.



Figure 19 – Réaction d'hydrogénation, transformant des lipides (triglycérides) en HVO (Hydrotreated Vegetable Oils) c'est à dire alcanes (C_nH_{2n+2}) et propane (C₃H₈) [9]

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> Panel des lipides valorisables plus large que pour la transestérification Commercial pour d'autres huiles végétales (palme...) Produit final stable et de qualité (indice de cétane élevé, absence d'aromatiques, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> Consommation importante d'hydrogène Nécessaire purification préalable des huiles
MATURITE	POTENTIEL
Commerciale	Potentiel modéré à élevé (bien maîtrisé mais nécessite un accès à de l'hydrogène peu cher)

²⁸ Des essais ont montré une production de 385 mg_{ethanol}/g de glucose contre 115 mg_{ethanol}/g de micro-algues [81]

2.1.5.4 Méthanisation

Procédé biochimique complexe impliquant différentes bactéries et réactions chimiques successives en milieu anaérobie (sans oxygène). Les macro-molécules (protéines, lipides, glucides) sont tout d'abord hydrolysées en molécules simples (monosaccharides, acides aminés, etc.) qui sont convertis en acides organiques (acides gras volatiles ou AGV) par acidogénèse. Ces derniers sont à leur tour convertis en un mélange d'acétate, de CO₂ et d'H₂ par acétogénèse. Enfin, des bactéries pratiquant la méthanogénèse transforment soit l'acétate (voie acétoclastique) soit les gaz (voie hydrogénophile) en un mélange composé essentiellement de méthane CH₄ et de CO₂ qu'on appelle biogaz.

Le procédé se déroule à pression atmosphérique, à température dépendante des bactéries utilisées mais centrée autour de 38°C et un pH autour de 7. Le biogaz obtenu est ensuite séché, comprimé puis prétraité pour enlever les COV (Composés Organiques Volatiles) et l'H₂S. Il peut ensuite être valorisé en cogénération chaleur/électricité ou encore épuré et comprimé pour donner du biométhane. Ce dernier peut être injecté dans le réseau de gaz naturel ou transformé en bio-GNV (carburant véhicules). Toute la partie de la biomasse qui n'est pas convertie en gaz est appelée « digestat » ayant un intérêt agronomique en tant que fertilisant.

- **Entrée** : algue entière ou résidus d'extraction
- **Sortie** : biogaz ou biométhane (après épuration du biogaz), digestat

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Voie mature à l'échelle industrielle pour de nombreuses biomasses ▪ Valorisation de l'algue entière ou des résidus d'extraction ▪ Voie humide, ne nécessite pas d'étape de séchage ▪ Faible conso. énergétique ▪ Production de digestats valorisables en agriculture, ou recyclables comme source de nutriments pour les algues 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rendement en biogaz très dépendant du type d'algue ▪ Présence de sel potentiellement inhibitrice ▪ Adaptation du procédé à de hautes teneurs en azote potentiellement nécessaire
MATURITE	POTENTIEL
Commerciale	Potentiel élevé (algue entière en voie humide évitant séchage et extraction ; débouché énergétique des résidus d'extraction notamment, y compris pour des algues cultivées en conditions potentiellement rédhibitoires pour une application en alimentation humaine/animale)

2.1.5.5 Liquéfaction Hydrothermale

Procédé thermochimique à moyenne température (250 - 350°C) et haute pression (100 - 200 bars) en présence ou non de catalyseurs. Dans ces conditions l'eau est à l'état sub-critique, ce qui en fait un excellent milieu réactionnel (faible viscosité, forte solubilité de la matière organique [7]).

- **Entrée** : algue entière ou résidus d'extraction
- **Sortie** : bio-brut (carburant à la composition proche d'un pétrole brut conventionnel)

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Valorisation de l'algue entière ou des résidus d'extraction ▪ Voie humide, ne nécessite pas d'étape de séchage ▪ Lyse des cellules non nécessaire ▪ Bio-brut obtenu plus stable et avec un pouvoir calorifique supérieur aux huiles de pyrolyse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réacteurs et ingénierie complexes ▪ Impact du type d'algue sur la composition du bio-brut inconnu ▪ Raffinage nécessaire du bio-brut obtenu ▪ Fraction azotée des algues potentiellement problématique pour le process
MATURITE	POTENTIEL
R&D	Potentiel modéré à élevé (algue entière en voie humide évitant séchage et extraction ; prometteur mais développement en retard sur la méthanisation)

2.2 Les macro-algues

Les différentes étapes et catégories de procédés utilisés pour les macro-algues sont les mêmes que pour les micro-algues.

De la même façon, la Figure 20 ci-dessous donne une vision détaillée des différents chemins technologiques déjà emprunté ou susceptibles d'être empruntés, des macro-algues aux produits finaux. Cet ensemble est représenté sous forme d'un arbre technologique. La bande de gauche rappelle les principales étapes de la chaîne. Les procédés sont représentés en vert (mature pour des applications algues) ou orange (en développement pour les algues) tandis que les produits et intermédiaires sont indiqués en noir. A nouveau, cet arbre vise avant tout à donner une vision d'ensemble des possibilités et de leur multiplicité. Pour plus de lisibilité, une version agrandie est également fournie en Annexe 1 – Arbres technologiques. Les sections suivantes décrivent individuellement les différents maillons de cette chaîne technologique et comparent les principales technologies susceptibles d'être utilisées à chaque étape.

ARBRE TECHNOLOGIQUE DES MACRO-ALGUES

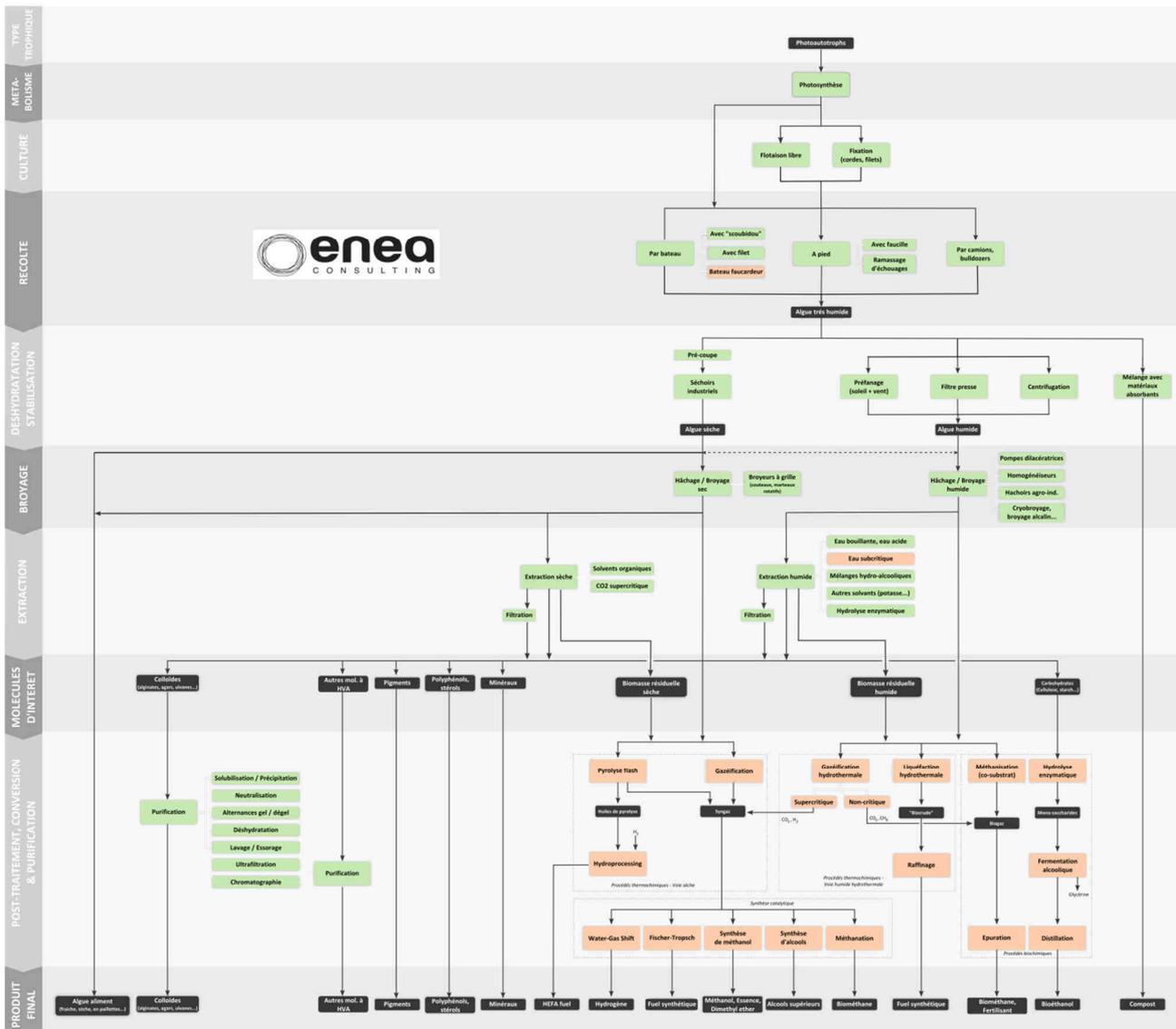


Figure 20 – Arbre technologique de production et utilisation des macro-algues

2.2.1 La culture et récolte des macro-algues

Contrairement aux micro-algues qui, à part dans de rares cas d'eutrophisations de lacs ou étangs, nécessitent absolument la mise en place d'un système de culture, les macro-algues peuvent être cultivées ou directement récoltées dans leur environnement, à la main ou moyennant des systèmes de récolte mécanisés.

2.2.1.1 La récolte des algues sauvages

2.2.1.1.1 Les outils de récolte

Selon les espèces considérées, les macro-algues sauvages peuvent être récoltées soit en mer à l'aide de navires équipés de systèmes de récolte spécifiques, soit à pied sur l'estran (littoral soumis à la marée).

En mer, des bateaux spécialisés sont utilisés, typiquement :

- Des navires goémoniers, équipés d'une grue articulée au bout de laquelle peuvent être fixés différents outils :
 - un crochet appelé « scoubidou ». Cette solution est typiquement utilisée pour la récolte de *Laminaria digitata*.
 - un peigne dragué sur les fonds. Cette solution, inspirée des pêcheurs norvégiens, est typiquement utilisée pour la récolte de *Laminaria hyperborea*, laminaire ne pouvant être prélevée avec le scoubidou.
- Des navires équipés de filets.
- Des bateaux « faucardeurs / ramasseurs », équipés d'une fourche télescopique modulable à l'avant du bateau permettant de couper, ramasser et stocker les algues en un seul passage, sont également proposés pour les algues en flottaison (Ex : Ulves), notamment en plans d'eau (lacs, étangs, etc.) et canaux.
- Des navires « sabliers » sont utilisés pour la récolte de *Lithothamnium calcareum* ou « maërl », à l'aide d'une drague aspirante. Pour des raisons écologiques de maintien de cette espèce répertoriée comme « menacée ou en déclin », son exploitation est interdite en Bretagne depuis début 2013.



Figure 21 - Le scoubidou utilisé pour la récolte de *Laminaria digitata*



Figure 22 - Le peigne Norvégien utilisé pour la récolte de *Laminaria hyperborea*

A terre, les algues de rive ou algues d'échouage peuvent être récoltées de différentes façons, illustrées en Figure 23 :

- A pied : découpées (*Ascophyllum nodosum*, *Himanthalia elongata* ou *Fucus sp.*) ou arrachées (*Chondrus crispus*, *Porphyra*, etc.), ramassées à la main ou à la faucille et chargées dans des remorques tirées par tracteur. C'est un travail sélectif qui permet de fournir une biomasse de haute qualité utilisée pour l'alimentaire (en tant que légume) ou pour les carragénanes (*Chondrus*).
- A l'aide de bulldozers et tracteurs, que ce soit pour :
 - La récolte d'algues vertes en flottaison avant l'échouage sur les plages (donc avant décomposition) afin de garder une qualité chimique valorisable. Cette biomasse est récoltée en période d'efflorescence estivale (marées vertes).
 - La récolte d'algues échouées sur les plages. Cette biomasse considérée comme déchet (car souvent en cours de décomposition) est principalement utilisée pour un amendement direct de terres agricoles (signature de conventions avec les agriculteurs).



Figure 23 – Récolte sélective d’algues à terre par les goémoniers (à gauche) et collecte d’algues vertes avant échouage (centre ; sociétés Olmix / Agrival) et après échouage (à droite)

2.2.1.1.2 Les périodes de récolte : disponibilité de la biomasse

La récolte des algues suit un calendrier saisonnier respectant le cycle de reproduction de l’algue afin d’assurer le temps nécessaire à la restauration poste-récolte (on parle de plan de gestion). La disponibilité de la biomasse dépend donc des espèces, de la période de l’année et de la zone géographique considérée.

A titre d’exemple, le Tableau 5 indique les périodes de récoltes des principales espèces de macro-algues en France :

Toute l’année	Février à Avril & Septembre à Novembre	Mars à Décembre	Mars à Août	Mai à Octobre
<i>Ulva, Saccharina latissima, Himanthalia elongata, Ascophyllum nodosum, Fucus</i>	<i>Laminaria hyperborea</i>	<i>Palmaria palmata</i>	<i>Porphyra</i>	<i>Chondrus, Mastocarpus, Laminaria digitata</i>

Tableau 5 – Périodes de récolte des principales espèces de macro-algues en France

2.2.1.2 La culture des macro-algues

La culture des macro-algues, bien que minoritaire en France, représente la grande majorité de la production mondiale (cf. § 3.1.3.2). Les modes de culture des algues varient selon le mode de reproduction, sexué ou asexué, des espèces ciblées.

Les algues capables de se multiplier simplement par voie asexuée (ou dite végétative, exemple : Ulves) permettent une culture rapide et facile de la biomasse, dans des bassins à terre par exemple.

La reproduction sexuée implique quant à elle l’émission de spores microscopiques par les algues gamétophytes, mâle et femelle. La fécondation de ces spores donne ensuite lieu à une algue que l’on appelle sporophyte, qui est généralement la forme visible à l’œil nu et qui est récoltée. La reproduction sexuée se résume à une alternance de phase gamétophyte/sporophyte qui doit être maîtrisée pour pouvoir procéder à la culture de l’espèce.

Concrètement, les semences (spores) sont produites en écloséries, puis la fécondation et l’ensemencement des lignes par les plantules (gamétophytes) sont effectués à terre avant de procéder à la croissance de biomasse fixée sur des lignes posées en mer (horizontales et verticales). Ces différentes étapes, calquées sur le cycle reproductif des algues, sont illustrées en Figure 24 et Figure 25.



Figure 24 – Cycle de culture des macro-algues en mer (adapté de [10], [11])

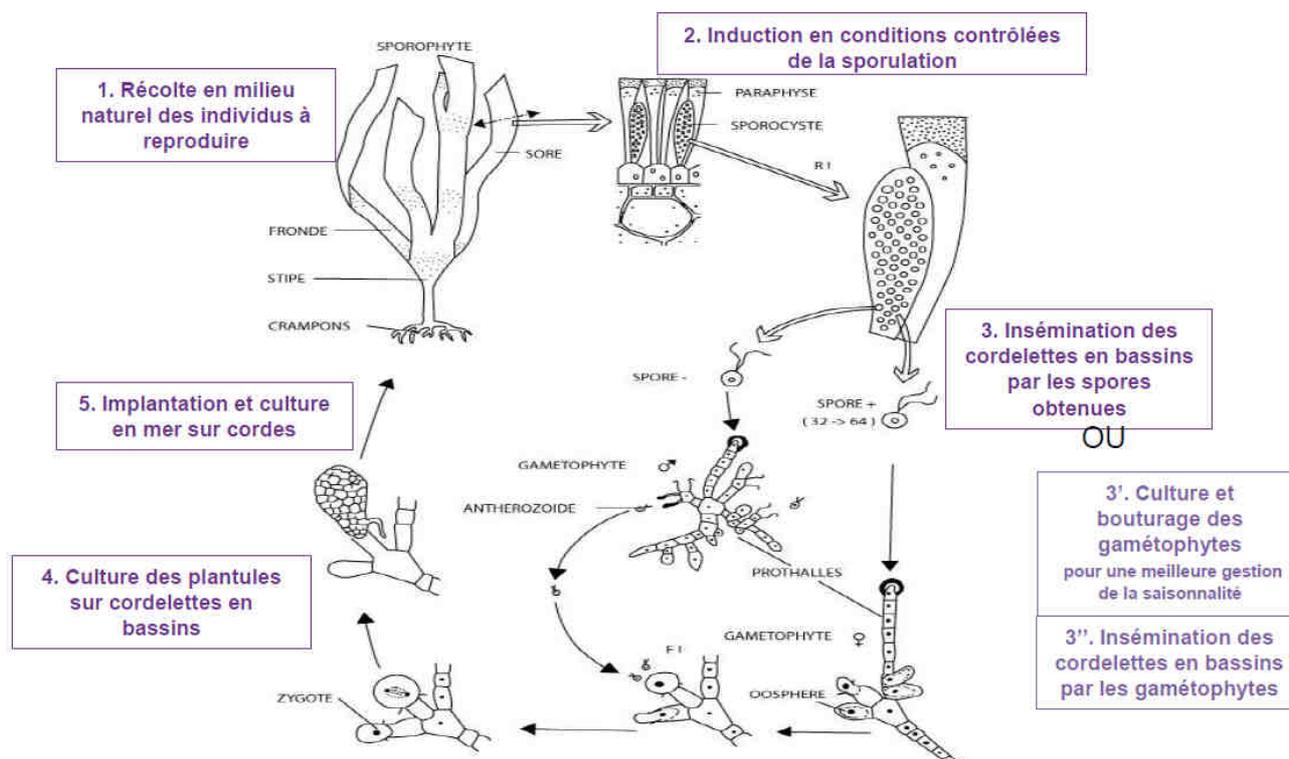


Figure 25 – Des étapes calquées sur le cycle reproductif, exemple de *Saccharina latissima* [11]

Par ailleurs, certaines macro-algues sexuées peuvent être cultivées en bassin à terre. L'entreprise vendéenne INNOVALG cultive par exemple une macro-algue (*Chondrus crispus*) en association avec une micro-algue (*Odontella*) depuis plus de 10 ans à l'aide de raceways à ciel ouvert (cf. Figure 26). Plusieurs projets de culture à terre sont en cours de préparation par des algoculteurs seuls ou en association avec des conchyliculteurs.



Figure 26 – L'entreprise INNOVALG équipée de raceways (à gauche) pour co-cultiver *Chondrus crispus* (au centre) et *Odontella aurita* (à droite)

Les techniques de culture sont aujourd'hui maîtrisées pour une partie des espèces disposant déjà d'applications commerciales (alimentation, agroalimentaire). Le principal enjeu associé à la culture des macro-algues dans l'optique d'une production de biocarburants est la maîtrise du changement d'échelle nécessaire à son industrialisation et à la baisse de ses coûts de production. En effet, la culture des macro-algues est relativement intensive en main d'œuvre, mais surtout, le passage à une grande échelle de production nécessiterait de passer des zones proches de la côte (généralement saturées) à une culture en pleine mer, ce qui pose aujourd'hui des problèmes majeurs d'ancrage à ces profondeurs. Des projets d'intérêt ont lieu pour évaluer le potentiel de la culture des macro-algues en association avec des parcs éoliens offshore, mais les surfaces restent limitées.

2.2.2 Technologies de pré-traitement et d'extraction

Tout d'abord, pour pouvoir être utilisées, les macro-algues nécessitent généralement d'être débarrassées des éventuels débris et sable, et rincées pour enlever l'excès de sel. En cas de production d'algues aliments, les algues sont simplement séchées, voire hachées/broyées. En cas de production de biomolécules particulières, les algues sont broyées, puis les différentes molécules extraites selon des techniques similaires aux micro-algues.

Dans le cas particulier des phycolloïdes, les techniques d'extraction et de purification sont spécifiques à chaque colloïde et font généralement intervenir différentes étapes combinant dissolution, précipitation, lavage, essorage et déshydratation ou encore des variations de pH.

2.2.3 Technologies de post-traitement pour une production de biocarburants

Comme indiqué sur l'arbre technologique des macro-algues (cf. Figure 20 page 44 ou Annexe 1 – Arbres technologiques), celles-ci peuvent théoriquement être valorisées en biocarburants, tout comme les micro-algues. Cependant, ces voies demeurent au stade R&D et malgré presque 30 ans de recherche et développement pour développer des voies de production de carburants à partir de macro-algues, cette possibilité demeure très lointaine [12]. Le verrou ne se situe pas au niveau de ces étapes de post-traitement mais dans la grande difficulté à cultiver des macro-algues à grande échelle et à bas coût (cf. 2.2.1.2). Par ailleurs, des débouchés à haute valeur ajoutée avec des marchés non saturés existent déjà pour nombre de macro-algues et composants cellulaires. Ainsi, les seules voies énergétiques aujourd'hui envisageables pour les macro-algues consisteraient soit à valoriser des algues d'échouage à coût très faible (voire quasi nul), soit à valoriser la biomasse résiduelle post-extraction de molécules à haute valeur ajoutée. Néanmoins, même cette dernière option est probablement à relativiser : les macro-algues ayant déjà une valeur énergétique limitée, le résidu d'extraction devrait montrer un intérêt encore moindre. Dans tous les cas, les volumes seraient vraisemblablement limités en plus d'être saisonniers. Le tableau ci-dessous reprend les principaux procédés étudiés à l'échelle R&D.

2.2.3.1 Méthanisation

Procédé biochimique complexe impliquant différentes bactéries et réactions chimiques successives en milieu anaérobie (sans oxygène). Les macro-molécules (protéines, lipides, glucides) sont tout d'abord hydrolysées en molécules simples (monosaccharides, acides aminés, etc.) qui sont convertis en acides organiques (acides gras volatiles ou AGV) par acidogénèse. Ces derniers sont à leur tour convertis en un mélange d'acétate, de CO₂ et d'H₂ par acétogénèse. Enfin, des bactéries pratiquant la méthanogénèse transforment soit l'acétate (voie acétoclastique) soit les gaz (voie hydrogénophile) en un mélange composé essentiellement de méthane CH₄ et de CO₂ qu'on appelle biogaz.

Le procédé se déroule à pression atmosphérique, à température dépendante des bactéries utilisées mais centrée autour de 38°C et un pH autour de 7. Le biogaz obtenu est ensuite séché, comprimé puis prétraité pour enlever les COV (Composés Organiques Volatiles) et l'H₂S. Il peut ensuite être valorisé en cogénération chaleur/électricité ou encore épuré et comprimé pour donner du biométhane. Ce dernier peut être injecté dans le réseau de gaz naturel ou transformé en bio-GNV (carburant véhicules). Toute la partie de la biomasse qui n'est pas convertie en gaz est appelée « digestat » ayant un intérêt agronomique en tant que fertilisant.

- **Entrée** : algue entière ou résidus d'extraction
- **Sortie** : biogaz ou biométhane

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Voie mature à l'échelle industrielle pour de nombreuses biomasses, pas de verrou technologique majeur ▪ Valorisation de l'algue entière ou des résidus d'extraction ▪ Voie humide, ne nécessite pas d'étape de séchage ▪ Production de digestats valorisables en agriculture, ou recyclables comme source de nutriments pour la culture des micro-algues ▪ Rentabilité annoncée atteinte en co-digestion si proche de la zone de récolte [13] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rendement en biogaz très dépendant du type d'algue et de la période de récolte pour une algue donnée (+/- 20% [11]) ▪ Inhibition liée à la forte teneur en sel des macro-algues (Cl⁻, Na⁺, K⁺) ▪ Epuration du biogaz en soufre nécessaire (haute teneur en soufre des macro-algues)
MATURITE	POTENTIEL
R&D / pilote	Potentiel élevé (débouché énergétique potentiel pour l'ensemble de la biomasse résiduelle post-extraction de molécules d'intérêt, y compris pour des algues cultivées en conditions potentiellement réhivitoires pour une application en alimentation humaine ou animale ²⁹)

2.2.3.2 Liquéfaction Hydrothermale

Procédé thermo-chimique à haute température (250 - 350°C) et haute pression (100 - 200 bars) en présence de catalyseurs.

- **Entrée** : algue entière ou résidus d'extraction
- **Sortie** : bio-brut

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Valorisation de l'algue entière ou des résidus d'extraction ▪ Voie humide, ne nécessite pas d'étape de séchage ▪ Bio-brut obtenu avec un pouvoir calorifique supérieur aux huiles de pyrolyse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réacteurs complexes ▪ Impact du type d'algue sur la composition du bio-brut inconnu
MATURITE	POTENTIEL
R&D	Potentiel modéré à élevé (algue entière en voie humide évitant séchage et extraction ; prometteur mais développement en retard sur la méthanisation)

²⁹ Comme l'utilisation de CO₂ capté ou d'eaux usées, ou l'utilisation de techniques d'extractions toxiques pour l'alimentation

2.2.3.3 Fermentation alcoolique

Procédé biochimique durant lequel les sucres simples extraits des algues subissent une fermentation alcoolique impliquant des micro-organismes (généralement des levures ou des bactéries) et des enzymes. Des carbohydrates plus complexes comme l'amidon peuvent également être fermentés après une étape d'hydrolyse enzymatique (amylases). L'éthanol obtenu est récupéré par distillation et déshydratation. Le bioéthanol obtenu présente certaines limites (cf. inconvénients) qui peuvent être compensées par sa conversion en ETBE ("Ethyl tertio-butyl ether") par un ajout d'isobutène.

Les macro-algues particulièrement riches en carbohydrates peuvent être fermentées après une étape d'hydrolyse des polysaccharides comme la cellulose ou le mannitol afin de rendre les sucres accessibles aux bactéries ou champignons pratiquant la fermentation.

- **Entrée** : résidus d'hydrolyse
- **Sortie** : bioéthanol ou biobutanol

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Voie humide, ne nécessite pas d'étape de séchage 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verrou enzymatique, nécessite le développement de bactéries/champignons spécialisés [12] ▪ Faible teneur en sucres comparé à d'autres biomasses Ex : Rendement en éthanol / kg d'algue = 60% du rendement maïs [13] ▪ Production saisonnière d'éthanol, solutions de stockage long-terme inexistantes ▪ Solution très peu compétitive à moins d'une récolte quasi gratuite [13] ▪ Emissions de CO₂ (par respiration), contrairement aux algues photosynthétiques qui en consomment
MATURITE	POTENTIEL
R&D	Potentiel faible

2.3 Conclusion

Que ce soit pour les micro- ou macro-algues, il existe de nombreuses technologies envisageables à chaque étape de la chaîne procédée, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients. Bien que la gamme de produits en sortie diffère partiellement, les grandes étapes de la chaîne de production sont identiques pour les deux filières.

Les différentes étapes de cette chaîne sont interdépendantes : chaque étape va conditionner la pertinence et l'efficacité des technologies situées en amont ou en aval. Le choix des technologies utilisées doit par conséquent se faire de manière intégrée, en fonction des conditions locales de culture et des contraintes et opportunités du marché.

Techniquement, de nombreuses chaînes de production sont déjà faisables aujourd'hui, tant pour des produits à moyenne et haute valeur ajoutée que pour des carburants : la lecture des arbres technologiques le montre, il est d'ores et déjà possible de convertir des algues en produits en ne passant que par des briques procédées technologiquement matures (« briques vertes » sur les arbres).

Au sein de ces chaînes de production technologiquement matures, seules certaines sont aujourd'hui économiquement matures. Toutes ou presque mènent à des produits à relativement haute valeur ajoutée, condition pour le moment requise pour justifier des coûts de production importants. Ces schémas rentables sont aujourd'hui plus présents du côté des macro-algues, dont le caractère macroscopique rend certaines étapes techniquement plus simples (la phase de récolte et concentration, notamment) et/ou moins coûteuses (la phase de culture par exemple, allant jusqu'à être gratuite dans le cas d'une récolte d'algues sauvages). Il peut également s'avérer non seulement faisable mais rentable de cultiver des micro-algues avec du CO₂ pur livré par camions, de les récolter par centrifugation puis de les sécher à l'aide d'un sécheur « flash », si c'est pour vendre des capsules d'algues riches en bêta-carotène pour l'alimentation humaine à plusieurs milliers d'euros le kilo.

A l'inverse, les enjeux restent de taille en ce qui concerne la production viable de produits énergétiques (ou plus généralement, à faible valeur ajoutée), qui se heurte quant à elle à deux verrous majeurs :

- Des coûts de production ne permettant pas de concurrencer les sources d'énergie conventionnelles.
- La nécessité d'une importante montée en échelle des chaînes de production pour à la fois faire des économies d'échelle et répondre à l'enjeu précédent à l'échelle d'un projet, et produire des volumes significatifs nécessaire à une quelconque influence sur les marchés de masse que sont les marchés de l'énergie.

La baisse des coûts dans une optique de production de biocarburants de 3^e génération passera probablement, à moyen-long terme, par :

- Le développement de systèmes de culture hybrides (cf. Figure 15 par exemple), conciliant les bas coûts des systèmes ouverts avec les productivités volumiques supérieures des PBR liées en raison d'un meilleur contrôle des conditions opératoires et d'une réduction des risques de contamination.
- Le développement de procédés et de chaînes de production permettant de s'affranchir d'une ou plusieurs des étapes de récolte, séchage et extraction, ces étapes comptant pour approximativement 40 à 60% des coûts de production. Cela peut passer par le développement de procédés d'extraction en voie humide (pour éviter le séchage), une valorisation directe de la biomasse humide (e.g. par méthanisation ou liquéfaction hydrothermale) ou encore, plus efficace mais plus lointain, le développement des techniques de « milking » et des procédés 3G+ mentionnés en Figure 9 (qui évitent l'ensemble des trois étapes).
- La promotion, à travers la culture de micro-algues, de synergies entre la production d'énergie et des services environnementaux tels que la valorisation de CO₂ capté sur des installations émettrices et le traitement d'eaux usées (ou plus généralement, de déchets).
- Une co-production de produits énergétiques et de produits à plus haute valeur ajoutée au sein d'unités intégrées ou « bio-raffineries », permettant d'augmenter la rentabilité de projets à vocation prioritairement énergétique dans la limite de la taille des marchés en question (cf. partie 3).

Du côté des produits à haute valeur ajoutée, le gros des efforts à apporter réside dans l'identification de nouvelles souches et le développement de nouveaux procédés innovants qui, combinés, permettront d'élargir le spectre des produits et molécules à haute valeur ajoutée aujourd'hui valorisées et de créer de nouvelles opportunités sur ces marchés.

Plus généralement, les chaînes de production algales font appel à un nombre important d'étapes nécessitant des compétences variées (de la microbiologie au génie des procédés en passant par l'agronomie) et impliquant par consé-

quent un écosystème d'acteurs relativement diversifié et éclaté. Si les consortiums de recherche public-privés sont relativement efficaces pour faire avancer la R&D et démarrer les projets pilotes, des acteurs intégrateurs seront probablement nécessaires à moyen-long terme.

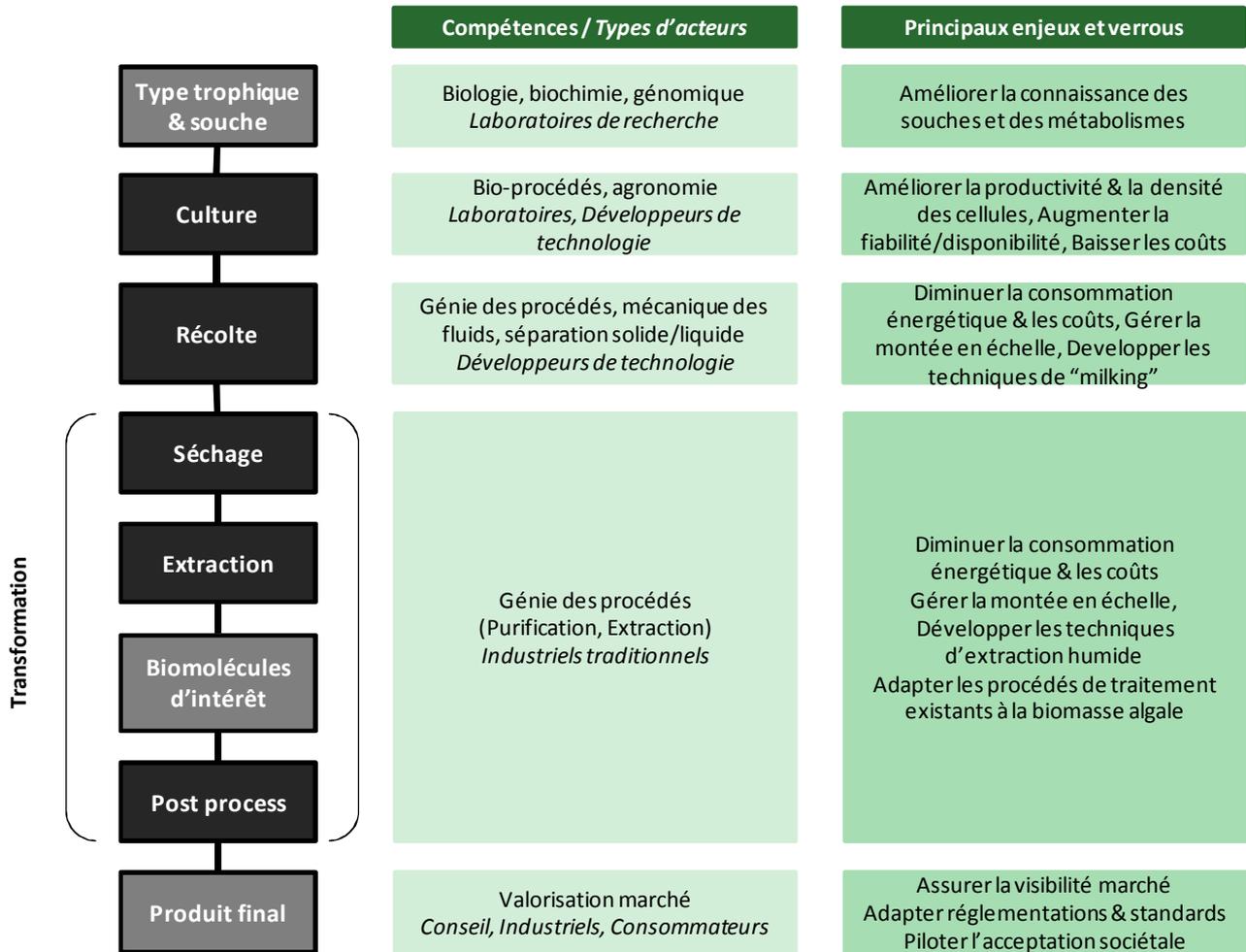


Figure 27 – La chaîne algale : de nombreux acteurs, de nombreux enjeux

3 État des lieux des filières algales : marchés et acteurs

3.1 La filière micro-algues

Cette section fait l'état des lieux de la filière micro-algues actuelle dans le monde (volumes de production, caractérisation des principaux marchés, analyse du contexte de pays en pointe) puis en France (volumes de production, principaux acteurs, principaux projets).

3.1.1 Les micro-algues dans le monde

3.1.1.1 Production et consommation mondiale de micro-algues

Au niveau mondial, la production de micro-algues est d'environ 15 000 t de matière sèche, pour une valeur (faisant encore peu consensus) estimée en 2010 entre 600 millions d'euros [14] et 3,3 milliards d'euros [15].

Le marché commercial effectif n'est encore qu'en croissance lente, principalement porté par la production de Spiruline, mais le secteur bénéficie plus largement d'une attention et d'efforts de R&D en forte croissance depuis un peu plus de 5 ans. Cet engouement retrouvé, lié à la perspective de produire des biocarburants de 3^e génération à partir de micro-algues dans un contexte de hausse du prix du pétrole et de la conscience environnementale des consommateurs, s'est illustré par l'apparition de dizaines de startups et la croissance exponentielle du nombre de publications scientifiques sur le sujet (cf. Figure 28 ci-contre).

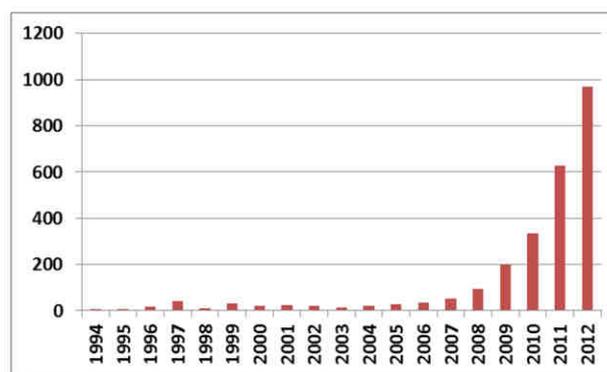


Figure 28 – Évolution du nombre de publications par an sur les micro-algues [16]

Cette course à l'eldorado des biocarburants algaux semble se rationaliser depuis un an ou deux face aux coûts de production, nombre d'acteurs annonçant un report vers une production préliminaire de produits à plus haute valeur ajoutée ou une co-valorisation. Néanmoins, la dynamique est créée et la production mondiale de micro-algues devrait continuer à augmenter dans les années à venir.

3.1.1.1.1 Types d'algues

99% du volume mondial de production est concentré sur une douzaine d'espèces de micro-algues dont les principales sont :

- *Arthrospira* ou Spiruline (cyanobactérie), la plus cultivée au monde (5 kt/an)
- *Chlorella vulgaris*
- *Dunaliella salina*
- *Aphanizomenon flos-aquae* (cyanobactérie)
- *Haematococcus pluvialis*
- *Cryptocodinium cohnii* (absence de chloroplaste)
- *Ulkenia sp.*
- *Ondotella aurita* (diatomée)
- *Schizochytrium* (protiste hétérotrophe à la frontière avec les champignons)
- *Nannochloropsis*
- *Euglena*

Une vingtaine d'autres espèces ou genres sont également étudiées, sans pour l'instant atteindre de volumes de production significatifs. On peut citer notamment : *Botryococcus braunii*, *Nannochloris*, *Scenedesmus*, *Tetraselmis*, *Cylindrotheca*, *Isochrysis*, etc.

3.1.1.1.2 Principaux marchés

Le premier marché en volume pour les micro-algues (74% [14]) est celui de l'alimentation humaine, principalement en tant que complément alimentaire riche en protéines et oméga-3. De nombreux produits dérivés (pain, pâtes, biscuits, jus et même chocolat à la Spiruline, pour n'en citer que quelques uns) sont également vendus dans certains pays en volumes plus limités (e.g. Chine) et font doucement leur apparition dans les pays occidentaux, présentés comme des aliments fonctionnels sources de bienfaits pour la santé.

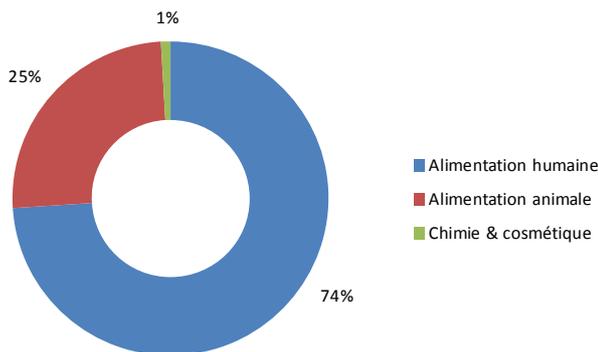


Figure 29 – Répartition des marchés mondiaux actuels des micro-algues en volume (adapté de [14])

En Europe, les micro-algues doivent passer une procédure relativement stricte d'homologation avant de pouvoir être commercialisées en alimentation humaine. Sont aujourd'hui autorisées : *Spirulina* (dans toute l'Europe, depuis 1981) *Ondotella aurita* (en France, depuis 2002) et *Chlorella vulgaris* (en France, depuis 2004).

Vient ensuite l'alimentation animale (25% [14]) et particulièrement l'alimentation aquacole. Dans ce dernier cas, les algues sont fournies séchées ou vivantes (« eau verte », typiquement : *Skeletonema*, *Nitzschia*, *Nannochloropsis*).

Enfin, le dernier en volume (1% [14]) mais aussi le marché le plus lucratif est celui des molécules à haute valeur ajoutée pour la chimie et la cosmétique (pigments, PUFAs, polysaccharides). Les pays asiatiques notamment ont d'ores et déjà intégré les micro-algues à leurs habitudes de consommation, pas uniquement alimentaires mais également hygiéniques, avec la vente de produits tels que des dentifrices à base de Spiruline.

A noter que les micro-algues peuvent également fournir des services à caractère environnemental en parallèle de leur culture : valorisation de CO₂ industriel ou agricole capté (centrale thermique, cimenterie, aciérie, etc.) et épuration d'eaux usées ou d'effluents industriels. Ainsi, les micro-algues jouent un rôle clé dans les procédés d'épuration de l'eau par lagunage (20% du parc des stations d'épuration en France), bien qu'elles ne soient aujourd'hui pas valorisées en dehors du procédé (typiquement consommées par du zoo-plancton, autres micro-organismes présents sur la chaîne d'épuration). Ces services sont peu valorisés par rapport à certains produits mais sont néanmoins une condition *sine qua non* à une production viable de biocarburants, tant sur le plan économique qu'environnemental.

Il n'existe pas encore de production commerciale de biocarburants à partir de micro-algues. De nombreuses compagnies ont construit des unités pilotes ou de démonstration, qui produisent aujourd'hui des volumes limités de biocarburants, généralement valorisés dans le cadre de partenariats spécifiques avec de futurs consommateurs. Solazyme a par exemple délivré 5 700 litres de jetfuel algal à l'US Navy en 2010.

Ces différents produits ont plus ou moins de valeur ajoutée, en fonction de leur prix de vente sur leurs marchés respectifs. La Figure 30 représente de manière simplifiée les différents types de produits micro-algaux, par marché, et leur valeur ajoutée. Bien que celle-ci soit variable et que ce graphique ne soit qu'indicatif, on peut garder en tête les ordres de grandeur suivants : quelques euros à une dizaine d'euros le kilo pour les produits de faible à moyenne valeur ajoutée, quelques dizaines d'euros le kilo pour les produits de moyenne à haute valeur ajoutée, et de quelques dizaines à quelques centaines voire milliers d'euros le kilo pour les produits de haute à très haute valeur ajoutée.

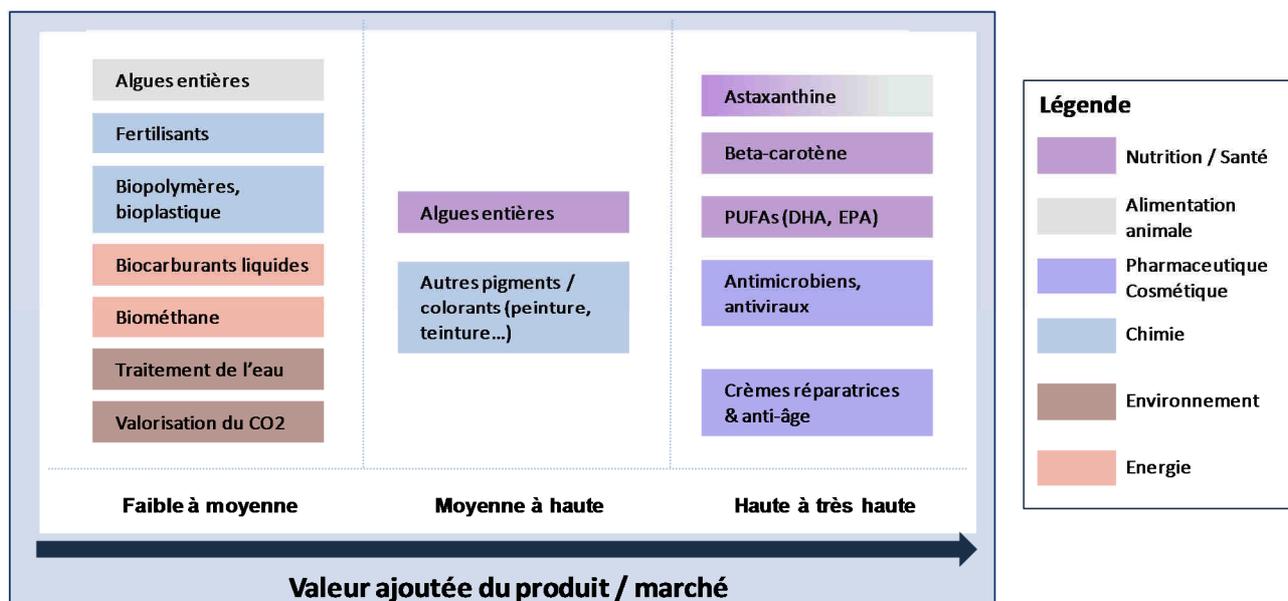


Figure 30 – Principaux produits micro-algaux par secteur d'application et valeur ajoutée

Tous marchés confondus, on estime que la moitié des algues produites sont vendues « entière », l'autre moitié faisant l'objet d'une extraction de biomolécules d'intérêt [14], les principaux extraits étant de loin les pigments.

3.1.1.1.3 Mode de production

La grande majorité de la production de micro-algues aujourd'hui dans le monde repose sur l'utilisation d'algues phototrophes cultivées en bassins ouverts.

3.1.1.1.4 Localisation de la production mondiale

La majorité de la production mondiale est située dans les pays asiatiques. En Europe, le premier producteur est l'Allemagne, avec environ 150 t_{MS}/an.

Le Tableau 6 donne le détail des tonnages de production annuelle de micro-algues par type de souche et fait le lien entre les espèces, les principaux éléments valorisés et les marchés sur lesquels ces produits trouvent des applications.

Micro-algue	Production annuelle de biomasse (t _{MS} /an)	Principaux pays producteurs	Produit typique	Applications
<i>Spirulina platensis</i>	4-5000	Etats-Unis, Chine, Inde, Japon, Myanmar	Biomasse Algue séchée riche en phycocyanine	Alimentation et nutrition humaine et animale, nutrition, cosmétique
<i>Chlorella vulgaris</i>	2000	Taiwan, Allemagne, Japon		Alimentation humaine, aquaculture, cosmétique
<i>Dunaliella salina</i>	1200	Australie, Israël, Etats-Unis, Chine	Algue séchée riche en β-carotène Extrait de β-carotène	Alimentation humaine et animale, agroalimentaire, cosmétique
<i>Nostoc fusiforme</i>	600	n.r	Biomasse	Alimentation humaine
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	500	Etats-Unis	Biomasse	Alimentation humaine
<i>Haematococcus pluvialis</i>	50-300	Etats-Unis, Inde, Israël	Algue séchée riche en asthaxanthine Extrait d'asthaxanthine	Aquaculture, agroalimentaire, pharmaceutique (immunologie, anti-oxydant)
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	240	Etats-Unis	DHA	Nutrition (infantile)
<i>Ondotella aurita</i>	20	n.r	Biomasse EPA	Alimentation humaine, cosmétique (anti-inflammatoire, renforcement capillaire)
<i>Shizochytrium</i>	10	Etats-Unis	DHA	Nutrition infantile

Tableau 6 – Principales micro-algues commercialisées, applications et volumes concernés (d'après [16], [14], [17])

3.1.1.2 Caractérisation de ces marchés

Comme exposé précédemment, les différents marchés accessibles aux micro-algues varient énormément en valeur ajoutée des produits mais également en taille, comme représenté ci-dessous (les valeurs indiqués sont des ordres de grandeurs à caractère principalement illustratif) :

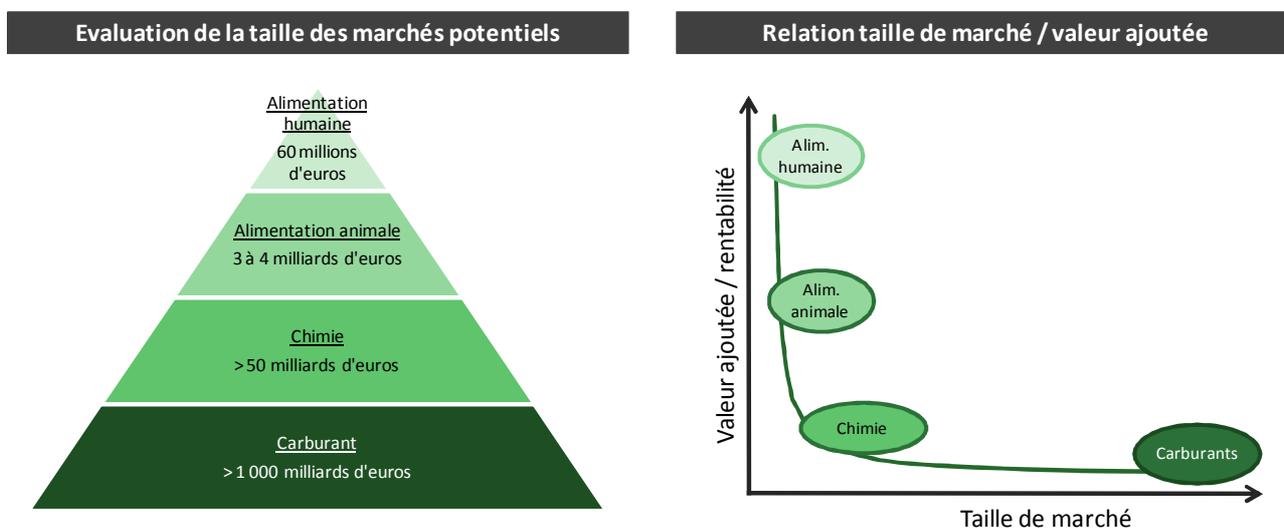


Figure 31 – Taille des principaux ensembles de marchés sur lesquels les micro-algues peuvent s’insérer et relation schématisée entre taille de marché et valeur ajoutée (adapté de [18], [19], chiffres 2010)

De manière simplifiée, la valeur ajoutée d’un produit est inversement proportionnelle à la taille de son marché.

La valeur ajoutée très supérieure de certains coproduits (molécules pharmaceutiques, acides gras, antioxydants...) par rapport à celle des huiles utilisées pour produire des hydrocarbures, permet en théorie d’améliorer le bilan économique de l’exploitation des micro-algues. En fait, la situation est plus mitigée. S’il est a priori possible de valoriser simultanément différents composés de la biomasse algale, un problème de compatibilité entre les volumes des marchés de biocarburant et des marchés à haute valeur ajoutée se pose en pratique. Par exemple, la concentration d’une micro-algue en PUFAs est globalement 10 fois inférieure à la concentration en triglycérides utilisables pour la production de biodiesel. Une covalorisation des deux à grande échelle pour produire quelques % du marché mondial du diesel saturerait le marché des PUFAs et ferait chuter leur prix. Si elle représente une solution à court et moyen termes pour rentabiliser des projets orientés carburants, la viabilité économique de la coproduction n’est pas assurée à l’échelle industrielle à long terme.

Le Tableau 7 donne des informations plus précises sur les principaux produits micro-algaux : ordres de grandeurs de prix de vente et de taille de marché, maturité du marché et potentiel intérêt pour de nouveaux entrants.

Les applications des micro-algues dans la pharmacie sont encore balbutiantes et représentent aujourd’hui des volumes négligeables. Un vaste et prometteur champ de recherche reste encore à explorer pour ce marché en expansion. Considérant que 64% des nouveaux médicaments approuvés entre 1981 et 2002 provenaient de sources naturelles ou de produits naturels modifiés, contre 33% seulement issus de produits totalement synthétiques, on peut considérer ce secteur comme favorable aux micro-algues [20]. Bien que ce champs n’en soit qu’à ses débuts, on peut citer quelques molécules micro-algales d’ores et déjà étudiées comme ingrédients pharmaceutiques [14]:

- La curacine, extraite de *Lyngbya majuscula*, pour des applications anti-cancer
- La cryptophycine, extraite de *Nostoc sp.*, pour des applications anti-cancer
- L’acide ocadaïque, extrait de *Prorocentrum lima*, pour des applications anti-cancer
- La saxitoxine, extraite de *Alexandrium sp.*, pour ses effets analgésiques

Catégorie	Produits	Taille / Valeur du débouché mondial actuel	Prix de vente (\$/kg MS)	Maturité du marché	Potentiel d'évolution et intérêt
Biomasse	Biomasse pour alimentation humaine	1,1 Mds \$	10-80	Mature	En croissance
	Biomasse comme complément alimentaire		25-52	Mature	En croissance
	Biomasse pour aquaculture		50-150 \$/kg 70 \$/L	Mature	En croissance rapide
	Biomasse comme complément alimentaire pour animaux		10-130		En croissance rapide
Pigments	β -carotène	35-40 kt/an > 25 M\$	300-3000 (très dépendant de la qualité)	Mature, saturé et compétitif, fortes barrières à l'entrée	Intérêt limité
	Astaxanthine	>250 M\$:	~2500 - 10000 (très dépendant de la qualité)	Mature ; Non compétitif par rapport à la molécule synthétique (BASF)	Marché de niche au sein duquel le caractère naturel importe : nourriture animale
	Fucoxanthine	Marché de niche	~3000	Non mature Très verrouillé (nombreux brevets)	Marché en croissance Intérêt fort
PUFAs	Extraits de PUFAs	10 M\$	30-80	En développement	Marché en croissance et pression sur la ressource halieutique (marché total des $\Omega 3$: 1,5 Mds\$ en 2010 dont 90% de ressources marines) Intérêt fort
	EPA ($\Omega 3$)	300 M\$ 300 t/an			
	DHA ($\Omega 3$)	250 M\$			
Bio-carburants	Biocarburants liquides	Anecdotique	Cible : baril à ~100\$ soit 0,47€/L ³⁰	Non existant	Marché à construire Volumes potentiels énormes Intérêt fort
	Biogaz	Faible		Non mature	Intérêt fort

Tableau 7 – Caractérisation des principaux marchés des produits micro-algaux (adapté de [14], [19])

³⁰ Cours du Brent au 14/10/13

3.1.1.3 Analyse du contexte dans quelques pays clés

L'effort de recherche engagé à travers le monde est conséquent (plusieurs milliards de dollars pour les micro-algues uniquement aux États-Unis au cours des dernières années, de nombreux projets de culture de macro-algues à grande échelle en Europe), et de nombreuses ruptures technologiques sont attendues pour faire baisser les coûts, améliorer les rendements énergétiques et plus globalement le bilan environnemental de ces solutions.

La reprise des recherches pour les micro-algues, principalement sous l'impulsion d'une forte hausse du baril de pétrole en 2006, a déjà connu trois phases. Une première phase de type « bulle » où de nombreux acteurs ont investi un créneau qu'une analyse trop rapide semblait promettre à des débouchés lucratifs à très court terme. La R&D s'est repliée sur des consortia minimalistes, associant souvent un industriel à une équipe de recherche, mais le potentiel des micro-algues a continué à être largement survendu ; le parti pris des startups qui visaient une commercialisation rapide, ou des équipes de recherche qui voyaient l'opportunité de faire financer leurs travaux a progressivement décrédibilisé une partie des acteurs du domaine. La bulle a finalement explosé au bout de cinq années, dans une phase de sélection, et seules les sociétés les plus solides ont survécu. Cette seconde phase a permis de prendre la mesure des enjeux et des échelles de temps nécessaires pour répondre aux différents marchés, depuis les molécules à haute valeur ajoutée jusqu'à l'énergie et la chimie bio-sourcée. La majorité des acteurs qui avaient annoncé des développements pour le marché de l'énergie se sont redirigés vers les applications nutrition ou santé. Plus récemment, une troisième phase s'est amorcée, où la R&D s'est inscrite plus sereinement dans des échelles de temps en accord avec les défis à relever.

Afin de comprendre la dynamique de la filière micro-algues et les conditions favorables à son émergence en France, il est important de s'intéresser au contexte des pays les plus avancés en la matière. On peut notamment citer les États-Unis, le Japon, la Chine, l'Australie, Taïwan ou encore Israël. En Europe, les pays leaders sont l'Allemagne, la France, l'Espagne, le Royaume-Uni et les Pays-Bas.

Sans prétendre à l'exhaustivité, cette section donne une vision synthétique de l'environnement des micro-algues dans quelques-uns de ces pays clés.

3.1.1.3.1 États-Unis

Les États-Unis sont probablement le pays le plus dynamique sur les micro-algues, avec la plus grande concentration d'acteurs et de projets de R&D (entre 30 et 40% des projets mondiaux actuels [21]) et les efforts mondiaux les plus conséquents investis sur le développement des applications biocarburant. Comme raisons à ce constat, on peut citer :

- Les efforts majeurs du gouvernement américain de cette dernière décennie en matière d'aide au financement de projets de R&D et de démonstration sur les micro-algues, notamment pour les applications biocarburants. Le secteur du transport représente en effet les 2/3 des consommations de pétrole et 1/3 des émissions de gaz à effets de serre aux États-Unis, et le pays présentait d'importants enjeux d'indépendance énergétique jusqu'à l'apparition récente de ressources non conventionnelles (gaz de schiste, etc.).
- Des conditions climatiques particulièrement favorables dans les États du Sud et de l'Ouest notamment,
- La position dominante des États-Unis en matière de recherche scientifique et de biotechnologies,
- La culture entrepreneuriale américaine favorisant l'émergence de startups.

PRINCIPAUX ACTEURS	PRINCIPAUX PROJETS & INITIATIVES
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Publics : California Center for Algae Biotechnology, Arizona State University, Sandia National Laboratories, NASA, University of Texas, California Polytechnic State University, etc. ▪ Privés : Cyanotech, Earthrise nutritionals, Sapphire Energy, Martek, Solazyme, Algenol Biofuels, Cellana, Solix Biosystems, BARD Holdings, Heliae Development LLC, Aquaflow bionomics, Synthetic genomics, General Atomics, OriginOil, Phycobioscience, Parabel, Al-gix, etc. ▪ Consortiums & Associations: Algal Biomass Association, Algal Biomass Organization, National Biodiesel Board, National Alliance for Advanced Biofuels and Bio-products (NAABB)  <p data-bbox="148 1075 766 1137">Figure 32 – L'écosystème US des micro-algues (en bleu les laboratoires, en vert les entreprises et projets) [22]</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cyanotech : production commerciale de Spiruline en raceway pour alimentation et nutrition humaine. ▪ Earthrise : production commerciale de Spiruline en raceway sur 56 000 m² (5,6 ha) ; 400 t_{MS}/an. ▪ Sapphire Energy : unité pilote ; unité de démonstration en construction pour multi-valorisation en raceway sur 400 000 m² (40 ha). ▪ Martek (DSM) : deux unités commerciales de production de micro-algues hétérotrophes pour applications nutrition et cosmétique. ▪ Solazyme : unités de démonstration pour biocarburants et unité commerciales pour produits à HVA. ▪ Solix Biosystems : unité pilote en PBR immergés sur 3000 m² (4000 L) pour co-valorisation ▪ General Atomics : unité de démonstration de production de jetfuel en raceway à Hawaï ▪ Algenol : unité de démonstration pour production de bioethanol sur 65 000 m² (6,5 ha) en Floride

REGLEMENTATION & INCITATIONS	AIDE AU FINANCEMENT
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Renewable Fuel Standard 2 (RFS2) de l'US EPA (2013), fixant les taux d'incorporation de biofuels : multiplication de la production de biocarburants par 6 entre 2008 et 2022 (jusqu'à 136 milliards de litres/an), avec des quotas spécifiques pour les biocarburants avancés (i.e. ici, autres que bioéthanol de maïs) ; Les carburants algaux ne sont cependant éligibles qu'à 15% de ces mandats [22] (éligibles au « biomass based diesel » dont la planification des quotas reste encore indéterminée et de toute façon limitée, et non éligibles à la catégorie « cellulosic biofuels » qui eux doivent passer de 3% à 44% du mandat d'incorporation d'ici 2022 alors que les quotas actuels ne sont pas atteints [23]). Des négociations sont en cours pour inclure les carburants algaux à cette dernière catégorie. ▪ L'American Taxpayer Relief Act de 2012 a d'ores et déjà inclus les carburants algaux à la réduction de taxe et au crédit d'impôt jusque là réservé à l'éthanol cellulosique (-50% la première année). ▪ Biorefinery Assistance Program : garantie de prêt. 	<p>Le Congrès américain finance des travaux sur les biocarburants microalgaux depuis les années 70, de façon plus ou moins intensive au grès du cours du pétrole.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Financements du Department of Energy (DOE) : En décembre 2010, le DOE annonçait avoir investi en tout 236 M\$. A cela se sont ajoutés 43 M\$ en 2012 et 51 M\$ prévus pour 2013, soit un total de 330 M\$. Ces investissements se font par l'intermédiaire d'entités et programmes variés : Office of Biomass Program (OBP), Advanced Research Projects Agency (ARPA-E), Office of Science, Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) office, le Fossil Energy Program, ou encore le Small Business Innovation Research Program (SBIR). ▪ Financements d'autres départements comme le Department of Defense (DOD) ou le Department of Agriculture (USDA). Exemple : en 2011, ces deux entités ont fait en commun la plus importante commande de biocarburant (mélange de déchets et d'algues) de la part d'une administration : 450 000 gallons (1,7 millions de litres) pour 12 M\$. ▪ American Recovery and Reinvestment Act de 2009: en plus des 146 M\$ distribués directement par le DOE, l'ARRA a également dépensé 49 M\$ dans la construction du consortium R&D NAABB, mêlant industriels, universitaires et laboratoires nationaux. ▪ Multitude de prix, bourses et autres « awards » pouvant co-financer des projets : Rocky Mountain Clean tech competition, Frost & Sullivan's "Hot Investment Prospect in Biofuels" award, Global Algae Biofuels Green Excellence in Technology Innovation of the Year Award, Small Business Innovation Research (SBIR) grant from the National Science Foundation, Texas Emerging Technology Fund, US Air Force grant

Tableau 8 – Le contexte des micro-algues aux Etats-Unis

3.1.1.3.2 Japon

Le Japon est un des pays possédant une grande expérience de production commerciale et consommation de microalgues et d'algues en général, essentiellement dû aux habitudes alimentaires asiatiques. Heian Chlorella G.F.C. Co, renommée Sun Chlorella en 1980, produit des Chlorelles depuis 1969. Le pays consommait déjà en 1996 autour de 2000 t/an de Chlorelle (1100 t/an produites localement contre 600 t/an deux ans plus tôt, le reste importé de Taiwan) et 400 t/an de Spiruline importée des Etats-Unis, Thaïlande et Taiwan [24]. Ces micro-algues étaient et demeurent destinées au marché de la nutrition humaine sous forme de poudre d'algue ou de tablettes, accessoirement à l'aquaculture, et produites pour moitié de manière autotrophe en bassins ouverts circulaires, et pour moitié de manière hétérotrophe en fermenteur.

PRINCIPAUX ACTEURS	PRINCIPAUX PROJETS & INITIATIVES
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Publics : NEDO (New Energy & Industrial Technology Development Organization, pilotant l'ensemble de la recherche japonaise sur l'énergie), University of Tsukuba, University of Tokyo, Tottori University, etc. ▪ Privés : Chlorella Industry, Euglena Inc., Yaeyama Chlorella, Nihon Chlorella, Kyowa Hakko Togyo, Ren-go. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plusieurs installations commerciales de Chlorelle pour applications en alimentation/nutrition humaine ▪ Projet de production d'<i>Euglena gracilis</i> pour la production de cosmétiques (recherche amont) : University of Tokyo, Tottori University, Kinki University, Osaka Prefecture University, Euglena Inc.
REGLEMENTATION & INCITATIONS	AIDE A LA R&D
<ul style="list-style-type: none"> ▪ n.r. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Financements du NEDO

Tableau 9 – Le contexte des micro-algues au Japon

3.1.1.3.3 Chine

Tout comme le Japon et plusieurs de ses voisins asiatiques, la Chine produit et consomme des algues depuis longtemps. Le pays hébergeait déjà 80 producteurs de Spiruline à la fin des années 90, produisant chacun entre 3 et 500 t/an [24], commercialisées en alimentation humaine.

L'émergence des problématiques associées à la sécurité énergétique de la Chine et au changement climatique ont renforcé l'attention de la Chine sur les micro-algues ses dernières années. Plusieurs projets pilotes sont apparus ces dernières années, la plupart du temps en partenariat étroit ou entreprises communes (« joint ventures ») avec des sociétés occidentales.

Le soutien à l'axe algocarburant est notamment expliqué par la réticence de la Chine à développer des biocarburants de première génération en compétition avec les ressources alimentaires, par l'accès facilité à de vastes terrains, à de l'eau, à du CO₂ capté et par un ensoleillement favorable. Les modes de culture envisagés sont principalement des raceways équipés de bâches en raison des fortes pluies au Sud-Est et des hivers froids de la partie Nord du pays.

PRINCIPAUX ACTEURS	PRINCIPAUX PROJETS & INITIATIVES
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Publics : Qingdao Institute for Bioenergy and Biotechnology (200 chercheurs en 3 ans) ▪ Privés : ENN 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ JV entre Seambiotic (Israël), Yantai Hairong Electricity (CO₂ capté) et Penglai Weiyuan Science & Trading Ltd avec une unité pilote de production de microalgue de 8000 m² en raceway pour multi-valorisation. ▪ Accord cadre entre Parabel et CECEP/Chongqing Industry pour la construction de 10 unités de 5000 ha en raceway (une unité pilote existante). ▪ ENN : unité pilote en raceway en fin de construction pour applications biocarburant. MoU avec EADS pour application jetfuel. ▪ MoU signé entre Algae.Tec et la Shandong Kerui Group Holding pour une JV et la construction d'une unité de démonstration de PBR à illumination interne pour production de biodiesel.
REGLEMENTATION & INCITATIONS	AIDE A LA R&D
<ul style="list-style-type: none"> ▪ N/A 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ N/A

Tableau 10 – Le contexte des micro-algues en Chine

3.1.1.3.4 Australie

L'Australie dispose à la fois :

- De conditions climatiques et environnementales très favorables à la production de micro-algues,
- D'une situation insulaire et des ressources fossiles limitées faisant de la sécurité énergétique un enjeu prioritaire du gouvernement (85% des carburants pour les transports ont été importés en 2013 [25]),
- Un enjeu partagé par des acteurs majeurs du transport aérien, Qantas Airways et Virgin Australia, qui ont exprimé leur intérêt à bio-sourcer 5% de leur carburant d'ici 2020 [25].
- D'une industrie aquacole développée, estimée à 5 milliards de dollars.

PRINCIPAUX ACTEURS	PRINCIPAUX PROJETS & INITIATIVES
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Publics : Murdoch University, Melbourne University, Cook University, University of Queensland (Solar Biofuels Research Centre), University of Adelaide ▪ Privés : Cognis (BASF), Aurora algae, MBD Energy Ltd, Muradel, Algae.Tec. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cognis (BASF) : production commerciale de β-carotène depuis 1986 en bassins ouverts extensifs sur deux sites de 520 et 440 ha. ▪ Aurora algae : unité de démonstration pour applications en alimentation, nutrition et pharmaceutique en raceway sur 80 000 m² (0,8 ha) ; 185 t_{MS}/an. ▪ Muradel (JV entre Murdoch University, Adelaide Research and Innovation & SQC) : pilote en raceway pour production de biodiesel et jetfuel sur 4 000 m².
REGLEMENTATION & INCITATIONS	AIDE A LA R&D
<ul style="list-style-type: none"> ▪ N/A 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Australian Renewable Energy Agency's (ARENA) Advanced Biofuels Investment Readiness Program : 10 M\$ investis sur deux projets en 2013

Tableau 11 – Le contexte des micro-algues en Australie

3.1.1.3.5 Union Européenne (hors France)

Si la production Européenne de micro-algues reste faible en comparaison de certains pays asiatiques, l'Union Européenne n'est pas en reste en matière de R&D.

PRINCIPAUX ACTEURS	PRINCIPAUX PROJETS & INITIATIVES
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consortiums & Associations: European Algae Biomass Association (EABA), European Bioenergy Industrial Initiative (EIBI) ▪ Allemagne: développeurs de technologies de PBR (Subitech GmbH, IGV GmbH, Novagreen GmbH), Université de Cologne, Université technique de Berlin, Institut Technologique de Karlsruhe, etc. ▪ Espagne : AlgaEnergy, Aqualia, BioFuel Systems, Biotechnologica de microalgas, AlgaeLink, Universidad de Almería, University of Alicante, University of Valencia, University of Seville, Iberdrola, etc. ▪ Pays_Bas : Université de Wageningen, Ecoduna, Netherlands Institute of Ecology (NIOO), Univ. de Gent... ▪ Royaume-Uni : Cranfield University, Algal Innovation Centre, Swansea University, Plymouth Marine Laboratory; University of Southampton; Queen Mary; University of London; University of Manchester; University of Sheffield; Newcastle University; Scottish Association of Marine Sciences, Coventry University; Swansea University, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Roquette Klötze (Allemagne): production commerciale de <i>Chlorella</i> depuis 2008 en PBR tubulaire horizontal (500 km de tubes ; 30 fois 20 000 litres) pour applications à HVA ▪ BIOFAT (Italie) : unité de démonstration prévue pour production de biodiesel et bioéthanol en couplage raceway / PBR sur 10 ha ; objectif 900 t/an de biomasse. ▪ All Gas (Espagne) unité de démonstration prévue pour production de biodiesel et biogaz en raceway sur 10 ha ▪ Ecoduna (Autriche) : unité de démonstration de 50 000 litres de PBR pour production d'oméga-3 avec utilisation de CO₂ capté d'origine industrielle fourni par Vattenfall
REGLEMENTATION & INCITATIONS	AIDE A LA R&D
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Autorisation de plusieurs micro-algues en alimentation humaine ▪ Double comptage des biocarburants avancés dans les calculs de quotas d'incorporation de biocarburants ▪ Vote en première lecture au Parlement Européen du 11 Septembre 2013 sur une proposition de modification des Directives Energies Renouvelables et Qualité Carburant, comportant notamment des dispositions favorisant l'émergence des biocarburants de 2^{ème} et 3^{ème} génération (suite à des polémiques sur la 1^{ère}) : ▪ Depuis, texte amendé par Conseil Européen et en attente de vote en deuxième lecture sur les bases suivantes : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Limitation des biocarburants 1G à 7% dans l'objectif de 10% d'incorporation en 2020 ▪ Objectif indicatif de 0,5% pour les biocarburants avancés (2G & 3G), avec possibilité d'adaptation par Etat membre ▪ Niveau minimal de réduction des émissions de GES par rapport aux carburants fossiles porté à 60% pour les nouvelles installations ▪ Etablissement d'une liste de matières premières bases de biocarburants éligibles au multiple comptage ▪ Estimation nationale par les Etats membres des émissions GES estimatives liées aux changements d'affectation des sols indirects (CASI) pour chaque culture dans les rapports à la Commission 	<p>Appels à projets spécifiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ FP7 – Appel à projet 2010 : financement de 3 projets pour un montant total de 20,5 M€ de minimum 10 ha chacun (Biofat, All Gas & InteSusAI). <p>Programmes génériques ou non limités aux algues :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ FP7 – Appel à projet KBBE 2013 : 341 M€ ▪ European Neighbourhood and Partnership Instrument ▪ EU LIFE+ ▪ EU FEDER <p>Financements nationaux et locaux – Exemples d'entité ayant subventionné des projets micro-algues :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Espagne : Ministère des Sciences et de l'Innovation, Plan Espagnol de stimulation de l'économie, CDTI et Ministère de l'économie et de la compétitivité, Institut Madrilen de Développement (IMADE), Ville de Madrid ▪ Pays-Bas : Province of Zeeland, Programme gouvernemental OP Zuid, Ministère des Affaires économiques, de l'agriculture et de l'innovation, Province de Gelderland ▪ Royaume-Uni : Biotechnology and Biological Sciences Research Council, Carbon Trust's Advanced Bioenergy Directed Research Accelerator (incluant le Algae Biofuels Challenge de plusieurs millions de livres sterling) ▪ Allemagne : programme « bioénergie et biocarburants » du German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), Federal Ministry of Agriculture, Food, and Consumer Protection

Tableau 12 – Le contexte des micro-algues en Europe

3.1.2 Les micro-algues en France

3.1.2.1 Production et consommation française de micro-algues et produits micro-algaux

La France dénombre aujourd'hui une petite centaine de sites de production de micro-algues, essentiellement dédiés à la production de spiruline (80 producteurs en 2012, contre 3 producteurs en 2004 !) pour l'alimentation/nutrition.

La plupart d'entre eux sont situés dans le sud-est de la France (Languedoc-Roussillon, PACA, Midi-Pyrénées), comme indiqué sur la Figure 33.

Le volume de production français est en évolution constante et difficile à estimer. En 2008, la consommation de Spiruline en France était estimée à 40 à 50 t_{MS}/an, la production française n'en couvrant que 10 à 20 %, soit 5 à 10 t_{MS}/an, le reste étant couvert par l'import en provenance d'Asie essentiellement [26]. En 2012, cette production française était estimée par les producteurs à 20 t_{MS}/an, toujours en croissance (croissance de +10 %/an avancée par les producteurs [26]).

Cette spiruline est essentiellement séchée et vendue telle quelle sous la forme de paillettes spiralées.



Figure 33 – Répartition géographique des producteurs de spiruline en France [27]

Quelques acteurs de l'industrie cosmétique et du luxe consomment également des micro-algues en petites quantités pour leurs besoins propres. C'est le cas notamment de Daniel Jouvance (production d'*Emiliana* utilisée dans la formulation de crèmes pour la peau), de Dior (groupe LVMH) ou encore Sephora (en partenariat avec Solazyme et sa gamme Algenist™).

3.1.2.2 Principaux acteurs français positionnés sur les micro-algues

Le Tableau 13 ci-dessous récapitule les principaux acteurs français, tant centres de recherche publics que structures privées, impliqués sur la chaîne micro-algues, et ce par segment d'activité ou spécialité.

Pour plus de détails sur les différents acteurs et leurs activités, voir les documents « Algues, filières du futur ; Livre Turquoise » (DGCIS, Trimatec, Adebitech, 2010) et « La filière des macro-algues en France » (NetAlgae, 2012).

La France est l'un des premiers acteurs de la recherche dans le champ des micro-algues avec des organismes tels que le CNRS (premier organisme de recherche avec 200 publications ou brevets), l'IFREMER et le CEA, des banques de souches algales de rang mondial notamment à la Station biologique de Roscoff, et des plateformes technologiques comme DéfiAlgues et Hélobiotech. Elle se situe au 1^{er} rang pour les publications et au 4^{ème} rang pour les brevets (données 2010). Par contre, elle ne représente que 5% des investissements sur les projets dans ce domaine. Ce chiffre met en évidence le besoin d'améliorer le transfert des connaissances scientifiques vers l'industrie [28].

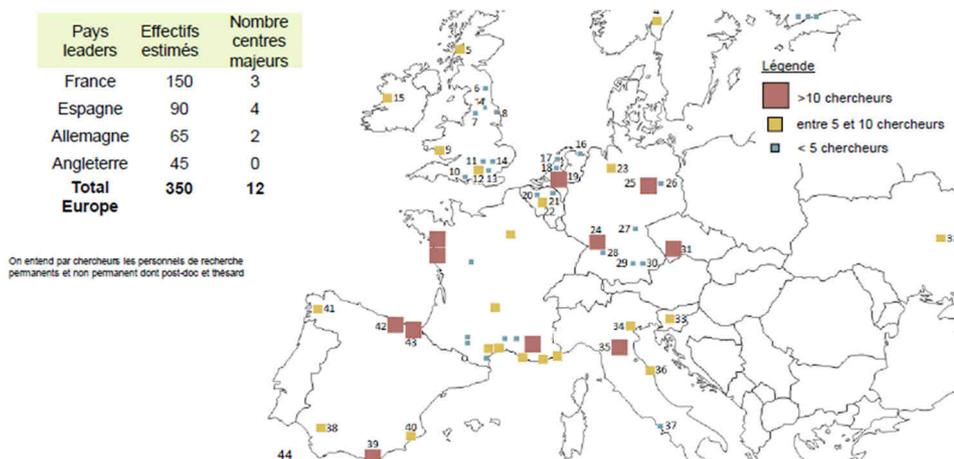


Figure 34 – Répartition des principaux centres de recherches positionnés sur les micro-algues en Europe [16]

SEGMENT/ ACTIVITE	CENTRES DE RECHERCHE	INDUSTRIELS & ORGANISMES PRIVES
Transverse		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pôles de compétitivité Trimatec, Mer Bretagne, Mer Méditerranée, Industries et Agro-Ressources (IAR) ▪ Fédération des Spiruliniers de France ▪ Atlanpôle Blue Cluster de Nantes
Biologie, physiologie, écologie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Laboratoire d'Océanographie de Villefranche (CNRS/UPMC) ▪ PBA (IFREMER) ▪ Station biologique de Roscoff (CNRS/UPMC) ▪ INRA (Laboratoire de Biotechnologie de l'environnement) ▪ FEME (Université de Caen/CNRS) ▪ Université de Caen & IFREMER / Physiologie et Ecophysiologie des Mollusques marins ▪ Centre de recherche de la Tour de Valat ▪ UNAM : laboratoire MMS 	
Biochimie, biologie moléculaire	<ul style="list-style-type: none"> ▪ LB3M (CEA) ▪ OOB (UPMC/CNRS) ▪ ENS 	
Modélisation, optimisation et contrôle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BIOCORE (INRIA) ▪ INRA (LBE) ▪ GEPEA (Université de Nantes) ▪ LGCB (Univ de Clermont-Ferrand) 	
Développement de procédés, production et valorisation d'algues autotrophes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ GEPEA (Université de Nantes) ▪ PBA (IFREMER Nantes) ▪ CEA 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Algosource (Algosource technologies, Alpha Biotech) ▪ Greensea ▪ Microphyt ▪ Innovalg ▪ Soliance ▪ ESETA
Développement de procédés de production et valorisation d'algues hétérotrophes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ INRA (LBE) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fermentalg ▪ Roquette Frères
Post-traitement et valorisation de biomolécules algales à valeur ajoutée	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Université de Bretagne-Sud / Laboratoire de Biotechnologie et Chimie Marines (LBCM) ▪ M2P2 (Université d'Aix-Marseille) ▪ Green (Université Avignon) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sofiprotéol (dont Diester industrie) ▪ Roquette Frères
Valorisation carburants / énergie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CIRAD ▪ IFPEN ▪ INRA / Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Airbus ▪ EADS ▪ PSA Peugeot Citroën ▪ La Compagnie du Vent ▪ Naskéo
Traitement des déchets	<ul style="list-style-type: none"> ▪ INRA / Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Saur ▪ Naskéo

Tableau 13 – Principaux acteurs français impliqués sur la filière micro-algues, par activité/spécialité

3.1.2.3 Principaux projets français de recherche et développement sur les micro-algues

Les principaux projets de R&D actuels, récemment terminés et prévus relatifs à la production de micro-algues sont fournis en Annexe 2 - Principaux projets français de R&D. Les installations commerciales comme les installations de production de Spiruline ne sont pas référencées.

En France, la dynamique des micro-algues s'est notamment traduite par la mise en place de l'Institut d'Excellence pour les Energies Décarbonées « Green Stars », soutenu par cent experts internationaux du domaine, et finalement labellisé en 2011 par le Commissariat Général à l'Investissement, après qu'un jury d'experts internationaux l'ait sélectionné. Cet institut permettait d'installer les recherches sur les micro-algues dans la durée, et surtout d'associer le monde académique et le tissu industriel autour de projets innovants. Le réseau d'experts pluridisciplinaires (la majorité des grands établissements publics de recherche étaient partenaires) et de plateformes innovantes, garantissait la cohérence nécessaire pour synchroniser et rationaliser les développements à l'échelle nationale. L'initiative a fait école, et des consortiums similaires sont en cours de montage dans d'autres pays (Allemagne, Royaume-Uni, etc.). L'annonce de l'arrêt du financement de cet IEED suite au retrait de certains industriels de l'énergie laisse à ce jour planer une incertitude sur le devenir de la filière micro-algues française, avec un risque de morcellement des efforts de recherche.

3.1.3 Estimation des tailles de marchés potentiels pour les micro-algues françaises à 2030

3.1.3.1 Segmentation des produits micro-algaux

Si, comme expliqué dans les paragraphes précédents, le potentiel génétique et physiologique des algues est extrêmement vaste et que de très nombreuses biomolécules aux applications multiples sont susceptibles d'être isolées et produites par des algues dans les décennies à venir, la présente étude ne peut appuyer une analyse quantitative que sur des produits algaux connus et déjà identifiés comme significatifs en termes de volumes de marché. Les 11 catégories suivantes de produits micro-algaux ont été considérées pour cette étude:

- Biocarburants :
 - Biodiesel
 - Bioéthanol
 - Biogaz
- Alimentation et nutrition humaine :
 - Algue entière comme complément alimentaire (type spiruline)
 - ω 3 pour la nutrition infantile et les compléments alimentaires
 - Pigments comme colorants alimentaires
- Alimentation et nutrition animale :
 - Huiles pour alimentation des poissons
 - Farines pour alimentation des poissons
 - Algue entière comme nourriture ou additif nutritionnel pour bétail
- Pharmaceutique et cosmétique : ω 3
- Chimie : plastiques biosourcés

3.1.3.2 Méthodologie employée

La plupart de ces produits algaux n'étant pas encore commercialisés, ou à une échelle anecdotique, cet exercice de prospective demeure particulièrement délicat. L'objectif de cette analyse est donc de mieux appréhender le potentiel de ces marchés à travers l'estimation d'ordres de grandeurs cohérents, en analysant les résultats avec toutes les précautions nécessaires. Cette analyse de marché comporte quatre étapes :

- **L'analyse du marché actuel** correspondant au produit algal considéré
- **La projection de la taille de ce marché à 2030**
- **L'estimation de la part de marché que les algues pourraient prendre**
- **L'estimation de la part de ce marché algal susceptible d'être produite par la France**

L'analyse du marché actuel correspondant au produit algal considéré inclut des informations sur la taille, la segmentation, le dynamisme du marché, etc. Le périmètre de référence retenu est ici le **marché Européen**, bien que la taille et la dynamique du marché mondial soient également renseignées pour information. Ce périmètre permet de se raccrocher à des données de marché relativement connues et de faire une première analyse sur ces ordres de grandeur, même si dans un certain nombre de cas, des flux d'import/export hors Europe viendront moduler les débouchés disponibles. En fonction des données disponibles, cette évaluation est faite en valeur ou en volume, avec des données d'évolution sur les années précédentes. Enfin, cette analyse du marché actuel inclut une évaluation du coût du produit actuellement disponible sur le marché.

La projection de la taille de ce marché à 2030 se fait sur la base d'un taux de croissance sur la période 2014-2030, généralement estimé à partir des taux de croissance annuels actuels connus.

L'estimation de la part de marché que les algues pourraient prendre a là encore pour objectif d'aller un cran plus loin que les études précédentes. Vu la grande incertitude pesant sur la compétitivité économique des solutions algales à 2030, la plupart des publications raisonnent sur la base d'une part de marché arbitraire, dans une approche « si ... alors ... » (par exemple « si les algues fournissaient 10% du marché, alors la taille du marché serait de... »). Dans cette étude, la part de marché pour les algues est estimée au cas par cas à travers l'analyse de différents facteurs tels que :

- La pertinence technique (voire économique) du produit algal, avec mention des études scientifiques validant ou non la faisabilité technique ou mérites d'une substitution d'un produit conventionnel par un produit algal,
- Les volumes actuels de production algale pour le marché analysé (si disponibles),
- Une estimation du caractère différenciant ou non pour le consommateur du caractère « bio-sourcé » du produit (« prime verte » éventuellement donnée aux produits algaux), etc.

L'estimation de la part de ce futur marché algal Européen susceptible d'être produite par la France. L'application de ce dernier coefficient, particulièrement incertain, s'appuie sur la part de production française actuelle lorsque cela est possible et, le plus souvent, sur des parts de marchés françaises connues pour des secteurs d'activités connexes et matures.

3.1.3.3 Résultats

Le passage d'un volume de marché conventionnel Européen à 2030 à un potentiel marché pour des algues françaises est un exercice pour le moins difficile, ne serait-ce que parce que les parts de marchés réellement prises par les produits issus d'algues dépendront complètement de leur compétitivité avec les autres produits en compétition sur chaque marché et sous-segment de marché (que ce soit les produits conventionnels ou d'autres produits bio-sourcés). L'exercice n'a pas conséquent pas d'autre prétention que celle de donner des ordres de grandeurs sur la base d'hypothèses à la fois ouvertes et totalement transparentes.

La synthèse de cette analyse est présentée en Figure 35, en utilisant une échelle logarithmique afin de palier à plusieurs ordres grandeur d'écart, tant entre produits qu'entre les différents périmètres marché estimés pour un produit donné. L'ensemble de l'analyse est fournie en Annexe 3 – Analyse des marchés des produits algaux non énergétiques.

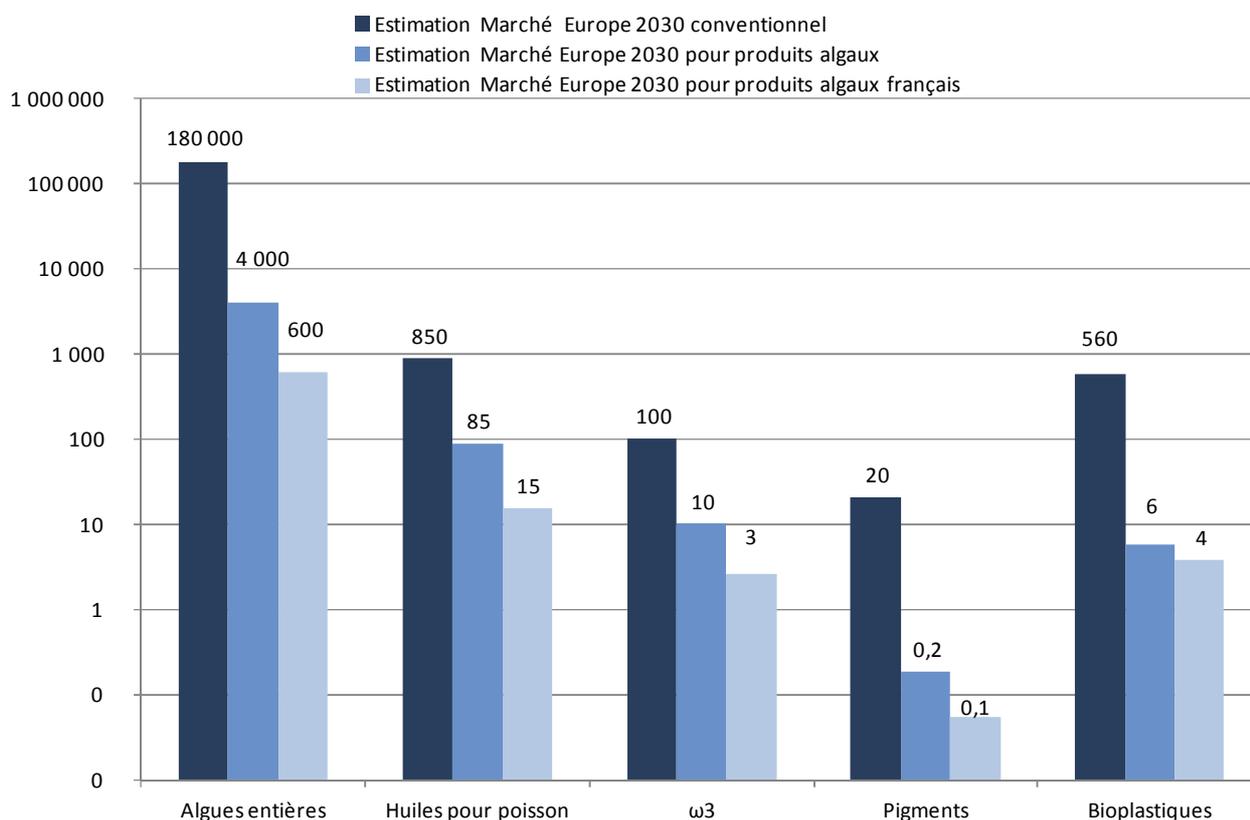


Figure 35 – Estimation en kt/an des tailles de marché conventionnels Europe, produits micro-algaux Europe et produits micro-algaux produits par la France à 2030 (échelle logarithmique)

Ces estimations donnent une idée des volumes maximaux envisageables pour les produits algaux non énergétiques à horizon 2030 sur la base des informations disponibles aujourd'hui. A nouveau, les parts de marché réelles prises par les algues dépendront de la compétitivité des produits concernés et les volumes associés pourront être modulés par d'éventuelles exportations hors zone Europe. Les ordres de grandeur affichés permettent d'ores et déjà de mettre le doigt sur le caractère fini de ces opportunités et de leur hétérogénéité.

3.2 La filière macro-algues

3.2.1 Les macro-algues dans le monde

3.2.1.1 Production et consommation mondiale

Au niveau mondial, la production de macro-algues a atteint 16 Mt d'algues fraîches en 2012 pour une valeur de 5 milliards d'euros [11], soit un marché bien plus mature et conséquent en volume que celui des micro-algues.

Le marché est en croissance (croissance de 5 à 15 %/an depuis 10 ans [29] ; 14,3 Mt en 2010 [5] soit une hausse de 12% en 2 ans), les volumes de production ayant sensiblement augmenté sur la dernière décennie notamment à travers l'entrée de la Chine sur le marché et le développement de très grandes installations d'aquaculture.

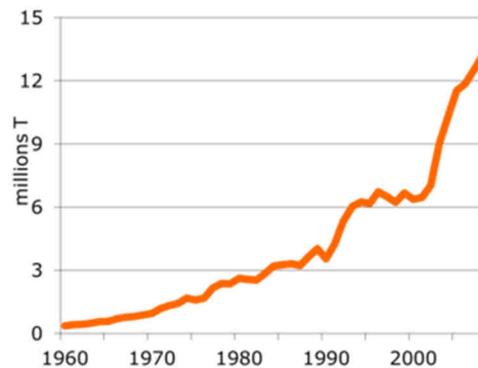


Figure 36 – Evolution de la production mondiale de macro-algues depuis les années 60 [4]

3.2.1.1.1 Types d'algues

96% du volume mondial de production et 96% de la valeur des produits est concentré sur 9 espèces de macro-algues (données FAO 2010 reprises par [30] en 2012) dont les principales sont :

- Laminaire du Japon, Konbu (*Laminaria japonica*), algue la plus cultivée au monde (5,2 Mt en 2010)
- Eucheuma spp. (3,5 Mt)
- Kappaphycus alvarezii (1,9 Mt)
- Wakamé (*Undaria pinnatifida* – 1,5 Mt)
- Graciliaire commune (1,1 Mt)
- Nori (*Porphyra sp.* - 1,1 Mt)

3.2.1.1.2 Principaux marchés

La répartition en valeur des débouchés mondiaux est, d'après [11] :

- 89% de cette production dédiés aux marchés de l'alimentation, essentiellement sous forme d'algues entières pré-séchées (pré-fanées sur site à 70% de matière sèche),
- 7% aux marchés de la chimie fine et
- 4% à la production d'hydrocolloïdes.

Comme expliqué plus loin, cette répartition est inverse à celle de la France.

3.2.1.1.3 Mode de production

Là encore, la situation est inversée par rapport à la France. En effet, 93% de la production mondiale est aujourd'hui issue de l'aquaculture contre 7% seulement de récolte d'algues sauvages.

3.2.1.1.4 Localisation de la production mondiale

En 2010 [30] :

- 70-75% de la production mondiale de macro-algues provenaient de la Chine, avec 10,1 Mt (5,2 Mds \$)
- 20-25% supplémentaires provenaient d'autres pays asiatiques, respectivement : Indonésie et Philippines (colloïdes principalement, voir Figure 38), République de Corée et Japon.
- 5% restant en provenance d'Europe et d'Amérique (du Sud principalement), qui cherchent à développer une production à grande échelle.

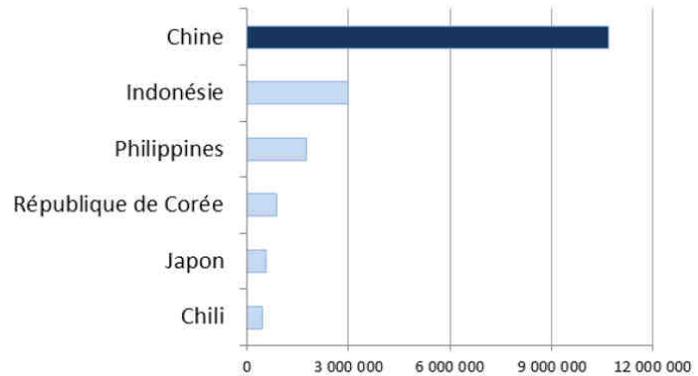


Figure 37 – Principaux pays producteurs de macro-algues (production en Mt/an en 2010) [29]

D'autres régions présentent des conditions favorables à la production de macro-algues (Amérique du Nord, Afrique du Sud, Océanie), bien que cette dernière y soit pour l'instant négligeable (cf. Figure 38 ci-dessous).

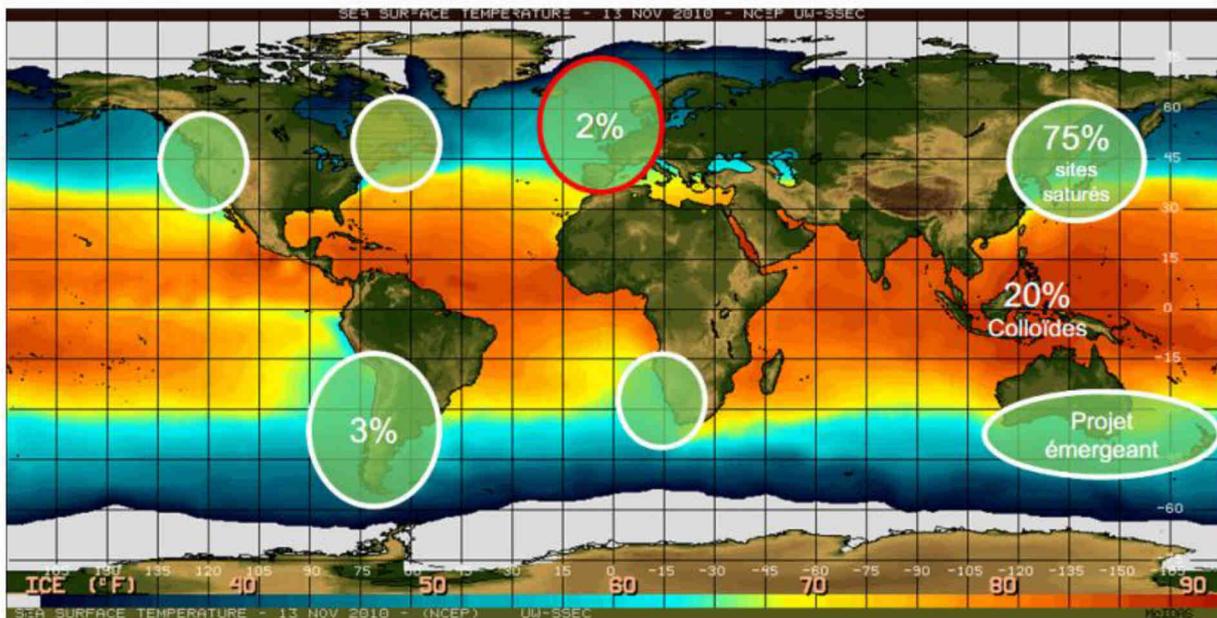


Figure 38 – Zones propices à la culture de macro-algues (cercles) et part de la production en 2012 (%) [4]

Les flux d'importation représentent plus de 2 Mt pour une valeur de près de 770 M\$ [30].

- Si la Chine est le principal producteur mondial, il est également premier importateur (37% des importations mondiales), ses volumes de production ne suffisant pas à répondre à la demande intérieure, suivis du Japon (16%), des Etats-Unis et de la France.
- En termes d'exportations, le leader mondial est l'Indonésie (32%), suivi du Chili et de la Chine (11%).

3.2.1.2 Caractérisation de ces marchés

Le Tableau 14 donne des informations plus précises sur les principaux produits micro-algaux : ordres de grandeurs de prix de vente et de taille de marché, maturité du marché et potentiel intérêt pour de nouveaux entrants.

Produits	Taille du marché mondial	Prix de vente (€/kg MS)	Maturité du marché	Potentiel d'évolution et intérêt
Alginates	35-40 kt/an	~10	Mature, fortement concurrentiel, fortes barrières à l'entrée	Marché relativement stable, croissance à la marge (1-2%/an) mais surcapacité de production.
Polyphénols		~200 (très dépendant de la qualité)	Mature	
Fucoxanthine	Marché de niche	~3000	Non mature Très verrouillé (nombreux brevets)	Marché en croissance
Substituts de sels (minéraux)	Marché de niche	< 10	Non mature	Marché en croissance
Algues légumes	16 Mt _{fraîches} /an Très gros marché asiatique, Marché français de niche	Vrac : ~50 Sachet 50g : ~80-100	Mature en Asie	Marché asiatique en croissance Marché français à construire

Tableau 14 – Caractérisation des principaux marchés des produits macro-algaux [11], [30], [13]

3.2.1.3 Analyse du contexte dans quelques pays clés

Comme pour les micro-algues, cette section donne une vision synthétique de l'environnement des macro-algues dans quelques-uns des principaux pays producteurs. Comme présenté au paragraphe 3.2.1.1, ces pays sont pour la plupart asiatiques. La filière macro-algues étant plus mature que la filière micro-algues, on s'attache ici principalement à décrire les principaux leviers ou conditions ayant permis leur développement, plutôt que les projets de R&D ou mécanismes incitatifs. Ces éléments sont principalement issus du rapport du projet BREIZH'ALG publié en 2013 [29].

3.2.1.3.1 Chine

La Chine est de loin le premier producteur (59% en 2010 [29]) et consommateur mondial (61% en 2010[29]) de macro-algues. 99% du marché chinois sont représentés par 4 espèces : la Laminaire du Japon (57% de la production), la Gracilaire commune, le Wakamé et Nori (~14% chacune). Ces algues sont consommées en alimentation humaine, comme légume ou condiment (intégration dans des soupes, etc.). Les principaux facteurs sous-tendant cette position dominante sont les suivants :

- Une consommation culturelle d'algues, profondément ancrée dans les habitudes culinaires. Les macro-algues sont utilisées comme des légumes, en accompagnement, et sont appréciées pour leurs qualités nutritives. La consommation individuelle moyenne est de 8 kg/personne/an.
- Un parc de consommateurs énormes : une population d'1,381 milliard d'habitants, en croissance.
- Des surfaces de production importantes.
- Une production historique avec des techniques de production maîtrisées.
- Une main d'œuvre bon marché.

Portée par la croissance de la population, la consommation continue d'augmenter. Les sites de production sont quant à eux saturés, phénomène compensé par une augmentation des importations (1^{er} importateur mondial). La pollution croissante des eaux territoriales entraîne également une hausse des coûts de production, si ce n'est des problèmes sanitaires.

3.2.1.3.2 Japon

Le Japon était en 2010 le 4^e consommateur mondial (5 %), 5^e producteur (3 %) et 2^e importateur (16 %) mondial de macro-algues [29]. 90 % du marché japonais sont représentés par 2 espèces : Nori (66 % de la production), notamment utilisée pour la confection de Makis, et la Laminaire du Japon. La encore, le développement de la filière trouve ses racines dans les habitudes alimentaires des japonais, avec une consommation individuelle moyenne de 7 kg/habitant/an et une faible sensibilité du consommateur au prix du produit [29]. Contrairement à la Chine, le mar-

ché est ici en décroissance, en corrélation directe avec une décroissance de la population depuis 2005. Les coûts de production japonais étant aujourd'hui supérieurs au prix des algues importées (de Chine notamment), la production japonaise de macro-algues devrait suivre la consommation et décroître à moyen terme.

3.2.1.3.3 Indonésie

L'Indonésie était en 2009 le 2^e producteur mondial (16 %), 2^e consommateur (13 %) et 1^{er} exportateur mondial de macro-algues (32 % des flux). 87% du marché est centré sur la production d'*Euchemma spp* [29]. Ces algues sont cultivées et non récoltées à l'état sauvage. Contrairement à la Chine et au Japon, et à l'instar de la France, la production indonésienne de macro-algues sert le marché des colloïdes, et notamment de carraghénanes utilisés comme stabilisants, émulsifiants et gélifiants dans l'agro-alimentaire, tandis que la consommation individuelle en alimentation reste faible.

Comme ses voisins du nord de l'Asie, l'Indonésie bénéficie d'importants espaces littoraux, cette fois peu exploités, d'un climat propice et d'une main d'œuvre bon marché. La culture algale s'y est imposée comme une nouvelle source de revenus pour les familles qui n'arrivaient plus à vivre de la pêche [29].

3.2.1.3.4 Chili

Le Chili est le premier producteur de macro-algues non asiatique, à la 6^e place en 2010 avec 2 % de la production mondiale, derrière la Chine, l'Indonésie, les Philippines, la Corée du Sud et le Japon [29]. Là encore, la production est concentrée sur deux catégories d'algues : le genre *Lessonia* (~60 %) et les gracilaires (~10 %). Comme l'Indonésie, le Chili a une production orientée sur la production de colloïdes à l'export (2^e exportateur mondial) et une consommation domestique d'algues légumes faible [29]. Le Chili s'est intéressé tôt aux macro-algues en raison d'une utilisation traditionnelle (« cochayuyo ») aujourd'hui en déclin mais compensée ces dernières années par des investissements étrangers dans l'aquaculture et le développement d'une expertise de recherche au sein d'instituts locaux.

3.2.2 Les macro-algues en France

3.2.2.1 Production et consommation actuelles de macro-algues en France

En 2012, environ 95 000 tonnes d'algues fraîches (un peu plus de 14 000 t_{MS}) ont été produites et récoltées sur le territoire français, soit environ 0,6% de la production mondiale (16 Mt/an de matière fraîche soit environ 2,4 Mt_{MS}/an). La France se situe malgré cela autour du 10^e rang des pays producteurs au monde, 2^e en Europe derrière la Norvège.

3.2.2.1.1 Types d'algues

La majorité des algues récoltées sont des algues brunes, 95 % de la production étant concentrée sur 2 groupes d'espèces : les Laminaires (75 % de la production : 60 % de *Laminaria digitata* avec 57 000 tonnes en 2012 et 15% de *Laminaria hyperborea* avec 14 000 tonnes en 2012) et Fucales (6 % de la production, essentiellement *Fucus spp.* et *Ascophyllum nodosum*) [29].

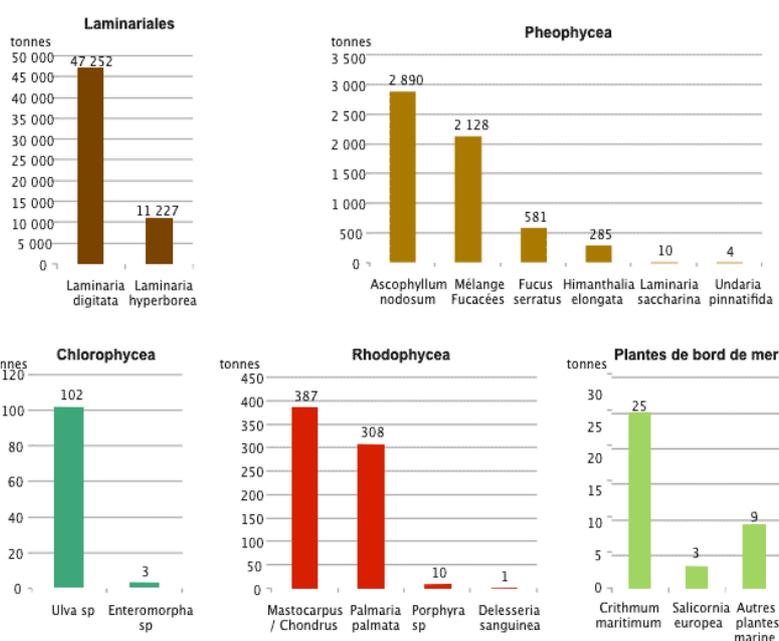


Figure 39 - Tonnages d'algues et de plantes de bord de mer bretonnes transformées par les entreprises de la Chambre Syndicale des Algues et Végétaux Marins publiés en 2008

La Figure 39 ci-contre donne les quantités d'algues et de plantes de bord de mer bretonnes (localisation de 90 % de la production nationale) transformées par les entreprises de la Chambre Syndicale des Algues et Végétaux Marins publiés en 2008 (en tonnes).

La Chambre Syndicale des Algues et Végétaux Marins regroupe une majorité de producteurs, récoltants et exploitants la biomasse algale en Bretagne et permet de suivre l'évolution des biomasses récoltées et donc transformées au cours des années et selon les espèces.

3.2.2.1.2 Principaux marchés

Ces algues servent très majoritairement le marché des hydrocolloïdes (90-95 % [31]), et notamment des alginates. Les phycocolloïdes (alginates et carraghénanes) extraites des algues récoltées en Bretagne représentent environ 20% du marché mondial. Deux entreprises multinationales Dupont-Danisco et Cargill, installées en Finistère Nord, assurent cette transformation.

Le second marché est celui de l'algue alimentaire (algues fraîches, séchées, marinades et autres produits aux algues) avec 12 espèces autorisées dans l'alimentation humaine.

Certaines espèces renferment aussi des composés actifs utilisés dans l'industrie pharmaceutique, cosmétiques et en thalassothérapie. Enfin, d'autres espèces d'algues brunes renferment des composés actifs exploités dans la filière agricole en tant qu'éliciteur (stimulation des défenses naturelles des plantes pour lutter contre les ravageurs).

3.2.2.1.3 Mode de production

La récolte d'algues sauvages représente l'écrasante majorité de cette production, seules 50 tonnes d'algues provenant de l'algoculture [32]. Environ 90 % de cette récolte se fait en mer à l'aide de navires goémoniers, les 10 % restants étant ramassés sur les plages par des récoltants à pied (environ 6000 t/an).

Les 50 tonnes cultivées concernent deux espèces principalement : *Undaria pinnatifida* (Wakamé) et *Saccharina latissima* (Kombu) destinées à des marchés à haute valeur ajoutée (alimentaire, cosmétique...).

3.2.2.1.4 Localisation de la production française

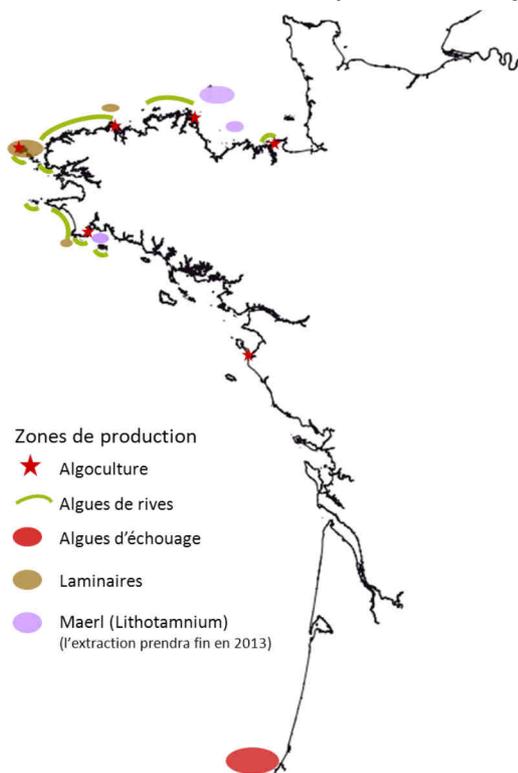


Figure 40 – Zones de production (culture et récolte) de macro-algues en France [32]

La récolte de macro-algues s'opère quasi-exclusivement le long des côtes Bretonnes (90 %), notamment dans le Finistère et les Côtes d'Armor, où les champs d'algues sont les plus importants d'Europe (cf. Figure 40). Cette répartition est identique pour les sites de cultures, avec 9 sites situés en Bretagne sur les 10 sites identifiés en France, le 10^e site se trouvant en Charente Maritime. La surface totale dédiée à la culture d'algues en mer et à terre représente aujourd'hui 85 hectares (cf. Figure 41) et augmentera d'ici 2016 à 185 hectares (avec le projet ALGOLESKO [33] et le passage de 50 à 150 ha de culture de *Saccharina latimissa* pour un objectif final de 5 à 7000 tonnes d'algues par an – poids humide).

La consommation française de macro-algues est environ 2,5 fois supérieure à sa production avec environ 180 000 t consommées en 2011, ce qui place la France au 9^e rang des pays consommateurs avec environ 1 % de la consommation mondiale [29].

Cet écart entre production et consommation est compensé par des importations, principalement en provenance du Chili (27 %), des Philippines (22 %), de la Tanzanie (17 %). En 2011, ces dernières se chiffraient à environ 18 000 tonnes, soit environ 125 000 tonnes équivalent frais, pour une valeur de 22,4 M€ [29].

Une partie de la production française est également exportée, principalement à destination de ses voisins Européens (79 %) : un peu moins de 3000 tonnes, soit environ 20 000 tonnes équivalent frais, exportées en 2011 pour une valeur de 9 M€ [29].

Ces chiffres ne prennent pas en compte la récolte d'algues vertes issues de marées vertes au printemps. Cette dernière biomasse, si échouée, est considérée comme un déchet. En 2012, 46 000 m³ d'algues vertes-déchets ont été collectés sur les plages par les collectivités locales (pour amendement de terres agricoles), mais les possibilités de valorisation de ces algues échouées restent limitées par leur rapide putréfaction (source d'émissions de sulfure d'hydrogène) et le caractère saisonnier de la ressource. Toutefois, une nouvelle voie de valorisation de cette biomasse verte est en cours. La Société OLMIX récolte la biomasse dans la colonne d'eau (avant échouage) et cherche à valoriser la matière fraîche dans la filière de l'alimentation et la santé animale. La société OLMIX estime à 80 000 tonnes le gisement d'algues vertes pouvant être récoltées avant échouage pour être valorisées.

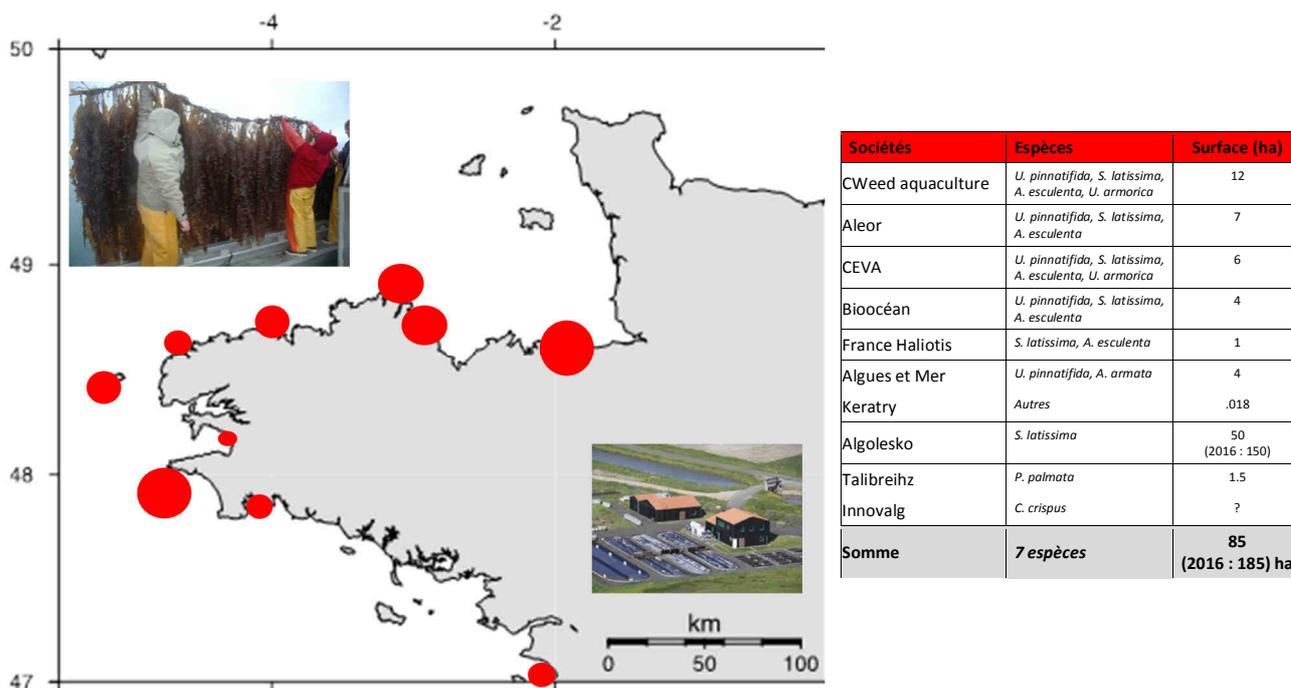


Figure 41 – Sites de culture de macro-algues en France et tonnages associés (IFREMER)

3.2.2.2 Principaux acteurs français positionnés sur les macro-algues

On compte 36 bateaux licenciés pour effectuer la récolte d'algues en mer. Les goémoniers embarqués sur les navires ont un statut de pêcheur et sont affiliés à l'Établissement National des Invalides de la Marine (ENIM) et bénéficient de tous types de droits sociaux (assurance maladie, retraite, allocations familiales...). Ces récoltants ont souvent une double activité, celle de pêche (poisson ou coquille) et celle de goémonier, afin d'optimiser leurs activités tout au long de l'année.

On compte plus de 300 récoltants d'algues de rive. Ces goémoniers se retrouvent sous deux statuts possibles : les récoltants professionnels au nombre d'une vingtaine (emploi annuels, affiliés à l'ENIM ou la MSA) ou les récoltants occasionnels (employés par les entreprises de transformation uniquement pendant les périodes de récolte autorisés) qui doivent être liés à une entreprise souvent sous forme de Titre Emploi Simplifié Agricole (TESA). Le chiffre d'affaires de la récolte de rive était estimé à environ 300 000 € en 2008 [34].

Au niveau de la transformation des algues, environ 70 établissements bretons fabriquent ou commercialisent des produits à partir d'algues et de végétaux marins, ce qui représentait 1 635 emplois en 2007 (hors agro-alimentaire) pour un chiffre d'affaire total évalué à 424 M€ [5]. Ces entreprises incluent les deux producteurs historiques de colloïdes ainsi que de nombreuses PME travaillant sur des applications alimentaires, cosmétiques, pharmaceutiques, etc. [31].

Environ 85% des entreprises produisant et transformant des macro-algues en France sont concentrées en Bretagne, dont 95% des industriels producteurs d'hydrocolloïdes [31].

Le Tableau 15 récapitule les principaux acteurs français, tant centres de recherches publics que structures privées, impliquées sur la chaîne macro-algues, et ce par segment d'activité ou spécialité.

SEGMENT/ ACTIVITE	CENTRES DE RECHERCHE	INDUSTRIELS & ORGANISMES PRIVES
Transverse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ IFREMER ▪ Centre d'Etude et de Valorisation des Algues (CEVA) ▪ AGROCAMPUS OUEST ▪ Synergie Mer Et Littoral (SMEL) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Chambre Syndicale des Algues et des Végétaux Marins (organisation professionnelle) ▪ Syndicat des récoltants d'algues (à terre) ▪ Syndicat Carragéen ▪ Légumiers de la Mer (association d'algoculteurs à vocation coopérative) ▪ Bretagne Développement Innovation (agence de développement de la région Bretagne)
Biologie marine, biochimie, physiologie, écologie des macro-algues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Station biologique de Roscoff ▪ Station biologique de Concarneau ▪ Université de Bretagne Occidentale ▪ Université de Caen & IFREMER / Unité Mixte de Recherche Physiologie et Eco-physiologie des Mollusques marins 	
Cartographie et Suivi des populations Modélisation des éco-systèmes marins	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM) de l'Université de Brest / Laboratoire des sciences de l'environnement marin (LAMAR) ▪ IFREMER ▪ Parc naturel marin d'Iroise 	
Récolte de macro-algues		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 35 navires goémoniers ▪ 20 récoltants professionnels et 300 récoltants occasionnels récoltant les algues de rives
Culture de macro-algues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Centre d'Etude et de Valorisation des Algues (CEVA) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Une douzaine d'entreprises en Bretagne (cf. Figure 42) dont : CWeed aquaculture, ALEOR, Algolesko, BioOcéan, TaliBreihz, etc.
Transformation des algues et valorisation des biomolécules algales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Station Biologique de Roscoff - CNRS ▪ Université de Bretagne-Sud / Laboratoire de Biotechnologie et Chimie Marines (LBCM) ▪ Centre de Recherche Mèze Hérault (CEREMHER) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 60 à 70 entreprises de transformation en Bretagne (cf. Figure 43 pour les principales) ▪ Dans le Sud : Poletto (150 t_{MS}/an de nourriture pour volaille), Novapharm (2,5 t_{MS}/an de gélules amincissantes)
Aspects économiques, juridiques et politiques des espaces marins et littoraux	<ul style="list-style-type: none"> ▪ IFREMER ▪ Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM) de l'Université de Brest / Unité Mixte Aménagement des Usages des Ressources et des Espaces marins et littoraux (AMURE) 	

Tableau 15 – Principaux acteurs français impliqués sur la filière macro-algues, par activité/spécialité

Les Figure 42 et Figure 43 présentent plus en détail les différents acteurs privés impliqués dans la production et la transformation de macro-algues en Bretagne. Pour plus de détails sur les différents acteurs et leurs activités, voir par exemple les documents « Algues, filières du futur ; Livre Turquoise » (DGCIS, Trimatec, AdebioTech, 2010) et « La filière des macro-algues en France » (NetAlgae, 2012).

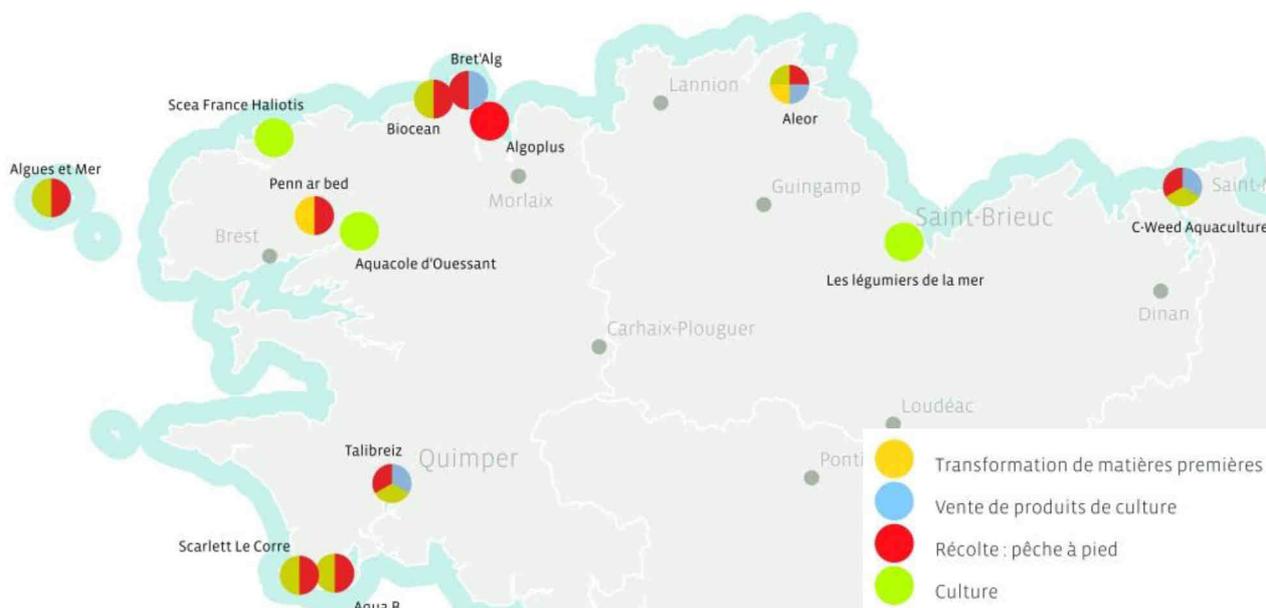


Figure 42 - Principaux acteurs Bretons impliqués dans la production de macro-algues (adapté de [5])

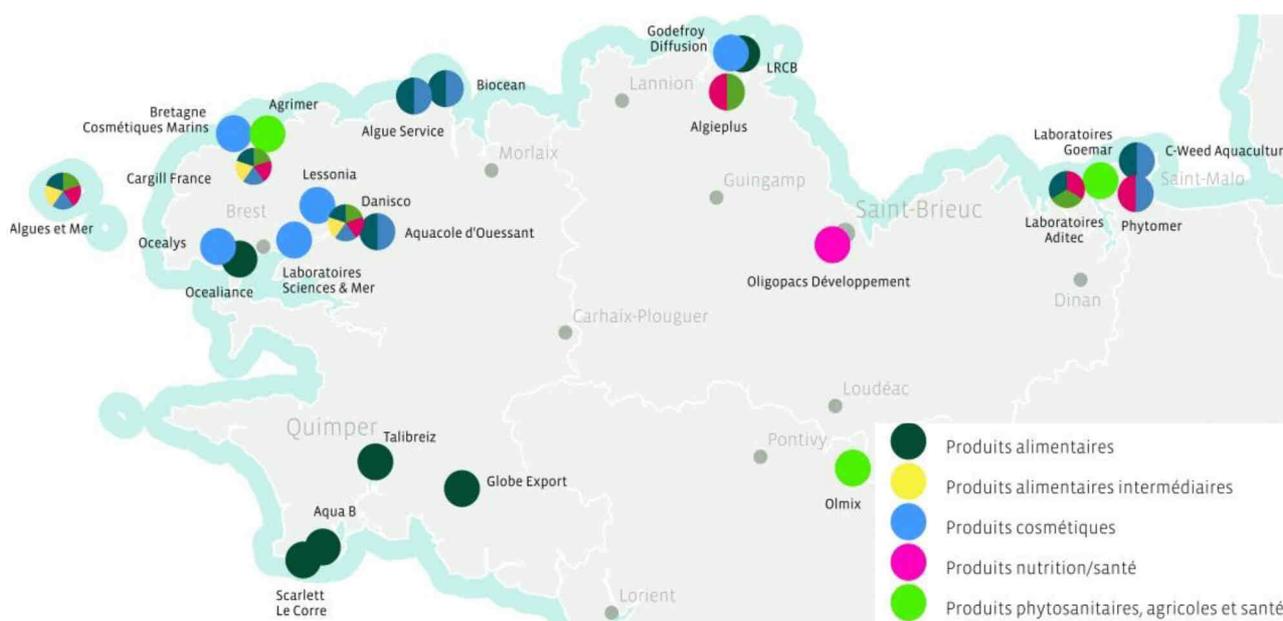


Figure 43 - Principaux acteurs Bretons impliqués dans la transformation de macro-algues (adapté de [5])

3.2.2.3 Principaux projets français de recherche et développement sur les macro-algues

Les principaux projets français de R&D actuels, récemment terminés et prévus relatifs à la production de macro-algues sont fournis en Annexe 2 - Principaux projets français de R&D. Les activités commerciales ne sont pas référencées.

Le principal projet, intitulé IDEALG (Investissements d'Avenir, ANR), pour un budget global de 36 M€ sur 10 ans, réunit entreprises et chercheurs pour développer la filière des macro-algues en France. Débuté en 2011, IDEALG réunit les principaux industriels du domaine (3 algoculteurs, 2 exploitants d'algues dont une multinationale et un centre technique des algues) ainsi que 12 centres de recherche et universités en pointe dans le domaine. Plus de 100 personnes se sont engagées dans le projet IDEALG et plus de 25 personnes sont employées. Il ne fait aucun doute qu'IDEALG contribuera à dynamiser et à donner de la visibilité à la filière au niveau national mais également au niveau européen et international. L'expertise spécifique du consortium sur la chimie et la génétique des algues accélérera le transfert de connaissances pour introduire les biotechnologies dans la filière des macro-algues et donner à la France un statut de référence en Europe. Ce projet permettra de progresser sur de nombreux verrous spécifiques à ce secteur : les

freins économiques, la maîtrise des cultures, les contraintes d'espace et les craintes d'impact de cultures sur les populations naturelles qui limitent aujourd'hui le développement de la filière.

3.2.3 Estimation des tailles de marchés potentiels pour les macro-algues françaises à 2030

3.2.3.1 Segmentation des produits macro-algaux

Pour les macro-algues, 4 produits ont été considérés :

- Biocarburants :
 - Bioéthanol
 - Biogaz
- Algues entières pour alimentation humaine
- Colloïdes pour l'agro-alimentaire

3.2.3.2 Résultats

La méthodologie employée pour cet exercice est la même que pour les micro-algues (cf. 3.1.3.2 page 65).

A nouveau, on considère que les marchés énergétiques ne sont pas plafonnés.

Le détail des analyses menées (informations sous-tendant les hypothèses retenues, résultats intermédiaires) sont fournis en Annexe 3 – Analyse des marchés des produits algaux non énergétiques. La synthèse de cette analyse est présentée en Figure 44, en utilisant une échelle logarithmique afin de palier à plusieurs ordres grandeur d'écart, tant entre produits qu'entre les différents périmètres marché estimés pour un produit donné.

Contrairement à la figure équivalente proposée pour les micro-algues (Figure 35 page 67), la 1^{ère} colonne (bleu foncé) affichant le marché Europe 2030 conventionnel est ici manquante, les produits macro-algaux étant suffisamment matures pour que les marchés estimés soient déjà des marchés spécifiques aux algues.

L'ensemble de l'analyse est fournie en Annexe 3 – Analyse des marchés des produits algaux non énergétiques.

Ces estimations donnent une idée des volumes maximaux envisageables pour les produits macro-algaux non énergétiques à horizon 2030 sur la base des informations disponibles aujourd'hui. Tout comme pour les micro-algues, les parts de marché réelles prises par les algues dépendront de la compétitivité des produits concernés et les volumes associés pourront être modulés par d'éventuelles exportations hors zone Europe. Les ordres de grandeur affichés permettent d'ores et déjà de mettre le doigt sur le caractère fini de ces opportunités.

■ Estimation Marché Europe 2030 pour produits algaux
■ Estimation Marché Europe 2030 pour produits algaux français

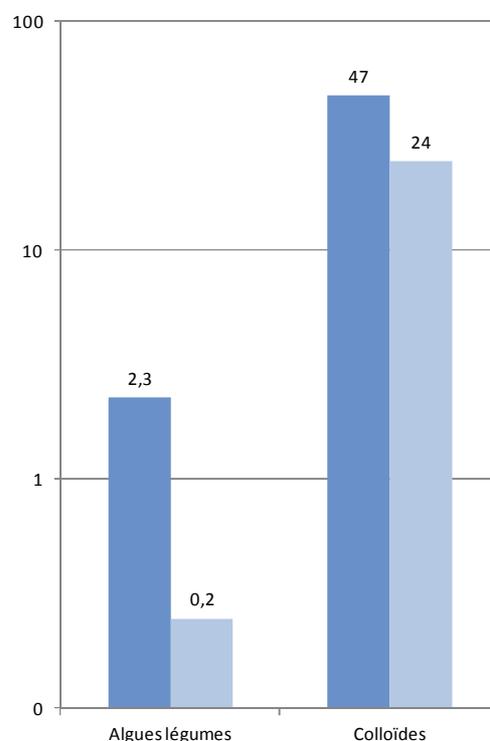


Figure 44 - Estimation en kt/an des tailles de marché Europe 2030 pour les produits macro-algaux (échelle logarithmique)

4 Potentiel physique de production et de valorisation des algues en France à horizon 2030

La suite de ce document présente la méthodologie proposée pour mieux évaluer le potentiel de production de micro- et macro-algues en France, ainsi que les résultats obtenus. C'est donc un exercice de prédiction délicat, pour les micro-algues encore très peu cultivées dans l'hexagone mais également pour les macro-algues sachant que les études d'impact de cultures et de récolte en mer et sur estran n'ont été entreprises que récemment.

Pour les cultures de micro et macro-algues, il s'agit avant tout d'éviter les travers caractéristiques d'un engouement trop rapide, où les potentialités des algues sur divers plans (taux de croissance de la biomasse, teneur en lipides, teneur en protéines, etc.) sont souvent naïvement conjuguées sans prendre en compte leur mutuelle exclusion. En effet, il n'est pas possible d'avoir à la fois des taux de croissance forts et des teneurs en carbone de réserve élevées, de même qu'une carence en azote fait augmenter la teneur en lipides ou en sucres, mais fait aussi chuter la teneur en protéines. Le développement de modèles numériques intégrant l'effet du flux solaire incident, à la fois sur la photosynthèse et sur la température du milieu de culture permet aujourd'hui de cerner le potentiel de façon plus rationnelle. Cette approche est ici déployée pour proposer des chiffres plus réalistes, et plus en accord avec des essais à l'échelle 1:1, chiffres souvent en deçà des productivités peu réalistes proposées par certaines publications.

Cette étude vise à déterminer le potentiel français de ressources algales, principalement pour les marchés de l'énergie et la chimie du végétal, à horizon 2030.

Il s'agit avant tout d'évaluer un potentiel physique de production, afin de savoir de quelle marge de manœuvre de production disposerait la France en considérant les solutions algales compétitives sur leurs marchés respectifs. L'objectif n'est donc pas de projeter et d'évaluer la compétitivité de chaque solution algale à 2030 (tant la multiplicité et la complexité des chaînes de production que la grande incertitude pesant sur les coûts de production due à la faible maturité de la filière rendraient l'exercice particulièrement hasardeux) mais bien, sur la base des ressources physiques disponibles et de l'analyse des marchés concernés, d'estimer des ordres de grandeur réalistes de ce que la France pourrait produire au maximum, tant en termes de biomasse qu'en termes de produits susceptibles d'en découler.

4.1 Méthodologie employée

Cette section décrit la méthodologie employée pour la phase de modélisation du potentiel algal français. Le périmètre retenu est le suivant:

- Le **périmètre géographique** inclus l'ensemble du territoire français, métropole et DOM-COM inclus.
- Le **périmètre des algues considérées** inclus à la fois les micro-algues (auto- et hétérotrophes) et les macro-algues.
- Le **périmètre des secteurs et applications considérés** pour les produits algo-sourcés, s'il est centré sur l'énergie et la chimie, est élargi aux secteurs agroalimentaire, cosmétique et pharmaceutique, débouchés d'intérêt majeur pour les produits et co-produits algaux, comme présenté en Partie 1 de ce rapport.

La modélisation repose sur plusieurs principes généraux décrits ci-dessous.

La modélisation de divers scénarios indépendants : comme décrit en Partie 1 de ce rapport, les chaînes de production de produits algo-sourcés se doivent d'être conçues de manière intégrée et tant les espèces utilisées que les systèmes de culture, types d'intrants et technologies d'extraction et transformation seront sélectionnés et articulés au cas par cas en fonction des produits visés. La productivité même des unités de production d'algues dépend par conséquent du ou des produits visés. S'il n'est pas possible aujourd'hui de connaître précisément l'arbitrage qui sera fait entre toutes les filières algales et les différents produits potentiels, il est possible d'estimer le potentiel maximal de production d'algues selon différents scénarios indépendants dans lesquels la production française est orientée préférentiellement vers un type de débouchés ou un autre. Ces différents scénarios sont présentés dans le Tableau 16 au paragraphe 4.1.1.1.

Pour chaque scénario, le calcul d'un potentiel physique maximal mais réaliste, et ce grâce à deux composantes essentielles de la méthodologie :

- Les différents algorithmes intégrés à la plateforme In@algae, qui à travers des prédictions de croissance non uniquement basés sur l'ensoleillement (comme la plupart des calculs généralement réalisés) mais sur un cou-

plage dynamique « ensoleillement-température », permettent une prise en compte réaliste de l'équilibre entre productivité en biomasse et accumulation de biomolécules, notamment de lipides (voir le paragraphe 4.1.1.2 pour plus de détails sur les modèles utilisés).

- La prise en compte, au-delà du climat, de contraintes liées à la disponibilité des terrains et la présence ou non des ressources nécessaires à la culture des algues, notamment les sources de carbone et de nutriments (voir § pour plus de détails sur les couches limitantes utilisées), qui permettent d'aller au-delà d'un potentiel purement climatique sans aucune réalité de terrain.

Une projection partielle des résultats à horizon 2030 : la modélisation du potentiel algal repose ici sur une approche géographique à travers des calculs de productivité en chaque point du territoire français. L'éligibilité des terrains et la présence ou non de ressources en carbone et nutriments sont par conséquent conditionnées par l'affectation *actuelle* des sols et la localisation *actuelle* des sources de CO₂ et de nutriments. L'année de référence choisie, commune aux différentes bases de données utilisées, est l'année 2012. S'il est impossible de connaître aujourd'hui le nombre et la localisation exacte de ces sources en 2030, une projection du nombre de sources de CO₂ (paramètre particulièrement limitant) à prévoir à cet horizon de temps a été réalisée sur la base des tendances actuelles afin de projeter les résultats obtenus. L'évaluation des marchés est également projetée à 2030 (cf. point suivant).

Une confrontation de ce potentiel orienté « ressources » à la réalité des marchés, à travers une évaluation, pour chaque segment de marché sélectionné, de la taille du marché à horizon 2030, de la part que les algues pourraient représenter dans la fourniture de ces marchés et de la part que la France pourrait prendre dans la production de ces algues.

L'analyse passe par trois **grandes étapes méthodologiques** détaillées aux paragraphes suivant:

- L'estimation du **potentiel physique maximum de production de biomasse** micro et macro-algale
- Le passage du volume de biomasse algale aux **volumes des principaux types de produits algaux**
- **La modulation éventuelle des résultats par une analyse** de divers paramètres d'influence, notamment une analyse préliminaire de la taille des marchés des produits algo-sourcés

4.1.1 Estimation du potentiel physique maximum de production de biomasse algale

Cette première étape, centrale, consiste à évaluer le **tonnage annuel maximal de biomasse** algale susceptible d'être physiquement produite sur le territoire français. Cette étape est réalisée sur la base de la plateforme de simulation In@lgae développée par l'INRIA.

4.1.1.1 Scénarios considérés et principe méthodologique

Les différents scénarios de production de biomasse algale modélisés dans cette étude sont présentés au Tableau 16.

Pour les raisons exposées ci-avant, on distingue les potentiels maximaux de production de micro-algues et de macro-algues, et les potentiels de production de micro-algues autotrophes d'une part et hétérotrophes d'autre part. Pour chacune de ces grandes familles, un certain nombre d'espèces d'algues représentatives ont été sélectionnées et modélisées (voir le paragraphe 4.1.1.2.2 pour la liste des espèces modélisées).

Au sein de la branche « micro-algues autotrophes », on distingue également un scénario où la production française est orientée préférentiellement vers la production de biocarburants d'un scénario où la production est orientée vers des produits à plus forte valeur ajoutée. En effet, les contraintes (notamment la nature des intrants utilisables) sont différentes dans les deux cas, ce qui nécessite de les évaluer séparément. Notons qu'un scénario orienté « biocarburants » n'empêche par la production de certains produits à plus haute valeur ajoutée en tant que co-produits, et vice versa.

Enfin, pour chacun de ces deux scénarios « micro-algues autotrophes orientées biocarburants » et « micro-algues autotrophes orientées produits à moyenne et haute valeur ajoutée (MVA & HVA) », deux systèmes de culture ont été modélisés : bassins ouverts de type raceways et photobioréacteurs, ce qui permet d'encadrer les productivités calculées entre une borne basse (une production française assurée uniquement par des raceways, scénario S1 A dans le Tableau 16) et une borne haute (une production française assurée uniquement par des photobioréacteurs, scénario S1 B dans le Tableau 16).

Pour les algues hétérotrophes, seul le scénario orienté « biocarburants » est effectivement modélisé et simulé. En effet, très peu de contraintes physiques restreignent réellement la production de produits à moyenne ou haute valeur ajoutée à partir d'algues hétérotrophes. Notamment,

- La culture hétérotrophe n'est pas dépendante du climat,
- Cette culture est peu dépendante de la nature des terrains : empreinte au sol moindre, possibilité de produire en intérieur dans n'importe quel bâtiment, etc.
- Enfin, la contrainte sur les ressources est également fortement réduite, la vente de produits à haute valeur ajoutée étant plus susceptible de justifier économiquement un approvisionnement en carbone et en nutriment en quasiment n'importe quel point du territoire.

Dans un tel scénario, le potentiel français n'est par conséquent pas limité par la ressource physique mais bien par la taille des marchés (et la compétitivité des produits algaux sur ces marchés, non évaluée quantitativement dans cette étude).

SCENARIO	TYPE TROPHIQUE	ORIENTATION DE LA CONDUITE	PRODUCTIVITE OPTIMISEE	SYSTEME DE CULTURE
S1 A	Autotrophe (5 espèces)	Biocarburants	En lipides	Raceway
S1 B	Autotrophe (5 espèces)	Biocarburants	En lipides	Photobioréacteur
S2 A	Autotrophe (5 espèces)	Produits MVA & HVA	En biomasse	Raceway
S2 B	Autotrophe (5 espèces)	Produits MVA & HVA	En biomasse	Photobioréacteur
S3	Hétérotrophe (1 espèce)	Biocarburants	En lipides	Fermenteur
S4	Macro-algues (2 espèces)	-	En biomasse	Raceway modifié

Tableau 16 – Scénarios considérés pour la modélisation du potentiel max de production de biomasse algale

Pour chacun des scénarios considérés et pour chacune des espèces représentatives sélectionnées, le modèle In@algae calcule des productivités algales dynamiques (évolutions par pas de 6h agglomérées en valeurs mensuelles) en chaque point du territoire en fonction de données climatiques (sauf scénario hétérotrophe, non dépendant du climat). Afin de rendre les estimations de volumes d'algues produites les plus réalistes possibles, un certain nombre de couches SIG³¹ sont également générées afin de ne sélectionner que les terrains effectivement éligibles à une production d'algues, tant en termes de disponibilité des sols que de présence des ressources nécessaires (CO₂ et nutriments, typiquement). Le principe général de cette démarche est illustré en Figure 45. Des détails supplémentaires sur chacune de ces étapes sont fournis dans les paragraphes suivants.

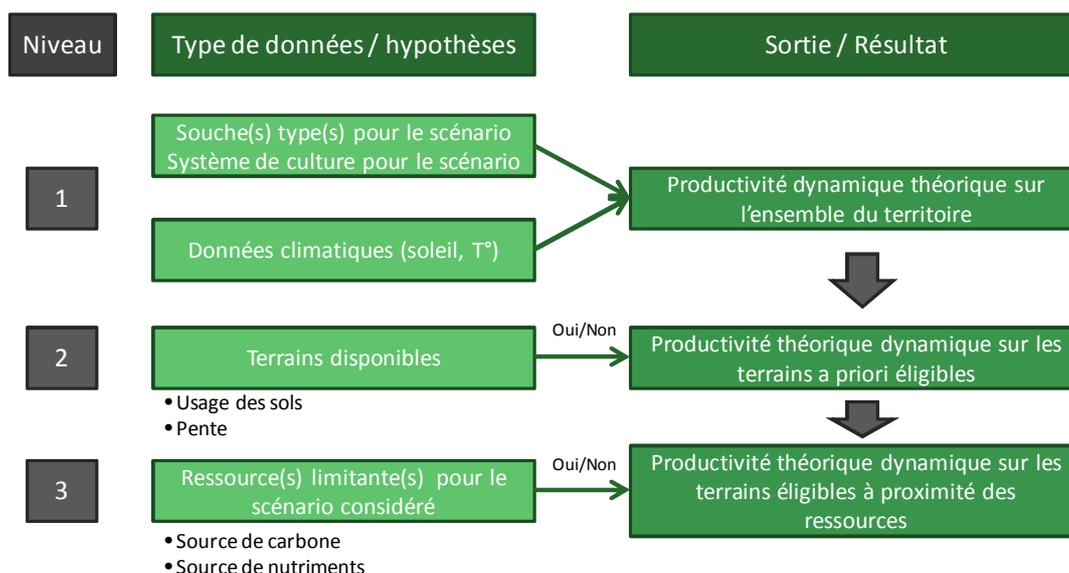


Figure 45 – Principe méthodologique : données d'entrée et de sortie du modèle d'estimation du potentiel de production de biomasse algale

³¹ cartes utilisées par les Systèmes d'Information Géographique

4.1.1.2 La plateforme de simulation In@lgae

4.1.1.2.1 Principes de fonctionnement et valeur ajoutée

La méthode mise en œuvre repose sur la plateforme de simulation In@lgae pour la croissance autotrophe. Cette plateforme, développée au cours des cinq dernières années, regroupe différentes briques numériques pour, in fine, prédire la productivité d'un dispositif de culture. Le modèle utilisé prend en compte :

La météorologie correspondant au lieu et à la période de l'année considérée : Les données météorologiques utilisées sont celles produites par le projet Européen FP7 MACC (Monitoring Atmospheric Composition and Climate). Cette base de données donne accès, à une maille particulièrement fine - interpolation sur une maille de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ et estimations toutes les 6 heures-, à un certain nombre de paramètres clés nécessaires au modèle : l'ensoleillement, mais aussi la température (à 2m), le point de rosée (à 2m et qui, combiné à la température, permet de recalculer le taux d'humidité de l'air), la vitesse du vent (à 10m), la couverture nuageuse (permettant de corriger le flux solaire incident théorique) et les précipitations (à grande échelle et localement).

Un modèle de répartition de la lumière dans le dispositif de culture : Une décroissance exponentielle de l'intensité lumineuse dans le dispositif de culture en fonction de la biomasse (approximation Beer-Lambert) est ici considérée.

Un modèle d'évolution de la température du système de culture : Le modèle de Béchet et al. (2011) est utilisé pour décrire les fluctuations de la température liées au flux solaire. Ce modèle décrit également l'évaporation du milieu de culture, et permet de calculer les quantités d'eau perdues par évaporation.

La régulation de la température se fait de façon naturelle pour les raceways, principalement grâce à l'inertie thermique et à l'évaporation de l'eau du milieu de culture. Nous faisons l'hypothèse que la brumisation, nécessaire au refroidissement des PBR, mobilise les mêmes quantités d'eau. Il faut toutefois noter que l'eau dédiée au refroidissement des PBR doit être de l'eau douce de bonne qualité. Un processus de régulation automatique maintient le niveau de l'eau constant, et on fait l'hypothèse d'une recirculation à 95% de l'eau (5% du flux de sortie est perdu par des fuites (Béchet et al. 2014).

Un modèle de croissance autotrophe en fonction de la lumière et de la température : Le modèle proposé dans Bernard et Raymond (2012), calibré pour 15 espèces différentes, différentes permet de prédire la croissance de l'algue en fonction de la lumière et de la température de son milieu de culture.

Un modèle de croissance sous stress azoté : La croissance moyenne dans le dispositif de culture suit le modèle de Droop (1968) modifié, tel que présenté dans Bernard (2011). Ce modèle permet d'intégrer de façon plus réaliste le compromis entre le taux de croissance et le contenu lipidique (induit par une augmentation du stress azoté et/ou du flux lumineux).

En outre, ce modèle donne accès à une évaluation de la teneur en Chlorophylle a. En utilisant une relation empirique liant, pour *Dunaliella salina*, la teneur en triglycérides et la teneur en caroténoïdes dans diverses conditions expérimentales, on évalue également le potentiel de production de pigments caroténoïdes. Cette production potentielle de caroténoïdes vient en remplacement d'une accumulation de lipides.

Un modèle de synthèse et de reconsommation de lipides : Le modèle proposé par Mairet et al. (2010) et validé en conditions dynamiques pour deux espèces, est ici utilisé. Les paramètres de ce modèle sont modifiés de manière à simuler, pour le besoin de certains scénarios, la dynamique d'une espèce suraccumulatrice de triglycérides (Bougaran et al. 2013). Compte tenu des efforts de recherche actuels pour améliorer les performances des micro-algues par sélection dirigée (projet Facteur 4 financé par l'ANR) ou par voie OGM (Algomics, Giavap, etc.), il est raisonnable d'imaginer des souches opérationnelles présentant un potentiel amélioré pour 2030. Dans ce modèle modifié, on suppose un taux de stockage des triglycérides augmenté de 25% (au détriment du stockage de sucres), ainsi qu'un taux de reconsommation des triglycérides réduit à 50% de la valeur nominale obtenue pour les souches sauvages. Ce jeu de paramètres permet de reproduire de manière réaliste les teneurs en lipides obtenues avec des espèces suraccumulatrices.

Une gestion optimisée de la culture : Afin d'évaluer des modes de production optimisés, des algorithmes de contrôle optimal des systèmes de culture sont également intégrés au modèle. Ces stratégies de conduite des cultures, identifiées à l'aide de la plateforme In@lgae et présentées dans Munoz-Tamayo et al. (2013), permettent maximiser les rendements obtenus par le modèle. L'idée consiste à maintenir la densité de la culture à un niveau qui bénéficie d'un compromis optimal entre la respiration et la photosynthèse dans les couches sombres du système de culture (Masci,

2010, Grognard et al. 2013). Ces conditions optimales peuvent être approchées en contrôlant l'épaisseur optique du milieu de culture. De même, un dispositif permet de compenser l'eau perdue par évaporation. Enfin, une loi de contrôle permet de déclencher une double limitation azote/lumière et déclencher ainsi l'accumulation de lipides.

La modélisation de différents systèmes de culture :

- Le système de culture de base intégré à la plateforme est un réacteur de type **raceway (RW)** de 30 cm de profondeur.
- L'effet d'une alternance lumière/obscurité marquée due aux trajectoires des cellules dans le gradient de lumière (Hartmann et al. 2013) est simulé pour représenter le gain potentiel de productivité en **photobioréacteur (PBR)**. Le facteur obtenu peut alors être utilisé pour passer d'une productivité obtenue en raceway à une productivité en système amélioré. Ainsi, Le raceway permet d'atteindre un taux de croissance moyen de 40% par rapport au taux de croissance en lumière continue (TCLC, i.e. pour lequel la totalité des photons est utilisée). Le scénario en PBR fait l'hypothèse que le taux de croissance maximal est de l'ordre de 80% du TCLC. Le taux de fixation du CO₂ est par ailleurs de 40% pour le RW et de 70% pour le PBR.
- **Cas des algues hétérotrophes** : pour la croissance hétérotrophe, les paramètres obtenus expérimentalement par Pleissner et al. (2013) pour un hydrolysat de déchets alimentaires ont été retenus. Cette étude montre que (après une étape d'hydrolyse), 20 g de biomasse sèche de *Schizochytrium mangrovei* peuvent être produits à partir de 100 g de déchets organiques. Les déchets utilisés par cette étude (60% carbohydrates, 20% protéines et 10% lipides en masse) sont plus biodégradables qu'une eau usée standard, mais ils permettent de donner des ordres de grandeur adaptés, notamment en anticipant une amélioration des technologies d'ici 2030. La composition de la biomasse de *Schizochytrium* produite en condition hétérotrophe est donnée par Pleissner et al. (2013) : 40% carbohydrates, 20% protéines, et 32% lipides. Le flux de matière organique reçu par une STEP est calculé sur la base de son potentiel maximum en équivalents habitants (un équivalent habitant correspondant à 135 g DCO/jour- soit 98 g de déchets organiques- et à 15 g N/jour).
- **Cas des macro-algues** : les modèles utilisés pour l'évaluation du potentiel de production de macro-algues à terre reposent sur les mêmes principes que les modèles micro-algues autotrophes. On suppose un raceway de 75 cm de profondeur et les paramètres de distribution du carbone au sein de la cellule simulent une voie de synthèse de lipides quasi inexistante. Les paramètres de croissance de deux espèces connues ont été utilisés (cf. paragraphe suivant).

Le principe général de la plateforme est présenté en Figure 46.

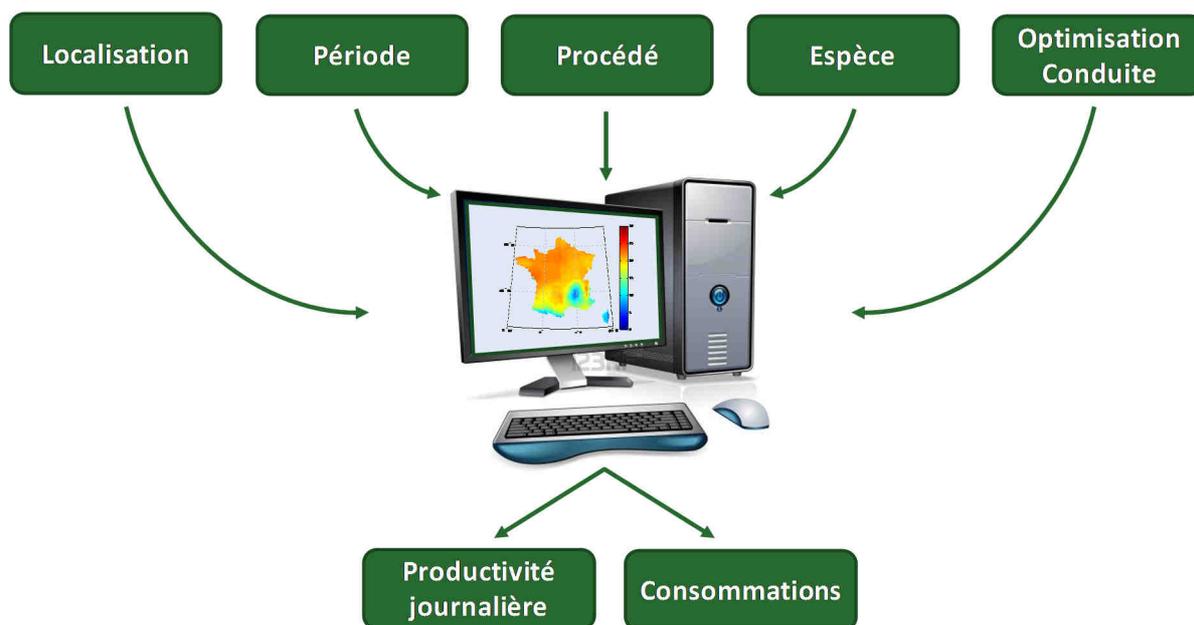


Figure 46 – Schéma simplifié de la chaîne de traitement In@lgae, des données climatiques aux productivités

L'association de ces modèles numériques au sein de la plateforme permet de représenter proprement l'effet des deux principaux facteurs affectant des cultures au soleil : la lumière et la température, et présentent l'avantage déterminant de respecter les contraintes physiologiques qui ne permettent pas d'espérer de fortes productivités pour des carences azotées marquées. De même, une biomasse produite par stress azoté sera moins riche en pro-

ténes. Cela constitue une véritable valeur ajoutée par rapport à la majorité des estimations trouvées dans la bibliographie actuelle, qui maximisent généralement à la fois la productivité en biomasse et la productivité en biomolécules d'intérêt, et permet à cette étude de prédire des productivités dans des conditions optimisées mais pour autant réalistes et cohérentes.

En outre, ces modélisations conduisent à l'estimation des flux d'éléments nutritifs et d'eau nécessaires à la production de composés d'intérêt.

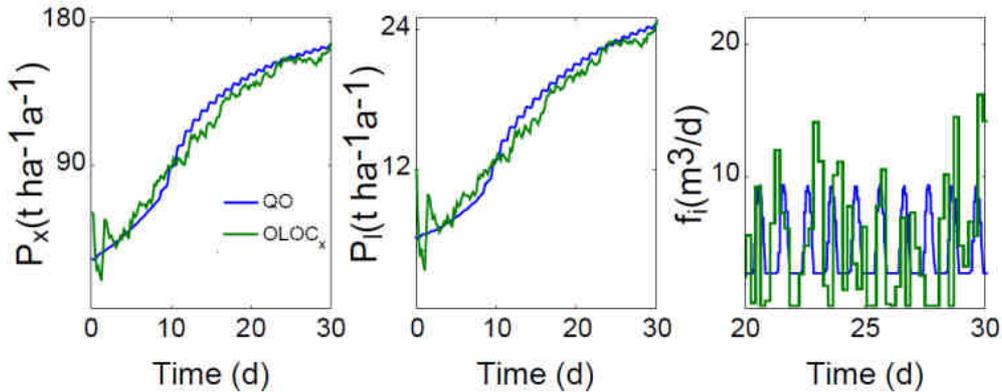


Figure 47 – Exemple de productivité réaliste en biomasse (P_x) et en lipides (P_l) obtenue pour période de 30 jours – avec calcul du débit d'alimentation du RW (f_i)- pour *Isochrysis galbana*

4.1.1.2.2 Espèces modélisées

4.1.1.2.2.1 Micro-algues

Cinq jeux de paramètres réalistes sont utilisés pour les micro-algues autotrophes, correspondant chacun à une espèce différente :

- *Chlorella vulgaris*
- *Nannochloropsis occulata*
- *Isochrysis galbana*
- *Neochloris oleoabundans*
- *Phaeodactylum tricornutum*

Les raisons à la sélection de ce jeu d'espèces sont les suivantes :

- Ces cinq espèces permettent de balayer différentes classes d'algues : chlorophycées, diatomées, prymnésiophytes et eustigmatophycées.
- Ces algues sont largement étudiées et font parties des espèces les plus prometteuses pour la production de lipides ou de biomasse.
- La réponse de ces espèces à la lumière et à la température a déjà été étudiée et quantifiée précisément.
- La sélection de *Phaeodactylum* permet de modéliser une espèce plus adaptée à des conditions de croissance hivernale.

Une espèce hétérotrophe est également considérée. Il s'agit de *Schizochytrium mangrovei*, une des espèces les plus prometteuses en termes d'accumulation de lipides.

4.1.1.2.2.2 Macro-algues

Pour les macro-algues, les espèces *Saccharina latissima* (Broch et al. 2012) et *Ulva* (Solidoro 1997) ont été retenues selon les mêmes critères que pour les micro-algues. Notamment :

- Ce choix permet de représenter une algue verte et une algue rouge.
- Ces espèces présentent un fort potentiel et sont bien caractérisées.
- En outre, contrairement aux micro-algues pour lesquelles il existe de nombreux modèles de croissance, peu de modèles ont été développés pour les macro-algues en raceway. Les deux espèces considérées sont celles qui ont été le plus modélisées (Bendoricchio 1993 ; Solidoro, 1997 ; Broch et al. 2012, dans le milieu naturel, voire en raceway pour *Ulva*).

Les modèles développés pour les macro-algues s'appuient sur ceux mis au point pour les micro-algues. Les fonctions décrivant l'effet des différents forçages pris en compte sont similaires (Duarte, 1998 ; Martins, 2002 ; Solidoro, 1997).

Bien que n'étant pas cultivée en raceway, les paramètres de *Saccharina latissima* permettent d'extrapoler à une espèce virtuelle capable d'accumuler de fortes quantités de carbohydrates et présentant des réponses réalistes à la lumière et à la température.

La composition des sucres diffère pour les deux espèces. Pour *Saccharina latissima*, les carbohydrates sont constitués d'alginate, laminaran et mannitol. Pour *Ulva*, ils sont principalement constitués de fibres -hemicelluloses (20%) et cellulose (9%) - et d'amidon (20%).

4.1.1.2.3 Construction des cartes de productivité

Le code de calcul reconstruit une carte de productivité en évaluant les productivités en chaque point du maillage. Le simulateur est lancé chaque mois, pour les 7 espèces, en mode « raceway » et « photobioréacteur » pour les espèces autotrophes. On suppose que les raceways sont inoculés chaque mois, et la productivité est calculée en soustrayant la quantité initiale de biomasse introduite. Cette productivité est ensuite moyennée sur le mois.

Le modèle de productivité réaliste est développé avec le langage scientifique Scilab. La simulation de chaque coordonnée géographique dure de l'ordre de la minute. Compte tenu du nombre de mailles sur le domaine, de la variété des espèces simulées (7) et de la pluralité des scénarii considérés, le cluster de calcul haute performance NEF de l'INRIA a été utilisé pour réduire le temps de simulation à une semaine de calculs en effectuant les calculs simultanément sur 300 coeurs. Le résultat des simulations est ensuite analysé par des codes développés avec la boîte à outils Mapping Matlab dédiées à l'analyse SIG.

Les productivités sont calculées en termes de :

- Biomasse (g matière sèche/m²/jour)
- Lipides (g/m²/jour)
- Sucres
- Carbone structurel (gC/m²/jour)
- Chlorophylle a (g/m²/jour)

Pour chaque mois et en chaque point de la carte, l'espèce qui a réalisé la meilleure productivité mensuelle est retenue. La productivité annuelle obtenue in fine en chaque point est donc la somme mois par mois des productivités des algues les plus productives de chaque mois à cet endroit. La somme de ces productivités sur l'ensemble du territoire éligible donne ensuite un tonnage annuel total en biomasse.

Pour les scénarios orientés biocarburants, c'est l'espèce la plus productive en lipides qui est retenue.

En parallèle, les principales consommations associées à la culture sont également calculées. Il s'agit des consommations en :

- Eau (L/m²/jour)
- Azote (g/m²/jour)
- Phosphore (g/m²/jour)
- CO₂ (g/m²/jour)

4.1.1.2.4 Les limites du modèle

La température joue un rôle important dans la prédiction des productivités atteignables. Le modèle suppose qu'il n'y a pas de dispositif actif de réchauffement des réacteurs, ou de refroidissement (autre que l'évaporation pour les raceways et la brumisation pour les PBR, avec des flux limités à l'équivalent de l'évaporation dans les raceways). Tout processus permettant de mieux réguler la température (réchauffage l'hiver et refroidissement l'été) autour d'un préférentiel adapté à l'espèce considérée peut infléchir les conclusions.

La consommation en eau est sans doute sous-estimée : nous avons fait l'hypothèse que les précipitations sont collectées et réinjectées dans les dispositifs de culture (ce qui est simple pour les raceways et complexe pour les PBR). La consommation d'eau vient d'une part de l'évaporation directe (raceway) ou indirecte (PBR) et d'autre part de la compensation des pertes en eau (supposées de l'ordre de 5% de la quantité d'eau en sortie du dispositif). L'éventuelle utilisation d'eau dans les diverses opérations de post-traitement doit également être rajoutée.

L'année 2012 qui a servi à générer les données climatiques a connu un hiver particulièrement rigoureux, qui conduit sans doute à des prédictions pessimistes pour cette période.

Les limitations liées à la compétition avec d'autres espèces, à la prédation ou à des infections virales n'ont pas été représentées. Il s'agit donc bien d'un potentiel maximal, qui peut être érodé si ces aspects sont mal maîtrisés (jusqu'à -30% de productivité en open pond).

4.1.2 Couches limitantes utilisées et hypothèses retenues

Comme expliqué précédemment, le potentiel théorique physique de production d'algues est modulé par un certain nombre de paramètres limitants, notamment la disponibilité des terrains et des ressources nécessaires à la production en fonction de chaque scénario. Le Tableau 17 ci-dessous résume les différentes informations et contraintes utilisées en entrée de chacun des scénarios modélisés.

SCENARIO	Données climatiques	Usage des sols	Pentes	Dispo. CO ₂ capté	Présence de STEP
S1 A & B Autotrophe – Biocarb.					
S2 A & B Autotrophe – M&HVA					
S3 Hétérotrophe – Biocarb.					
S4 Macro-algues					

Tableau 17 – Résumé des couches utilisées pour chacun des scénarios

L'usage des sols et les contraintes physiques liées à la pente des terrains sont des couches communes à l'ensemble des scénarios. Les données climatiques sont communes à l'ensemble des scénarios autotrophes. Pour les scénarios S1 A & B de production de biocarburants à partir de micro-algues autotrophes, on considère l'utilisation de CO₂ capté et de déchets comme source de nutriments (eaux de stations d'épuration) comme indispensable pour éventuellement atteindre une rentabilité économique. Des couches cartographiant les installations émettrices de CO₂ et les stations d'épuration sont par conséquent intégrées au modèle pour ces scénarios. Ces intrants ne sont en revanche pas adaptés à la production de produits à plus haute valeur ajoutée (alimentation humaine ou animale, cosmétique, pharmaceutique, etc.) pour des raisons à la fois réglementaires et sanitaires. On considère par conséquent dans ces scénarios (S2 A & B) que le CO₂ et les nutriments sont achetés « purs » (achat justifié par la valeur ajoutée des produits en sortie) et ne sont pas considérés comme des paramètres physiquement limitants. Idem pour le scénario macro-algues (S4) qui vise à produire tant des biocarburants que des produits à plus forte valeur ajoutée. Enfin, la couche « stations d'épuration » est utilisée dans le scénario S3 de production de biocarburants à partir de micro-algues hétérotrophes, en tant que source de carbone et de nutriments.

Ces différentes informations sont récupérées sous formes de bases de données et converties en « couches » (ou cartes) intégrables au système d'information géographique. Les paragraphes suivants décrivent les différentes contraintes prises en considération et précisent l'origine et la granulométrie des données utilisées pour les simuler.

4.1.2.1 Disponibilité des terrains – Usage des sols

L'ensemble des terrains français³² ne sont évidemment pas disponibles pour la culture des algues. La disponibilité des terrains dépend de nombreux facteurs physiques, sociaux-économiques ou encore réglementaires et politiques.

La base de données utilisée pour référencer les types de terrains et leur affectation est Corine Land Cover 2006 (mise à jour 2011), base de données de référence sur l'utilisation des sols en Europe. Une extension spécifique (CLC DOM) est utilisée pour les Départements d'Outre-Mer.

³² Sur la base d'une surface d'environ 553 100 km²

La base Corine Land Cover segmente les terrains européens en 44 catégories regroupés sous 5 macro-catégories : territoires artificialisés, territoires agricoles, forêts et milieux semi-naturels, zones humides et surfaces en eau.

Pour chacune des 44 catégories, il a été défini, en concertation avec l'ADEME :

- Si le type de terrain concerné était éligible ou non à une culture d'algues
- Le cas échéant, quel pourcentage de la surface de ces terres pouvait au maximum être affecté à de l'algoculture

Le récapitulatif des terrains éligibles et des pourcentages d'affectation associés est donné en Annexe 4 – Sélection des terrains éligibles à la culture des algues. Par exemple, on considère utilisable une fraction des catégories de terrains suivantes : certains espaces ouverts sans ou avec peu de végétation comme les terrains à « végétation clairsemée », certains milieux à végétation arbustive et/ou herbacée comme les terrains à « végétation sclérophylle », les marais salants, les décharges, certaines zones urbanisées à tissu urbain discontinu, une partie des zones industrielles et commerciales, etc.

Ces estimations ne prennent pas en compte la possible concurrence d'autres activités et projets (y compris d'autres énergies renouvelables) pour l'utilisation des surfaces envisagées.

La Figure 48 donne l'exemple des terrains disponibles sur le département de l'Aude.

Les terrains colorés sont les terrains appartenant à des catégories d'usage jugées comme potentiellement aptes à la culture des algues. Comme expliqué en 4.1.2.1 et présenté en Annexe, chacune de ces catégories de terrains est affectée d'un coefficient de disponibilité, distingués par le code couleur utilisé en Figure 48. Ainsi, on considère que 10% des surfaces jaunes et 30% des surfaces vertes sont techniquement utilisables pour la production d'algues.

La maille de la couche Corine Land Cover (maille de 250 m de côté) sert de référence, toutes les autres cartes sont extrapolées à cette maille.

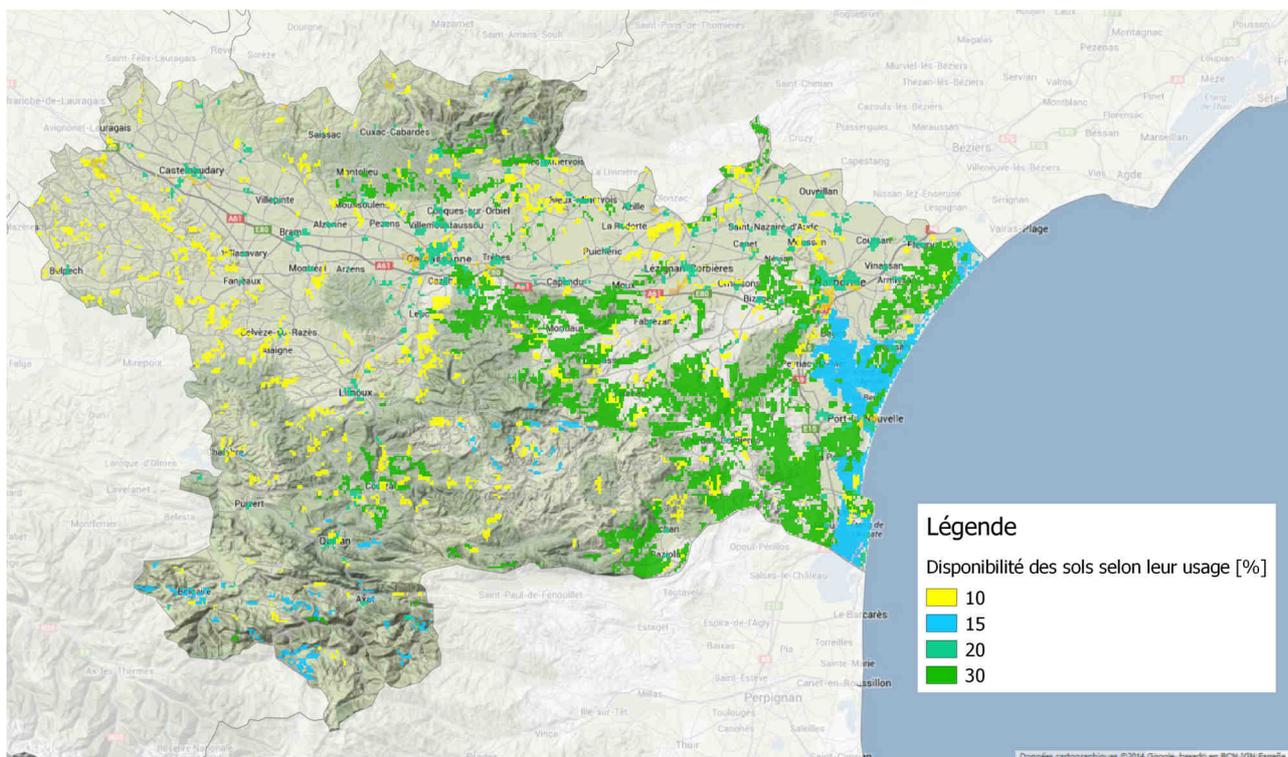


Figure 48 – Représentation géographique de la disponibilité des surfaces du département de l'Aude selon l'usage des sols

4.1.2.2 Disponibilité des terrains – Pente

La culture des algues nécessite des terrains relativement plans. Ainsi, les données topographiques SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de la NASA (maille de 90 m de côté) sont utilisées pour écarter les terrains trop pentus.

Une distinction est ici faite entre les systèmes de culture. En effet, l'installation de photobioréacteurs tolère des pentes légèrement supérieures aux raceways. Ainsi, on considère que seuls les terrains dont les pentes sont inférieures à 2 % sont mobilisables pour des raceways, tandis que les technologies de type PBR permettent d'envisager des installations sur des pentes allant jusqu'à 5%.

A titre d'exemple, la Figure 49 représente les terrains du département de l'Aude dont la pente est inférieure à 2% (zones vertes).

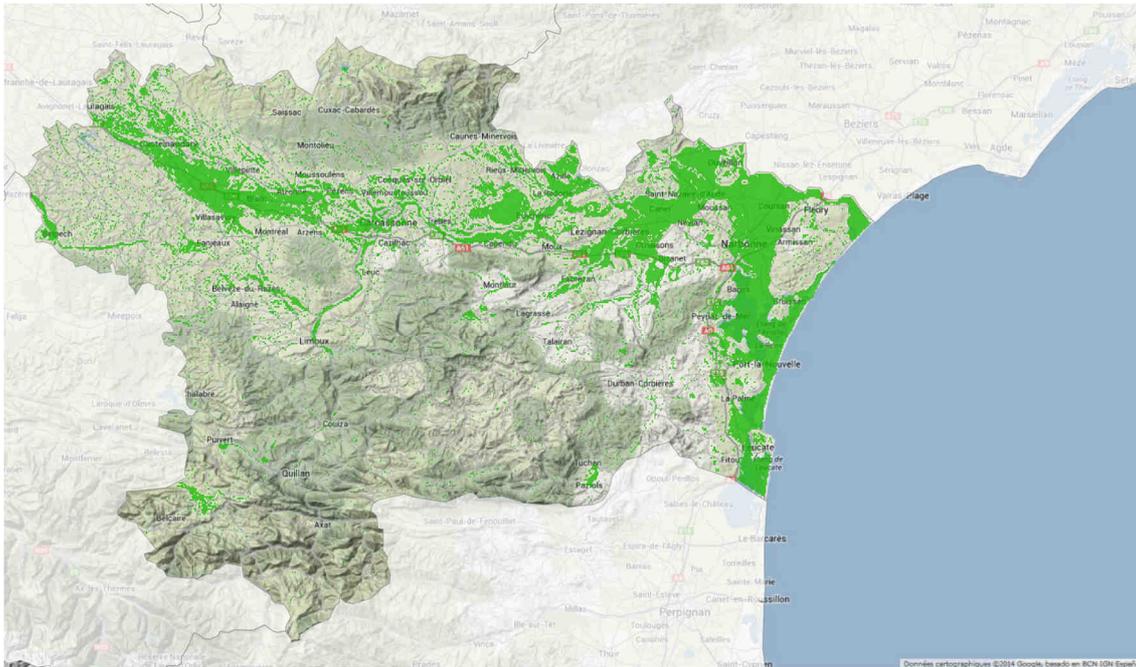


Figure 49 – Représentation géographique des surfaces du département de l'Aude ayant une pente $\leq 2\%$

4.1.2.3 Disponibilité en CO₂

4.1.2.3.1 Localisation des sources d'émission de CO₂

Deux bases de données ont été utilisées pour référencer les installations émettrices de CO₂ et les géo-localiser :

- La **BDD IREP** (Registre français des émissions polluantes, mise à jour 2012), géo-référençant et donnant les émissions annuelles d'environ 1060 sources de CO₂ (aux émissions >10 ktCO₂/an) : sites industriels, incinérateurs, chaufferies de quartier, etc.
- La **BDD méthanisation** du club Biogaz de l'ATEE, regroupant les BDDs AILE, RAEE et SINOE pour environ 300 unités, toutes filières confondues, ce qui permet de compléter la base IREP avec des sources de taille inférieure à 10 ktCO₂/an. Les doublons avec la BDD IREP ont été éliminés (pour les plus grosses unités) et les adresses postales des unités ont été converties en coordonnées géographiques. La disponibilité du CO₂ issu des unités de méthanisation pour la culture d'algues est à considérer avec précaution, dans la mesure où seules les unités disposant d'un équipement d'épuration du biogaz en biométhane pour une injection au réseau de gaz naturel seront susceptibles de capter leur CO₂. Or aujourd'hui, seules 4 unités sont dédiées à l'injection. Cependant, le taux d'installations dédiées à la production de biométhane est amené à augmenter d'ici 2030 et la prise en compte de ces sources à faible débit de CO₂ permet de compenser l'absence de cette typologie de sources dans la base IREP.

4.1.2.3.2 Rayon d'éligibilité au CO₂ autour des sources d'émission

On considère que seuls les terrains situés à moins d'une certaine distance de ces sources d'émissions sont susceptibles d'être approvisionnés en CO₂ capté. Pour une modélisation plus réaliste, ce rayon d'éligibilité au CO₂ varie selon la taille de la source et la densité locale des sources de CO₂. Ainsi :

- Les petites et moyennes sources isolées ont un rayon d'éligibilité au CO₂ de 5 km.
- Les plus gros émetteurs ont un rayon d'éligibilité au CO₂ de 30 km.
- Dans les zones de forte concentration en sources de CO₂, zones assimilables à des bassins industriels, on considère que le transport de CO₂ pourrait être facilité (par la présence de grosses sources, la mutualisation des flux

ou encore la plus forte probabilité de la construction d'un réseau de CO₂). Plus une source de CO₂ est proche du centre de ces zones industrielles, plus son rayon d'éligibilité est important. Ainsi, une source située au cœur d'une de ces zones aura un rayon d'éligibilité de 30 km. Le rayon d'éligibilité des sources décroît ensuite proportionnellement à la distance au centre de la zone, jusqu'à retomber à 5 km pour les sources situées à 50 km et plus du centre de la zone industrielle. Le rayon R_{CO₂} d'éligibilité au CO₂ autour d'une source située à une distance « d » du centre d'une zone industrielle est donc défini par la relation suivante : $R_{CO_2} = \max(5 ; 30 - d/2)$.

La Figure 50 illustre les terrains éligibles au CO₂ capté dans le département de l'Aude (zones vertes).

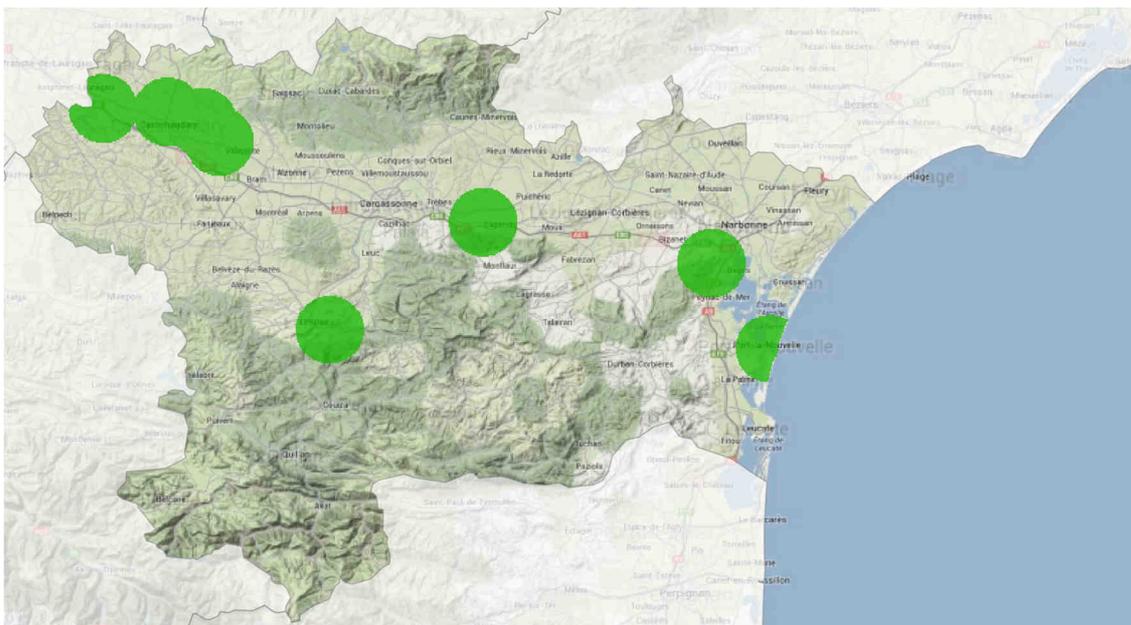


Figure 50 – Représentation géographique des surfaces du département de l'Aude susceptibles d'être alimentées en CO₂ capté

4.1.2.3.3 La question de la projection des sources de CO₂ à 2030

Si la localisation des futures installations émettrices de CO₂ en 2030 ne peut être connue et directement servir à la modélisation cartographique, la question se pose d'éventuellement moduler les résultats obtenus avec les sources actuelles en fonction de ce que l'on sait de leur évolution. Les données aujourd'hui disponibles pour évaluer cette tendance sont les données historiques de la base IREP utilisée pour référencer les sources actuelles. Or, on constate que le nombre d'émetteurs français de CO₂ référencés dans cette base de données (émissions > 10 kt_{CO₂}/an) a baissé d'environ 10 % entre 2006 et 2012 et est plutôt en stagnation (voire décroissance lente) depuis 2009, comme illustré en Figure 51.

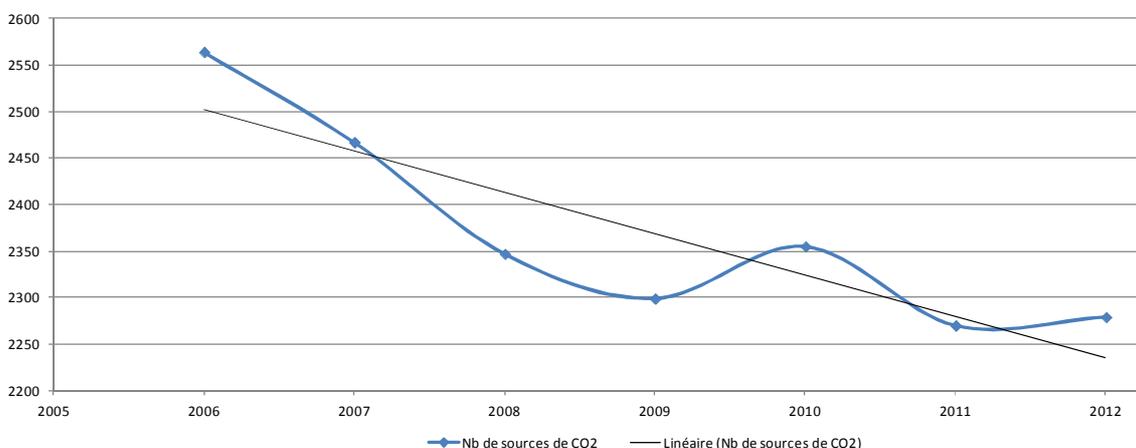


Figure 51 – Évolution du nombre de sources de CO₂ dans la base IREP entre 2006 et 2012

La dynamique industrielle française et les mesures de limitation des émissions mises en place laissent en effet plutôt entrevoir une décroissance qu'une croissance des émissions et du nombre d'émetteurs à horizon 2030.

Cette légère baisse pourrait être partiellement ou complètement compensée par l'augmentation du nombre d'autres types d'émetteurs, plus petits en volumes d'émission, comme les unités de méthanisation. On estime en effet la croissance du nombre d'unités de méthanisation dans une fourchette comprise entre +10 et +30 unités/an [35][36], sachant que seule une partie de ces unités seront destinées à l'injection de biométhane et donc candidates à une fourniture de CO₂.

Pour ces différentes raisons, il est peu probable que le potentiel de récupération de CO₂ évolue de manière fondamentale d'ici 2030, on le considèrera donc comme identique au potentiel actuel.

4.1.2.4 Disponibilité en nutriment

Les sources de nutriments à bas prix (sur une base de déchets) utilisées pour modéliser le potentiel de production de biocarburants sont les stations d'épuration. D'autres sources sont envisageables (certains effluents industriels ou agricoles) mais sans bases de données géolocalisées identifiées pour les intégrer au modèle. La localisation des stations d'épuration comme source de nutriments est permise grâce à la BDD du portail d'information sur l'assainissement communal. Cette BDD fournit les coordonnées des STEP et leurs capacités nominales. Le rayon d'éligibilité aux nutriments fixé autour des STEP est de 5 km. Par exemple, la quasi intégralité des surfaces du département de l'Aude sont situées à moins de 5 km d'une STEP, comme illustré sur la Figure 52.

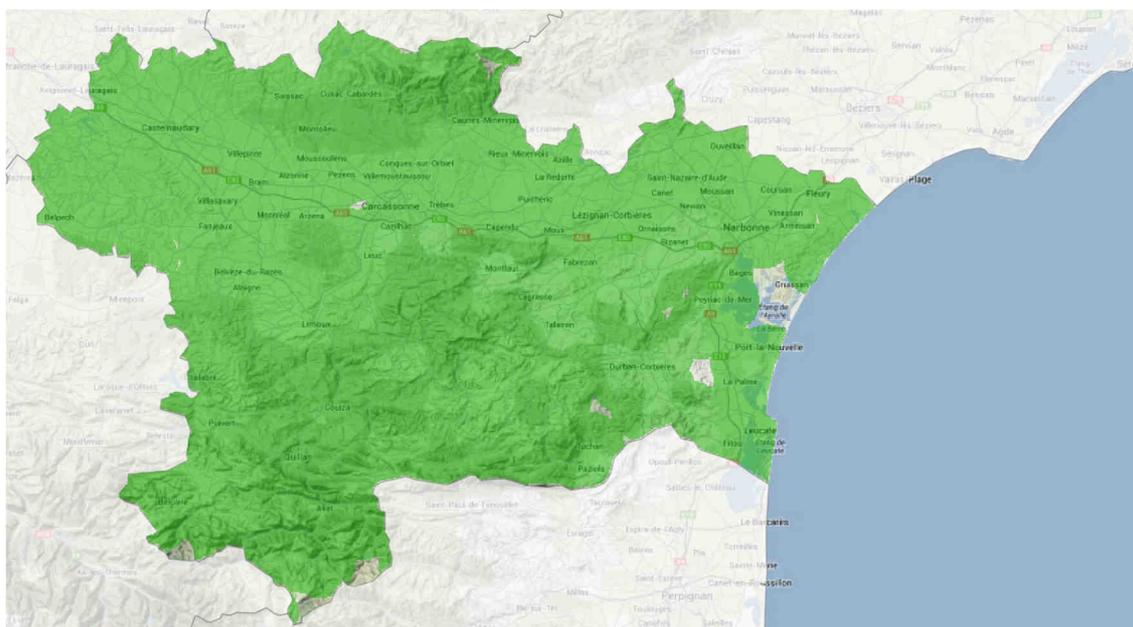


Figure 52 – Représentation géographique des surfaces du département de l'Aude susceptibles d'être alimentées en nutriments (eaux usées de STEP) avec un rayon d'éligibilité de 5 km

4.1.3 Cas particulier des DOM-COM

Les Départements et Collectivités d'Outre-Mer ont été modélisés à part dans la mesure où le niveau d'information relatif aux différentes bases de données utilisées est dans l'ensemble inférieur à la métropole, ce qui a nécessité quelques ajustements méthodologiques. Celles-ci sont présentées au Tableau 18.

DOM-COM	Usage des sols (CLC)	Pentes	Dispo. CO ₂ capté	Présence de STEP	Stratégie de modélisation	
DOM						
971	Guadeloupe					Modélisation directe
972	Martinique					Modélisation directe
973	Guyane					Modélisation possible mais lourde. Extrapolation à partir d'une zone de calcul restreinte.
974	Réunion					Modélisation directe
974	Mayotte					Non pris en compte
COM						
987	Polynésie					Sols : extrapolation de la moyenne d'éligibilité de la matrice CLC de la Guadeloupe soit 0,0272 % des sols. Pas de scénario biocarburant.
	Autres COM					Non pris en compte
Autres						
988	Nouvelle Calédonie					Sols : extrapolation de la moyenne d'éligibilité de la matrice CLC de la Guadeloupe soit 0,0272 % des sols. Pas de scénario biocarburant.

Tableau 18 – Résumé des informations disponibles pour les DOM-COM et de leur mode d'inclusion à l'évaluation

L'information est disponible de manière suffisamment complète pour les quatre principaux Départements d'Outre-Mer. Aucun des autres territoires ne dispose des informations et bases de données requises. Pour la Polynésie française, dont la surface est relativement importante, la modélisation a tout de même été faite sur la base de la typologie guadeloupéenne d'usage des sols. Aucune information sur les sources émettrices de CO₂ et les STEP n'étant disponible à ce jour, seul un scénario « M & HVA » est calculable. Bien que n'ayant pas stricto-sensu le statut de COM, la Nouvelle Calédonie a été incluse de la même manière, car sa superficie est significative d'une part et parce des projets micro-algues y sont déjà identifiés d'autre part. Mayotte (DOM) et les autres COM (St Pierre et Miquelon, Wallis et Futuna, St Barthelemy, St Martin), représentant de faibles surfaces, ne sont pas pris en compte. Bien qu'une extrapolation des résultats moyens des DOM-COM modélisés soit applicable à la surface de ces îles, cela n'impacterait les résultats que de façon marginale.

4.1.4 Du potentiel « biomasse » au potentiel « produits »

Cette seconde étape consiste à passer des tonnages annuels maximaux de biomasse algale susceptible d'être produite en tonnages annuels maximaux de certains produits ou types de produits phares.

La segmentation des produits utilisée est la même que celle présentée pour l'analyse de marché en 3.1.3.1 (page 65) pour les micro-algues et en 3.2.3.1 (page 75) pour les macro-algues.

Pour passer du tonnage de biomasse produite dans un scénario donné au tonnage d'un produit particulier, il faut connaître à la fois :

1. **La partie de l'algue ou biomolécule d'intérêt utilisée** pour générer ce produit (lipides, sucres, pigments, etc.),
2. **La composition massique de l'algue** (part de cette biomolécule d'intérêt dans la masse totale) **ou directement la productivité en biomolécule d'intérêt**,
3. **Les différentes étapes / procédés nécessaires à l'extraction et/ou transformation** de la biomolécule d'intérêt en produit,
4. **Le ratio massique entre la biomolécule d'intérêt et le produit final**, calculable à partir des rendements massiques de ces éventuelles étapes d'extraction et de conversion.

La plateforme In@lgae calcule directement, pour chacun des scénarios, la productivité en lipides, sucres et protéines, permettant ainsi de traiter les points 1 et 2.

Préciser les points 3 et 4 permet de convertir ces tonnes de biomolécule en tonnes de produit, mais nécessite de faire des hypothèses fortes sur les procédés de transformation employés ainsi que les choix de valorisation effectués.

En effet, comme présenté en Partie 1, il existe parfois un nombre importants de procédés possibles, plus ou moins matures et efficaces, pour extraire une biomolécule donnée et la transformer en un produit visé (cf. Annexe 1 – Arbres technologiques). Ces procédés peuvent présenter des rendements massiques différents, c'est pourquoi **il est nécessaire, pour chaque calcul de potentiel « produit » réalisé ici, de sélectionner un chemin type de production**. Les procédés sélectionnés pour les calculs, choisis pour leur niveau de maturité et de pertinence conformément à l'analyse présentée en Partie 1 du rapport, sont précisés en Annexe 6 – Règles de conversion des tonnages de biomasse en tonnages de produits algaux.

Par ailleurs, la quantité de biomasse ou de biomolécule disponible pour la production d'un produit donné ainsi que le choix des technologies utilisées dépendent également des hypothèses d'affectation de la biomasse, à savoir si l'on raisonne en **mono-produit** (l'ensemble de la biomasse est affectée à la production d'un produit donné et l'éventuel résidu est perdu) ou en **co-valorisation** de la biomasse en plusieurs produits complémentaires. Les deux approches sont développées ici :

- Dans un premier temps, les potentiels maximaux de production de chaque produit algal sont calculés indépendamment les uns des autres selon un chemin typique d'extraction et/ou conversion,
- **Dans un second temps** et parce que, comme présenté en Partie 1, cette option conditionnera vraisemblablement la viabilité de certains projets, **on envisage également la possibilité d'une co-valorisation simultanée de différentes parties des algues** afin de générer différents produits à partir d'une même biomasse. Là encore, il existe théoriquement une très grande variété de scénarios de co-valorisation de la biomasse, plus ou moins matures aujourd'hui et plus ou moins réalistes à horizon 2030. S'il n'est pas pertinent de rechercher ici l'exhaustivité, il est néanmoins intéressant de faire l'exercice sur un certain nombre de scénarios de co-extraction et co-valorisation, en partant de ce qu'il est d'ores et déjà possible de faire aujourd'hui pour aller vers des cas plus théoriques mais plus représentatifs de ce vers quoi la filière souhaite se diriger à moyen terme. Un panel d'exemples de scénarios de co-valorisation des biomolécules algales, ainsi qu'une indication de leur échéance de faisabilité, sont présentés dans le Tableau 20.

4.1.5 Modulation par l'analyse des marchés

Il est ensuite pertinent de comparer le potentiel « physique » en produits algaux évalué dans les étapes précédentes avec ce que l'on sait des marchés concernés et de leur évolution à 2030.

Pour le marché des biocarburants, non plafonné, aucune limite de marché n'est considérée. Le potentiel français de production de biocarburants à partir d'algues est par conséquent égal à son potentiel physique (i.e. ses ressources).

Pour les marchés des produits à moyenne et haute valeur ajoutée, la probabilité d'une limitation du potentiel de production par le marché est plus importante, c'est pourquoi les marchés potentiels de ces produits algaux, estimés en 3.1.3 pour les micro-algues et en 3.2.3 pour les macro-algues, ont été intégrés à l'analyse.

4.1.6 Synthèse comparative et valeur ajoutée de la présente approche par rapport à l'état de l'art

L'Annexe 5 – Synthèse méthodologique comparative et valeur ajoutée de la présente étude fournit une comparaison des paramètres inclus dans la modélisation de la présente étude avec les principales études équivalentes existantes. Ce tableau comparatif est issu d'une étude de la Murdoch University et University of Western Australia parue en septembre 2012 [37], auquel les caractéristiques de la présente étude ont été ajoutées (dernière colonne).

On constate tout d'abord que la présente étude se distingue par un périmètre sensiblement plus large et plus complet que les autres études référencées, qui se concentrent sur l'équivalent du scénario « S1 A » modélisé ici (à savoir des micro-algues autotrophes cultivées en bassins ouverts pour la production de biocarburants) quand 6 scénarios impliquant 8 espèces d'algues sont modélisés ici.

Ensuite, tant les modèles composant la plateforme de simulation que la granulométrie des couches limitantes utilisées permettent à la France de se doter d'une étude de potentiel présentant niveau de précision vraisemblablement inégalé pour une couverture géographique. En effet,

- L'évaluation des productivités repose sur des données climatiques complètes et dynamiques (pas de temps de 6h) quand la plupart des études utilisent des valeurs moyennes annuelles, et modélise les couplages entre ensoleillement et température d'une part, et entre croissance et accumulation des différentes biomolécules d'autre part, ce que ne font pas les autres modèles référencés.
- Le choix des terrains éligibles à une culture d'algues repose sur une typologie de 44 catégories (entre 3 et 10 pour les autres études) et sur la définition de pourcentages des terrains réellement utilisables au sein des catégories éligibles (raisonnement en « tout ou rien » dans les autres études, avec une sélection, par exemple, de toutes les prairies ou de tous les terrains agricoles).
- Le référencement des sources de CO₂ pour les scénarios biocarburants dénombre presque 1400 sources (10 maximum dans les autres études), etc.

Enfin, la présente étude ne s'arrête pas à un potentiel de production de biomasse (ou à une conversion en un unique biocarburant) mais fait le lien entre la biomasse obtenue et une liste de 13 familles de produits algaux dont les marchés ne sont pas uniquement décrits aujourd'hui mais projetés à 2030.

4.2 Potentiel des micro-algues – Résultats et analyses

4.2.1 Potentiel physique maximum de production de biomasse

4.2.1.1 Productivités surfaciques obtenues pour les micro-algues autotrophes

La productivité surfacique prédite par le modèle sur la base des données climatiques, en maximisant mensuellement les espèces sélectionnées et en moyennant les résultats sur l'année, est de l'ordre de **14,4 g/m²/jour pour les raceways** et de **25,3 g/m²/jour pour les PBR**.

Ces chiffres, relativement faibles par rapport aux valeurs souvent annoncées dans la littérature, cachent des variations saisonnières et régionales très importantes (cf. Figure 53 et Figure 54), avec :

- Un gradient Nord-Sud relativement prononcé.
- Des valeurs beaucoup plus élevées pendant les mois les plus chauds de l'année : au-delà de 25 g/m²/jour en raceway et de 60 g/m²/jour en PBR. Cependant, la surchauffe des cultures en août dans les régions les plus chaudes est également notable, et contribue à diminuer les productivités.
- Des productivités très réduites voire nulles en hiver, où, sur l'essentiel du territoire, seules les espèces hivernales se développent. L'utilisation d'espèces « hivernales » permet de réduire cette forte variabilité saisonnière, mais aucune des espèces étudiées ne permet réellement de maintenir de fortes productivités en condition hivernale sauf dans certaines régions du bassin méditerranéen (qui permettent le maintien de productivités de l'ordre de 17 g/m²/jour en raceway et 29 g/m²/jour en PBR).

Ces éléments montrent à quel point la saisonnalité, généralement totalement ignorée, doit être prise en compte dans les calculs de productivité. En effet, cette dernière induit à la fois des variations de la température du milieu de culture et de lumière incidente.

Les calculs de productivités moyennes pour les DOM-COM, pour lesquels le climat est à la fois plus clément et plus constant tout au long de l'année, conduisent d'ailleurs à des productivités nettement plus fortes (**25,4 g/m²/jour en raceway** et **45,2 g/m²/jour en PBR**). L'exemple de la Guadeloupe est donné en Figure 55.

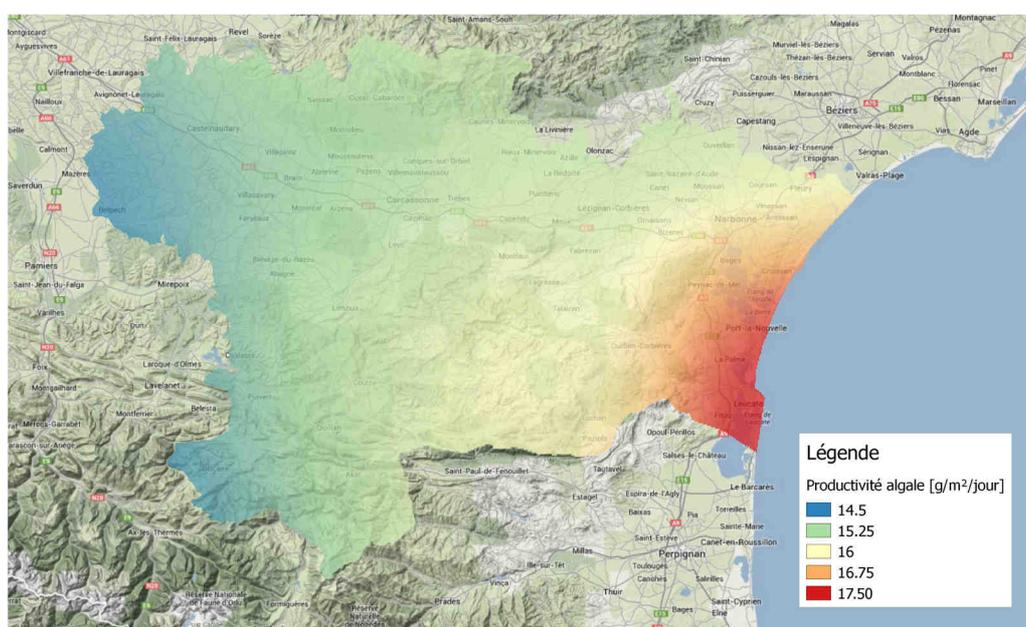


Figure 53 – Carte de productivité moyenne annuelle obtenue à l'échelle locale – Département de l'Aude

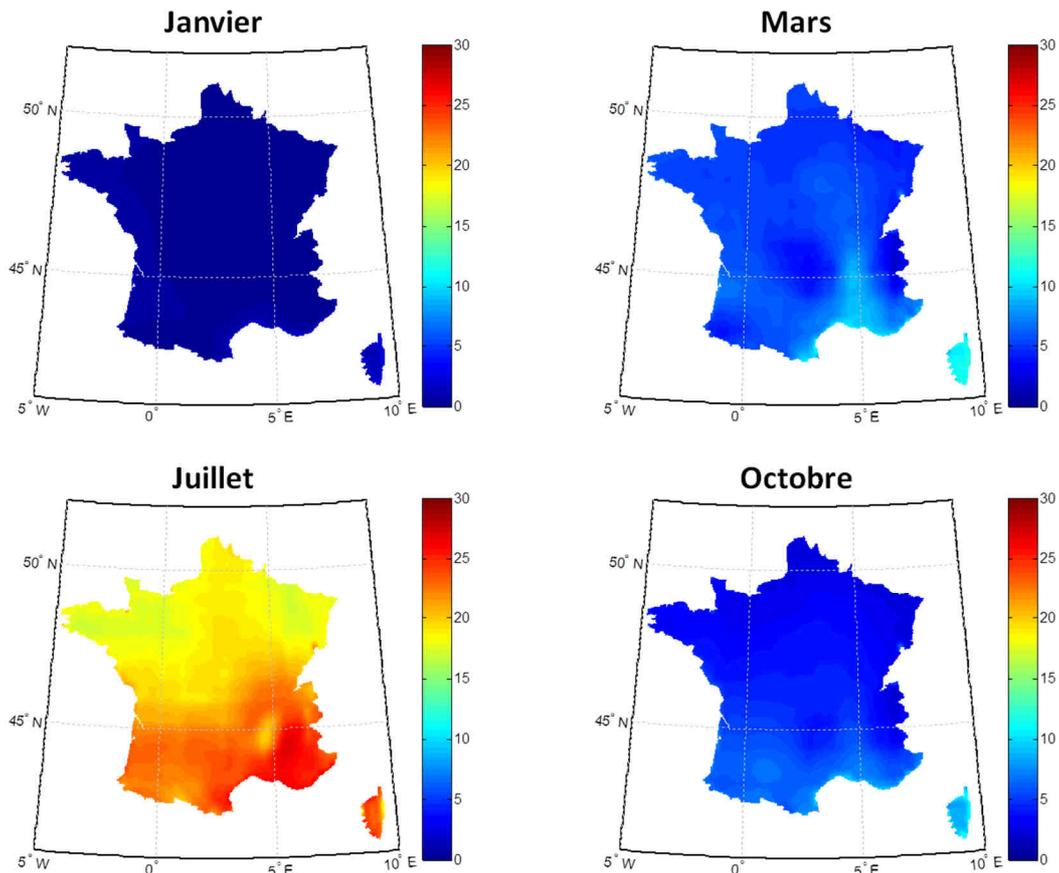


Figure 54 – Exemples de cartes de productivité (en g/m²/jour) obtenues à l'échelle nationale – Cas de *Nannochloropsis oculata* cultivée en raceway pour les mois de janvier, mars, juillet et octobre

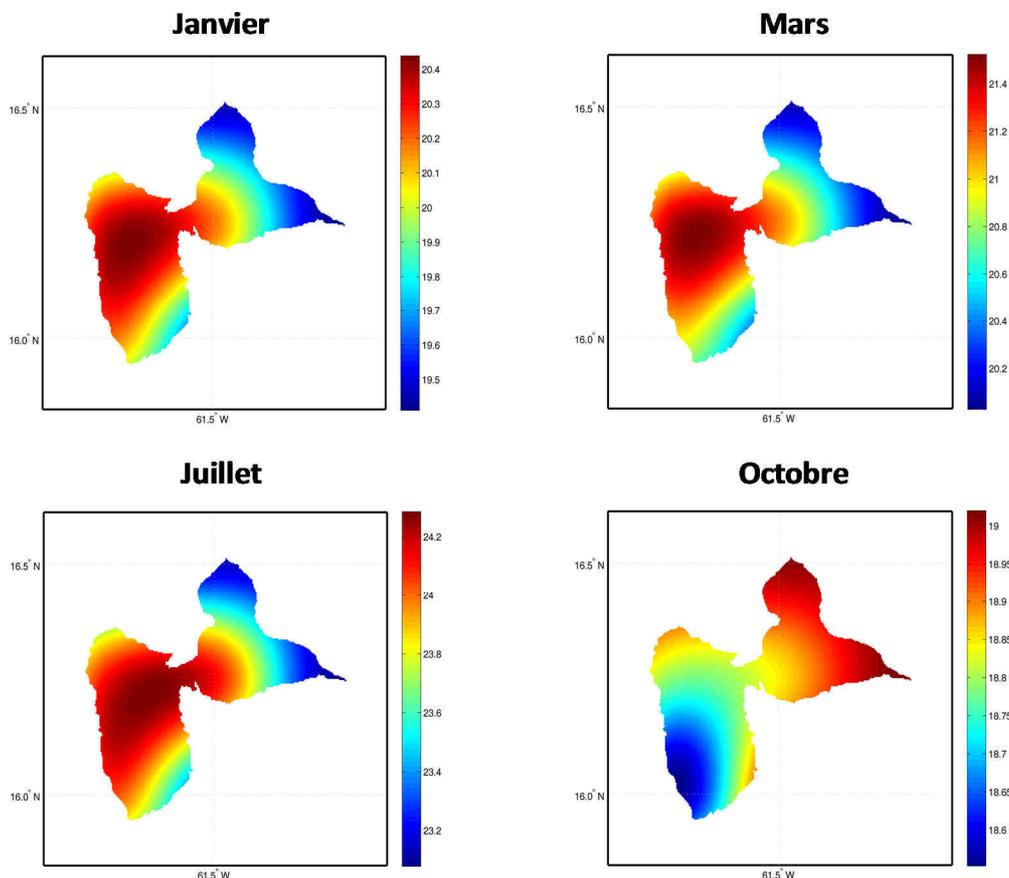


Figure 55 – Exemples de cartes de productivité (en g/m²/jour) obtenues pour la Guadeloupe – Cas de *Nannochloropsis oculata* cultivée en raceway pour les mois de janvier, mars, juillet et octobre

En effet, le climat étant à la fois plus clément et plus constant tout au long de l'année, les productivités obtenues pour les îles sont plus importantes. La productivité surfacique moyenne obtenue pour les DOM-COM modélisés est de l'ordre de 25,4 g/m²/jour en raceway et 45,2 g/m²/jour en PBR. Une culture orientée vers une accumulation optimisée de lipides fait baisser cette productivité en biomasse à 19,6 g/m²/jour (en raceway) mais fait passer le taux de lipides de 27 % à 44 %.

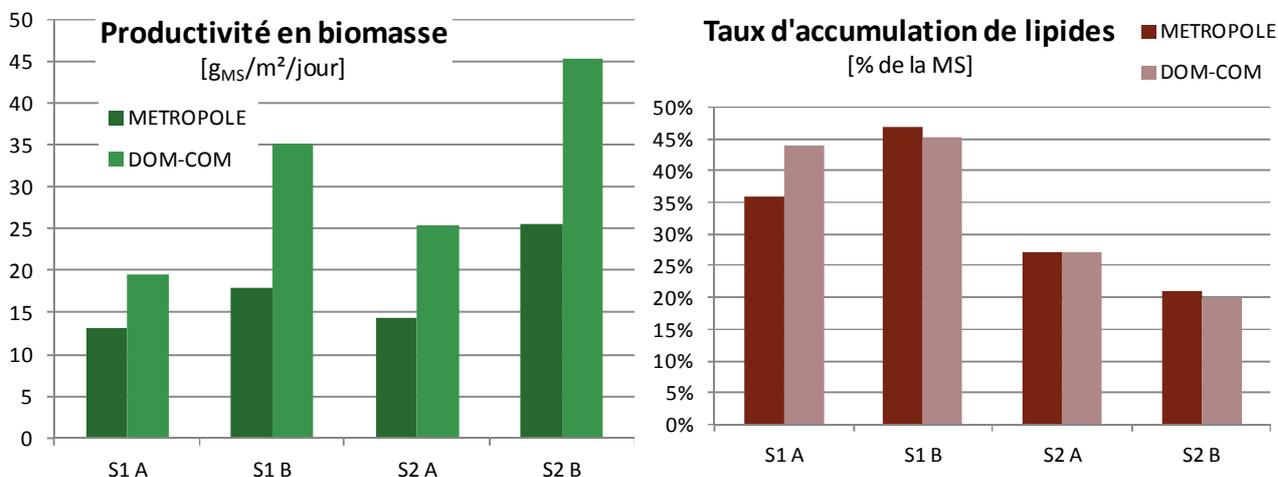


Figure 56 – Productivités surfaciques journalières (à gauche) et taux d'accumulation de lipides (à droite) obtenus en métropole et dans les DOM-COM pour les différents scénarios autotrophes

Ces résultats montrent que des leviers doivent être recherchés pour optimiser la productivité en augmentant la température des milieux de culture l'hiver (production sous serre) et en limitant la surchauffe l'été (procédés d'ombrage ou de valorisation des calories stockées dans le système de culture).

Les teneurs obtenues en lipides, protéines sont par ailleurs conformes aux valeurs de la littérature. Le scénario d'optimisation de la production de lipides induit une diminution de l'ordre de 10 % de la production en matière sèche, pour des taux d'accumulation de lipides de l'ordre de 50 % maximum.

4.2.1.2 Tonnages annuels de matière sèche obtenus pour les différents scénarios autotrophes

La Figure 57 fournit les sorties du modèle pour les scénarios S1 (orientation vers la production de biocarburants et basé sur des intrants industriels) et S2 (orientation vers la production de produits à moyenne et haute valeur ajoutée, sans contrainte sur les intrants), avec dans chaque cas le sous-scénario A (culture en raceway) et B (culture en photobioréacteur).

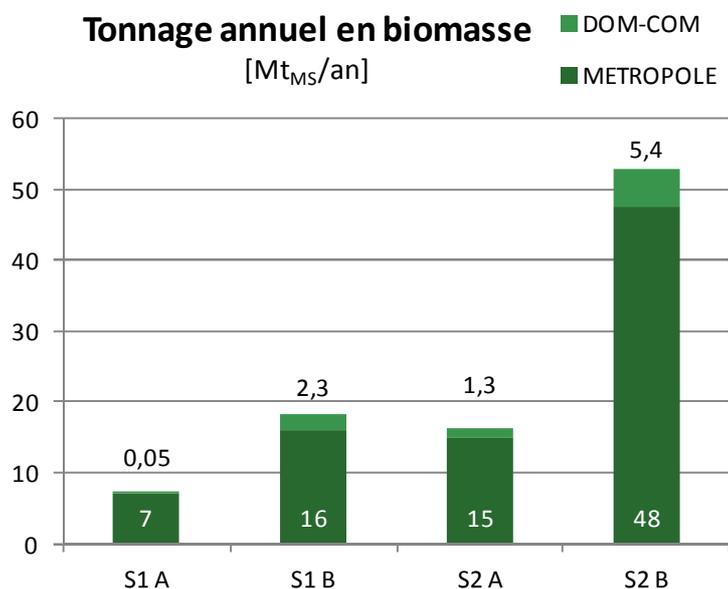


Figure 57 – Potentiel physique annuel de biomasse algale généré pour les scénarios autotrophes

La quantité maximale de biomasse susceptible d'être produite en France en utilisant l'intégralité des terrains considérés comme éligibles est par conséquent de l'ordre de la dizaine de mégatonnes de matière sèche par an.

La part susceptible de provenir des DOM-COM oscille entre 8 % (en PBR) et 13 % (en RW), alors que leur surface ne correspond qu'à 4 % de la surface totale française (métropole plus DOM-COM). Cela est dû aux productivités nettement supérieures obtenues dans les îles (cf. Figure 56).

Le potentiel de production de biomasse micro-algale dans les DOM-COM est de l'ordre de la mégatonne de matière sèche par an (ensemble de la production en raceway) à plusieurs mégatonnes de matière sèche par an (ensemble de la production en PBR). La Figure 58 donne la répartition de cette production potentielle entre les différents départements et collectivités d'Outre-Mer. La moitié du potentiel estimé par le modèle est concentré sur la Nouvelle Calédonie, ce qui n'est pas étonnant étant donné que sa surface est supérieure à la somme des surfaces des autres DOM-COM étudiés.

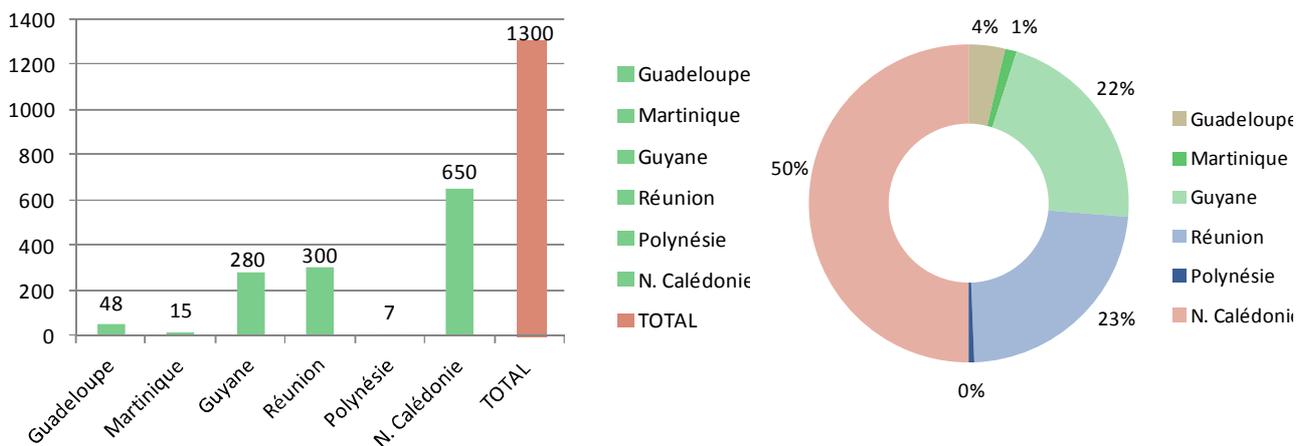


Figure 58 – Tonnages annuels de biomasse obtenus par DOM-COM en kt_{MS}/an (à gauche) et leur répartition (à droite)

En revanche, la quantité de biomasse pouvant être produite à base de CO₂ capté et d'eaux usées de STEP pour une production de biocarburants est particulièrement faible (dans les 50 kt_{MS}/an si l'on considère que ces applications utilisent des raceways, cf. scénario S1A sur la Figure 57). Ceci est lié au plus faible maillage de sources de CO₂ et de STEP dans ces zones qu'en métropole, et au fait que le potentiel de la Polynésie et de la Nouvelle Calédonie n'est pas inclus dans cette estimation (faute de données).

4.2.1.3 Analyse des contraintes (couches limitantes)

Cette section s'intéresse à l'analyse de l'influence des différentes contraintes modélisées sur les résultats obtenus. Contrairement aux données climatiques, au choix des espèces et de la technologie de culture, qui vont jouer directement sur la productivité surfacique, les contraintes étudiées ici vont quant à elles avoir une incidence sur les surfaces de terrain éligibles à la culture.

La Figure 59 récapitule tout d'abord, pour chacune des couches limitantes utilisées dans le modèle et indépendamment les unes des autres, la part de la surface nationale française remplissant la condition en question (pente ≤ X%, usage des sols approprié, présence d'un émetteur de CO₂ et/ou d'une station d'épuration à proximité). Ces résultats sont donnés pour la métropole.

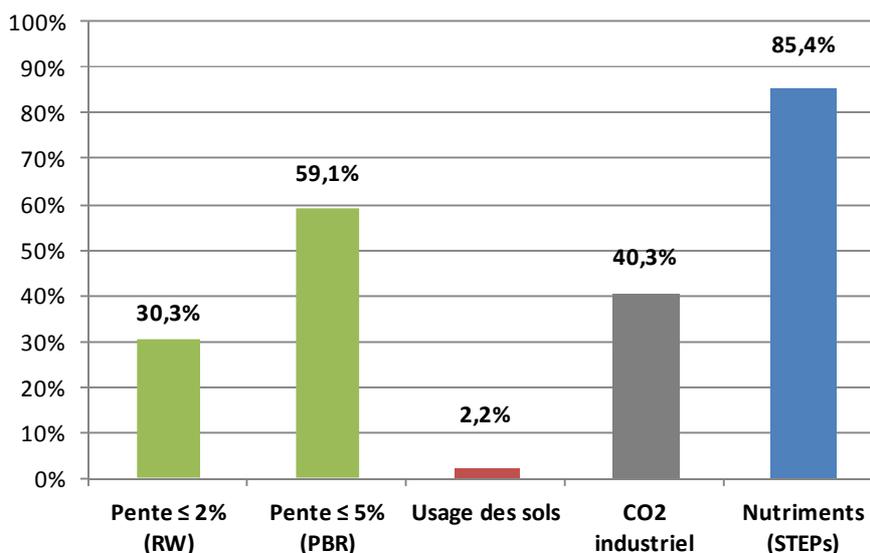


Figure 59 – Récapitulatif de l'influence de chaque contrainte sur la disponibilité des surfaces

On constate que la couche la plus limitante, avec les hypothèses sélectionnées, est de loin la couche relative à l'usage des sols et à la faible disponibilité des terrains qui en découle.

Le Tableau 179 donne les surfaces françaises éligibles à la culture des micro-algues pour les scénarios autotrophes, c'est-à-dire les surfaces résultant de la combinaison des différentes contraintes considérées.

SCENARIO MODELISE & DESCRIPTION			COMBINAISON DE CONTRAINTES	SURFACE ELIGIBLE [%]	SURFACE ELIGIBLE [ha]
S1 A&B	Micro-algues	RW		0,27%	148 324
	Autotrophes Biocarburants	PBR		0,45%	249 854
S2 A&B	Micro-algues	RW		0,52%	288 938
	Autotrophes MVA & HVA	PBR		0,94%	517 563

Tableau 19 – Surfaces françaises disponibles pour chacun des scénarios (métropole)

Ainsi, seuls 0,27% des terres françaises (soit un peu moins de 150 000 ha) seraient techniquement éligibles à la production de biocarburants en raceway dans la mesure où elles présentent à la fois une pente inférieure à 2%, une source de CO₂ et une station d'épuration à proximité, et une utilisation actuelle du sol a priori non réductrice pour cultiver des algues.

Si l'on cherche en revanche à produire des produits à plus haute valeur ajoutée en PBR, cette surface maximale allouable à la culture des algues pourrait monter à 0,94% du territoire, soit plus de 500 000 ha, en considérant une utilisation du sol identique, une pente maximale élargie à 5% et aucune contrainte sur le CO₂ et la source de nutriments.

A titre de comparaison,

- 150 000 ha correspondent à la surface d'un carré de 40 km de côté ou d'un département comme le Val d'Oise (95) et 500 000 ha à celle d'un carré de 70 km de côté environ ou d'un département comme les Bouches du Rhône (13).
- Les terres arables en France représentent 18,4 millions d'ha.

Ces ordres de grandeur peuvent sembler très importants. Les éléments suivants viennent néanmoins les moduler :

- Ces surfaces éligibles sont en réalité extrêmement morcelées, chaque parcelle dépassant rarement la dizaine d'hectares.
- Ces ordres de grandeur sont des maxima physiques correspondant à l'utilisation totale et exclusive de chaque cm² du territoire remplissant les conditions spécifiées.

La comparaison des scénarios, illustrée en Figure 60, permet par ailleurs de faire ressortir l'impact des différentes hypothèses. Ainsi :

- La comparaison des scénarios 1 et 2 montre que l'inclusion ou non des contraintes liées à la présence de sources émettrices de CO₂ et de stations d'épuration réduit les surfaces éligibles d'un facteur 2 environ (cf. flèche verte),
- La comparaison des scénarios A et B montre que le passage d'une pente maximale de 2% à 5% impacte également les surfaces éligibles d'un facteur 1,7 à 1,8 suivant les scénarios.

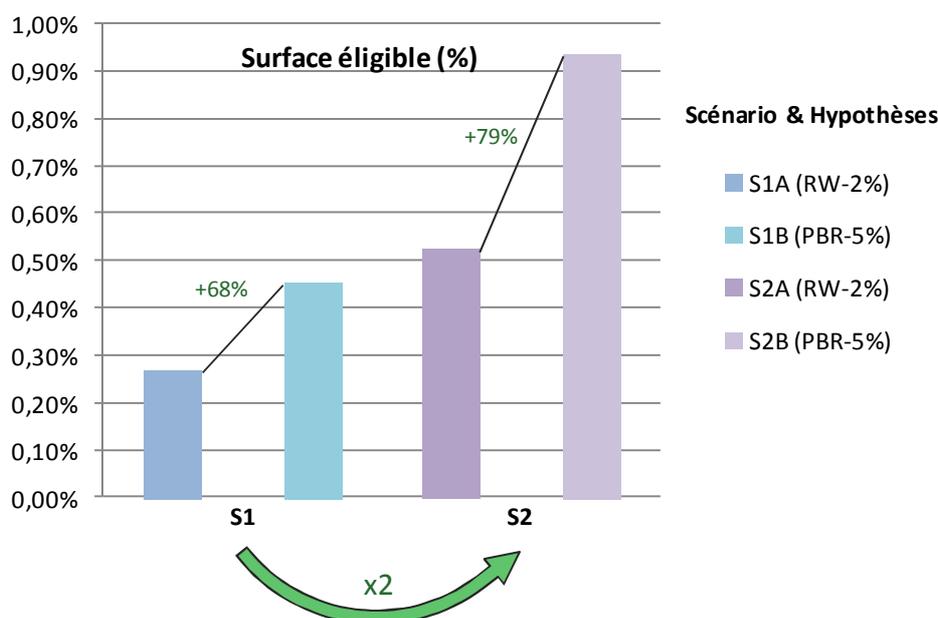


Figure 60 – Influence des hypothèses sur les surfaces françaises éligibles pour chacun des scénarios

Les sous-sections suivantes fournissent des éléments complémentaires d'analyse, contrainte par contrainte.

4.2.1.3.1 Influence de la disponibilité des terrains

En l'état des hypothèses faites sur l'éligibilité de chacune des catégories de terrains à la culture des algues, la couche Corine Land Cover représente le principal facteur dimensionnant les surfaces éligibles pour la culture, avec un impact direct sur les volumes potentiels de production. Cette contrainte est également responsable du morcellement important des terrains éligibles.

Le choix fait de ne pas considérer les terrains à vocation agricole est ici structurant. L'inclusion de ne serait-ce que de 10 % des « surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants » qui, plus précisément, contiennent un « mélange de végétation naturelle, forêts, landes, pelouses, plans d'eau ou rochers à nu où les terres agricoles occupent entre 25 % et 75 % de la surface totale de l'unité » (terrains de catégorie 243 de Corine Land Cover) entraîne par exemple, selon les scénarios, une augmentation des surfaces éligibles à la culture des algues de +7% à +14%, soit entre 10 000 et 75 000 ha supplémentaires.

4.2.1.3.2 Influence de la pente

Comme illustré en Figure 59, le passage d'une pente maximale éligible de 2 % à 5 % fait passer la surface concernée d'environ 30 à 59 % du territoire, soit quasiment un doublement des surfaces. Ce paramètre est donc également particulièrement sensible.

4.2.1.3.3 Influence de la disponibilité en CO₂

Avec les hypothèses retenues (cf. 4.1.2.3.2 - Rayon d'éligibilité au CO₂ autour des sources d'émission), le CO₂ est accessible sur une moyenne de 40 % du territoire, ce qui est finalement relativement peu discriminant.

Si l'on considère, pour des questions de coût de transport, que la distance maximale d'éligibilité au CO₂ autour des principaux émetteurs ou bassins industriels n'est plus de 30 km mais de 10 km (en conservant un rayon de 5 km pour les sources isolées), le CO₂ n'est plus accessible qu'à 12,2 % du territoire et la surface éligible à un scénario « production de biocarburants en raceway (S1 A) » passe de 0,27 % à 0,15 %.

La surface éligible à un scénario « production de biocarburants en PBR (S1 B) » passe quant à elle de 0,45 % à 0,24 %, soit une division par 2 environ dans les deux cas. Ces résultats sont représentés en Figure 61. Les scénarios S2 A et S2 B ont été conservés sur la figure à titre de comparatif, bien que ces scénarios ne soient pas impactés par la disponibilité en CO₂ capté.

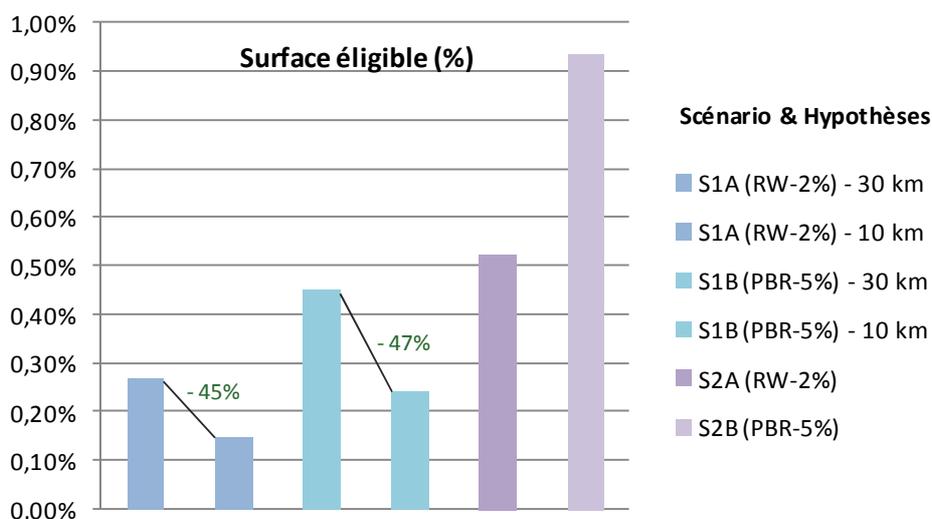


Figure 61 – Influence du rayon d'éligibilité au CO₂ autour des sources sur les surfaces éligibles

On constate par la même occasion que plus le rayon d'éligibilité au CO₂ est réduit, moins la contrainte de pente joue sur le résultat (différence de 68 % entre S1A et S1B pour une éligibilité CO₂ de 30 km contre une différence de 62 % pour une éligibilité de 10 km). Ce constat est cohérent sachant que la plupart des industries sont situées en zones planes.

Il est pertinent de compléter la réflexion en comparant également les volumes de CO₂ nécessaires et disponibles afin de les confronter aux hypothèses de rayon d'éligibilité sélectionnées. Ainsi, pour consommer la production d'une source de taille moyenne émettant 100 000 tonnes de CO₂/an (soit 275 t/jour) avec une productivité maximale de 40 g_{MS}/m²/jour, il faut au moins 3,85 km² de culture. En introduisant la contrainte sur l'usage des sols (éligibilité moyenne de 2,5 %, cf. Figure 59), la surface utile nécessaire à l'utilisation de ce CO₂ est de 150 km² soit un disque d'un rayon de 7 km en considérant une consommation de CO₂ sans pertes (1,8 g_{CO2}/g_{MS}) et de 4 km en considérant qu'il faut apporter plus de CO₂ au système de culture car une partie n'est pas consommée (Ex : apport de 5 g_{CO2}/g_{MS}). Le rayon d'éligibilité de 5 km sélectionné pour la modélisation est donc en adéquation avec les ordres de grandeur d'émissions par source et les besoins des algues en CO₂.

Le même calcul effectué sur une source de CO₂ émettant 2 Mt/an (une centrale à charbon par exemple) donne un disque de 31 km de rayon (pour 1,8 g_{CO2}/g_{MS} ; 19 km pour 5 g_{CO2}/g_{MS}). A nouveau, le rayon de 30 km sélectionné pour les zones de concentration importante d'émission est cohérent avec les volumes émis.

Dans le cas particulier des petits émetteurs que sont la plupart des unités de méthanisation, une analyse complémentaire a été menée. En effet, pour ces sources à faible volume d'émissions, les quantités de CO₂ disponibles risquent d'être plus rapidement limitantes que le rayon d'éligibilité à un transport du CO₂. En appliquant un rayon maximal d'approvisionnement en CO₂ autour de chaque méthaniseur en fonction de leur débit de CO₂ sortant (et en considérant un taux moyen de disponibilité des terrains de 5 % en terme d'usages), les terrains éligibles à la culture d'algue ne représentent que 0,1 % du total obtenu avec l'ensemble des sources de CO₂.

4.2.1.3.4 Influence de la disponibilité en nutriments

Avec un rayon d'éligibilité aux nutriments fixé à 5 km autour de chaque station d'épuration, cette contrainte est finalement la moins limitante du modèle avec 85 % du territoire alimenté.

Comme pour le CO₂, ce constat peut être complété par une analyse des volumes moyens en nutriments nécessaires et disponibles.

Dans le cas de l'azote, une productivité algale de 40 g_N/m²/jour correspond à une consommation de l'ordre de 2 g_N/m²/jour. Une STEP produit en moyenne 75,5 kg d'azote par jour, ce qui correspond à la consommation journalière d'une surface de 4 ha d'algues. En supposant un taux de disponibilité des terrains de 2,5 %, cela revient à un disque de 160 ha soit de 0,71 km de rayon. Même en réduisant le taux d'utilisation du sol de 2,5 % à 0,5 % de la surface, ce rayon ne monte pas à plus de 2 km.

Ce résultat est important dans la mesure où **si 83 % du territoire est potentiellement éligible à une fourniture d'azote en provenance d'une STEP située à moins de 5 km du site, le volume d'azote émis par ces sources est loin d'être suffisant pour atteindre le plein potentiel de ces surfaces.**

Pour affiner l'analyse, un calcul plus fin des rayons des surfaces de micro-algues qui peuvent être mises en culture autour de chaque STEP a été réalisé en fonction de son débit en azote. Nous avons supposé une productivité moyenne de 14,3 g/m²/jour en RW et de 25,3 g/m²/jour en PBR, et un taux de disponibilité de 5 % des terrains. Ainsi, chaque STEP peut être associée à un disque de rayon plus réaliste. La Figure 62 illustre de quelle manière la couche nutriment est fortement impactée (figure à comparer avec la Figure 52 page 87). A l'échelle de la métropole, les terrains éligibles pour les nutriments passent de 85 % à 8 % de la surface totale pour des cultures en RW (conduisant à une baisse du potentiel de production globale de 62 %) et de 85 % à 1,5 % en PBR (conduisant à une baisse du potentiel de production globale de 74 %).

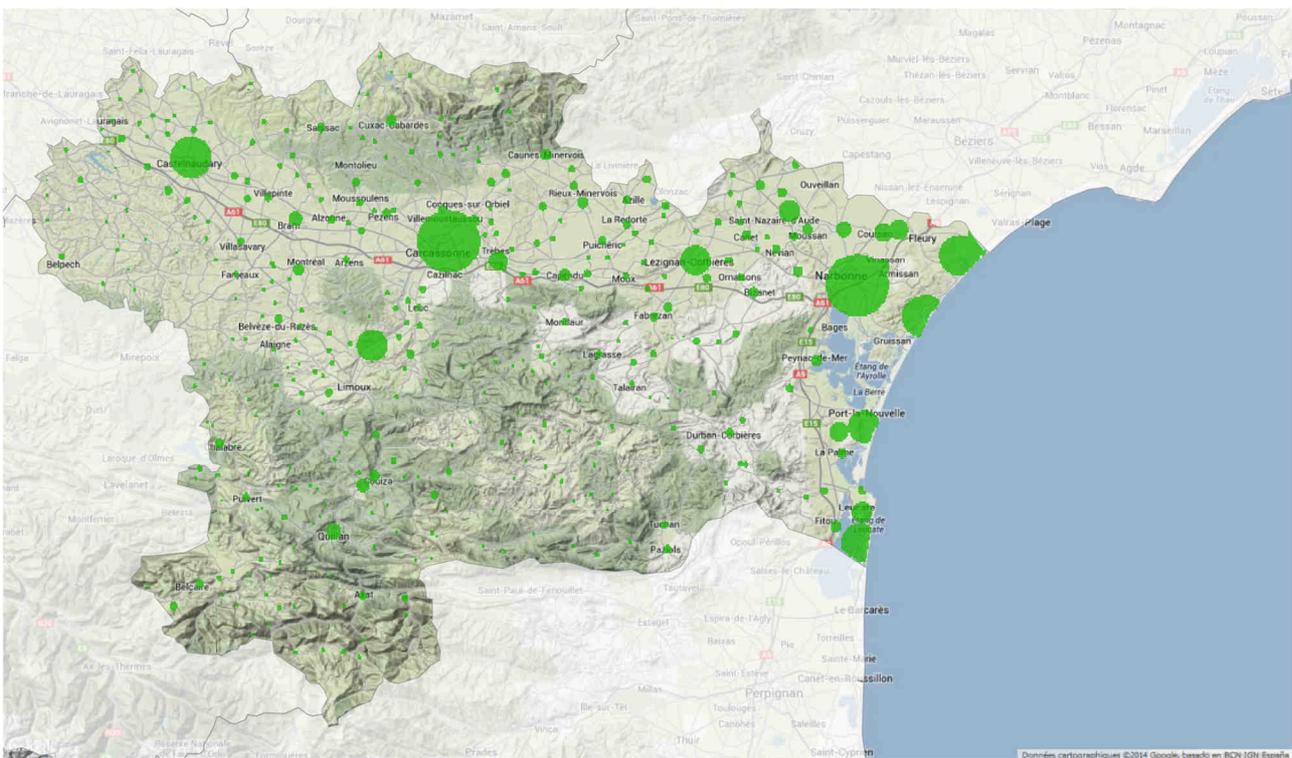


Figure 62 – Représentation géographique des surfaces du département de l'Aude susceptibles d'être alimentées en nutriments (eaux usées de STEP) en se basant sur les volumes disponibles

L'atteinte des potentiels de production évalués dans cette étude pour les deux scénarios biocarburants en autotrophie peut par conséquent être fortement impactée par la capacité ou non des projets à capter l'azote présent dans les eaux usées. En l'état des volumes disponibles, seul 20 % du potentiel biocarburant pourrait *in fine* être réalisé. Cette tension sur la disponibilité en azote renvoie à la nécessité de réduire les besoins en azote ou de mobiliser d'autres sources d'azote.

La mise en œuvre des leviers suivants permettrait d'augmenter la quantité d'azote disponible et ainsi atteindre le potentiel affiché :

- Récupérer l'azote en provenance des nombreuses autres sources de déchets azotés que les eaux de stations d'épuration, typiquement des effluents industriels ou effluents agricoles, non modélisés ici faute de données disponibles. La France présentait en 2011 plus de 500 000 exploitations agricoles dont 55 % dédiées à l'élevage et donc sources d'effluents azotés [38].
- Utiliser des espèces et des modes de cultures avec un besoin réduit en azote. En effet, les micro-algues ont une très forte plasticité naturelle, le rapport (massique) entre carbone et azote peut varier de 5.7³³ à plus de 35 pour certaines espèces, en condition de limitation en azote. Les optimisations du modèle utilisé pour l'étude conduisent à des régimes de croissance peu économes en azote. D'autres modes de gestion, avec des stress azotés plus importants (pour optimiser le taux d'accumulation de lipides par exemple) peuvent réduire les besoins en azote de moitié, voire moins pour certaines espèces. Ces scénarii devraient être explorés en priorité, en optimisant le rendement de transformation de l'azote en lipides, et ainsi gagner un facteur 2 dans l'efficacité d'utilisation de l'azote.
- Reminéraliser une fraction de l'azote contenu dans les micro-algues, en associant la culture de micro-algues à une méthanisation des résidus d'extraction. La digestion anaérobie permet en effet de recycler l'azote organique sous forme d'ammonium (et le phosphore organique sous forme de phosphate). Ce recyclage de l'azote lors de l'étape de digestion anaérobie, compte tenu de la biodégradabilité des micro-algues (de l'ordre de 50% [39]), permettrait de gagner un facteur 2 dans les besoins en azote.
- Finalement, l'utilisation de cyanobactéries diazotrophes, i.e. capables de fixer le N₂ atmosphérique, bien que plus exploratoire, est une solution à creuser pour augmenter le potentiel en biocarburant sans apport d'azote minéral. La fraction d'énergie solaire nécessaire à l'activation de la nitrogénase (enzyme permettant cette fixation) devrait être évaluée précisément pour évaluer les pertes induites sur la productivité en carbone de ces algues.

Le phosphore se révèle moins limitant que l'azote. En effet, il est nécessaire à la croissance des micro-algues dans un rapport massique de 7.2 g_N/g_P³⁴. Or le rapport N:P dans les effluents d'une STEP est de l'ordre de 3.75, ce qui assure le double de l'apport nécessaire en phosphore par rapport à l'azote.

4.2.1.4 Tonnages annuels de matière sèche obtenus pour les micro-algues hétérotrophes

Sur la base des hypothèses présentées aux paragraphes 4.1.1.1 et 4.1.1.2.1, on considère ici l'utilisation de micro-algues hétérotrophes pour la production de biocarburants. Les stations d'épurations sont considérées à la fois comme source de carbone et de nutriments.

La consommation de l'ensemble de la DCO contenue dans le débit total des presque 20 000 STEP de France métropolitaine conduirait à la production d'environ 715 000 tonnes de biomasse algale par an, correspondant à une production totale de l'ordre de 230 000 tonnes de triglycérides (lipides) et 290 000 tonnes de sucres.

Ce potentiel théorique pourrait être gonflé par l'utilisation d'autres effluents comme source de carbone et de nutriments (effluents agricoles, industriels...).

4.2.2 Potentiel physique maximum pour les produits micro-algaux

Les sous-sections suivantes convertissent les tonnages en biomasse précédemment obtenues en tonnages de produits susceptibles d'en découler. Les règles de conversion utilisées sont précisées en Annexe 6 – Règles de conversion des tonnages de biomasse en tonnages de produits algaux.

4.2.2.1 Production physique maximale de biocarburants

La Figure 63 fournit les potentiels de production annuelle des différents biocarburants liquides (biodiesel et bioéthanol) et gazeux (biogaz) à partir d'algues autotrophes et hétérotrophes. Ces algues sont alimentées en eaux usées de STEP et en CO₂ capté (pour les autotrophes).

Le potentiel de production de biogaz est calculé dans deux configurations : la méthanisation des algues entières d'une part, et la méthanisation de la biomasse résiduelle après extraction des lipides.

³³ Rapport de Redfield [116] [117]

³⁴ Rapport de Redfield [116] [117]

Le potentiel de production de biodiesel est calculé en considérant une conduite de culture orientée vers la maximisation de la productivité en lipides. Les potentiels de production de bioéthanol et de biogaz à partir d'algues entières sont calculés sur la base d'une conduite « classique » optimisant la productivité en biomasse.

La dernière catégorie (« Biodiesel + Biogaz ») somme les potentiels énergétiques obtenus pour la production de biodiesel seul et la production de biogaz à partir des résidus d'extraction (1^e et 3^e scénarios du graphique).

Afin de pouvoir comparer les potentiels énergétiques des carburants liquides et du biogaz, l'ensemble des productions sont données en TWh_{PCI}.

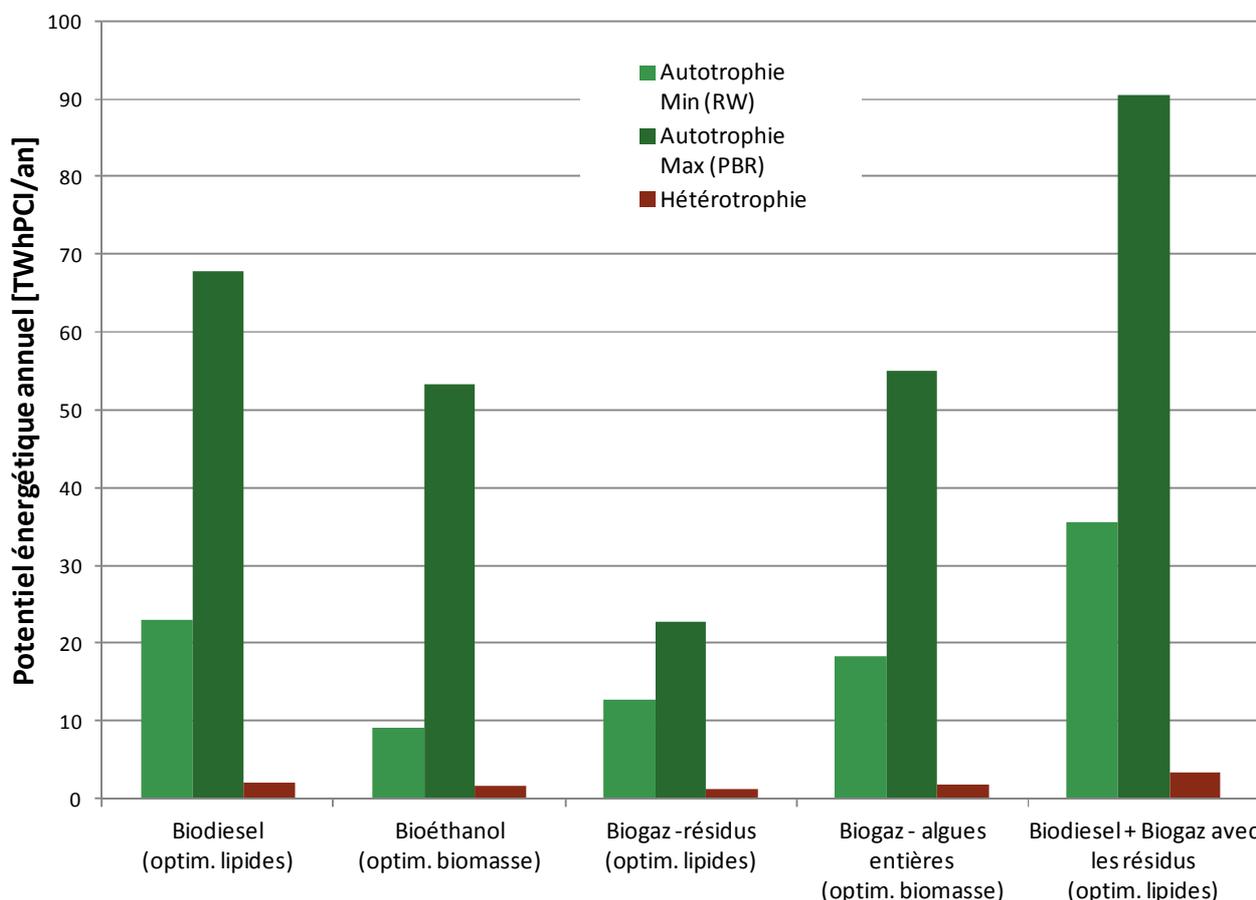


Figure 63 – Potentiel annuel maximal de production de biocarburants par auto- et hétérotrophie

Considérant les forts enjeux de minimisation des coûts de production pour être compétitif sur le marché des carburants, il est plus probable que cette production se fasse en raceway. En se basant sur ces scénarios (barres vertes pour les raceways), le potentiel maximal de production de biodiesel est d'environ 23 TWh_{PCI}/an soit 16 millions de barils par an, ce qui représente environ 7 % de la consommation française annuelle de diesel [39] et représenterait 9 % de cette même consommation projetée à 2030 (en considérant une diminution de la consommation de produits raffinés de 20% en 2030 par rapport aux niveaux de 2006 [40]).

Ce ratio est particulièrement intéressant à regarder pour les DOM-COM au vu des enjeux d'indépendance énergétique auxquels doivent faire face les territoires insulaires. Sur l'ensemble des quatre DOM, la consommation de carburants routiers s'élevait en 2009 à un peu moins de 1,2 million de m³ (environ 0,96 Mt/an³⁵), dont plus de 60 % de gazole (diesel). La production potentielle maximale de biodiesel algal dans les DOM s'élève donc à 4% de leur consommation actuelle et 5% de leur consommation projetée à 2030.

Le potentiel de production de biogaz à partir de l'ensemble de la biomasse résiduelle résultant d'une extraction de lipides est de 12,8 TWh_{PCI} par an, contre 18,4 TWh_{PCI} en méthanisant l'ensemble de la biomasse^{36,37}. A titre de compa-

³⁵ Pour une densité moyenne de 0,8 t/m³

³⁶ On considère un biogaz moyen à 70% de méthane

raison, la consommation française de gaz naturel était de 514 TWh_{PCI} en 2012, pour une production d'environ 10 TWh_{PCI} (soit environ 2% des approvisionnements) [41]). La production française était quant à elle d'un peu plus de 4 TWh_{PCI} de biogaz (biogaz de décharge en provenance d'ISDND³⁸ à 78%) soit environ 1,1 TWh_e d'électricité en 2011 [35][42]. Au niveau Européen, les objectifs de production d'électricité issue de biogaz sont de 64 TWh_e d'ici 2020, tandis que cette production était estimée à environ 36 TWh_e en 2011 [42]. Ainsi, l'utilisation de l'ensemble des terrains potentiellement éligibles à la culture de micro-algues à vocation énergétique et l'utilisation de la totalité des algues produites pour produire du biogaz permettrait de plus que doubler la production française de gaz (gaz naturel et biogaz inclus) par rapport aux niveaux de 2011 et de répondre à un maximum de 10% des objectifs européens de production d'électricité à partir de biogaz à horizon 2020³⁹.

Le potentiel énergétique maximal est obtenu en cumulant la production de biodiesel à partir d'une productivité en lipide optimisée et la production de biogaz à partir des résidus d'extraction des lipides. Ce potentiel est de 36 TWh_{PCI}/an en raceway.

4.2.2.2 Production physique maximale de produits à moyenne et haute valeur ajoutée

La traduction en produits à M&HVA des tonnages de biomasse obtenus est présentée en Figure 64. Dans un premier temps, pour évaluer les ordres de grandeurs et bien que ces scénarios ne soient pas réalistes compte tenu des tailles de marché, on évalue les tonnages obtenus si l'ensemble de la biomasse algale est convertie dans le produit considéré. Les tonnages de biomasse utilisés sont ceux du périmètre métropolitain. La borne basse correspond à une production uniquement en RW (scénario S2A), la borne haute à une production uniquement en PBR (scénario S2B). A ces produits s'ajoutent les plastiques biosourcés, qui bien que de faible à moyenne valeur ajoutée et vraisemblablement produits à partir d'intrants industriels (scénarios S1A et B), sont inclus dans ce paragraphe en tant que produits non énergétiques.

³⁷ A titre de comparaison, l'étude GrDF de 2013 sur l'évaluation du potentiel de production de biométhane à partir de micro-algues en France à horizon 2030 estimait, sur la base de l'utilisation de terrains industriels dans des secteurs ciblés, un potentiel situé entre 1,1 et 9,3 TWh/an à horizon 2020 et un potentiel de 19,3 TWh/an à horizon 2050. Les ordres de grandeurs sont par conséquent cohérents, le potentiel estimé dans cette étude étant supérieur notamment en raison d'un périmètre de terrains éligibles plus large.

³⁸ Installations de Stockage des Déchets Non Dangereux

³⁹ 18,4 TWh_{PCI} équivalent à 6,4 TWh_e en considérant un rendement électrique moteur de 35% [110]

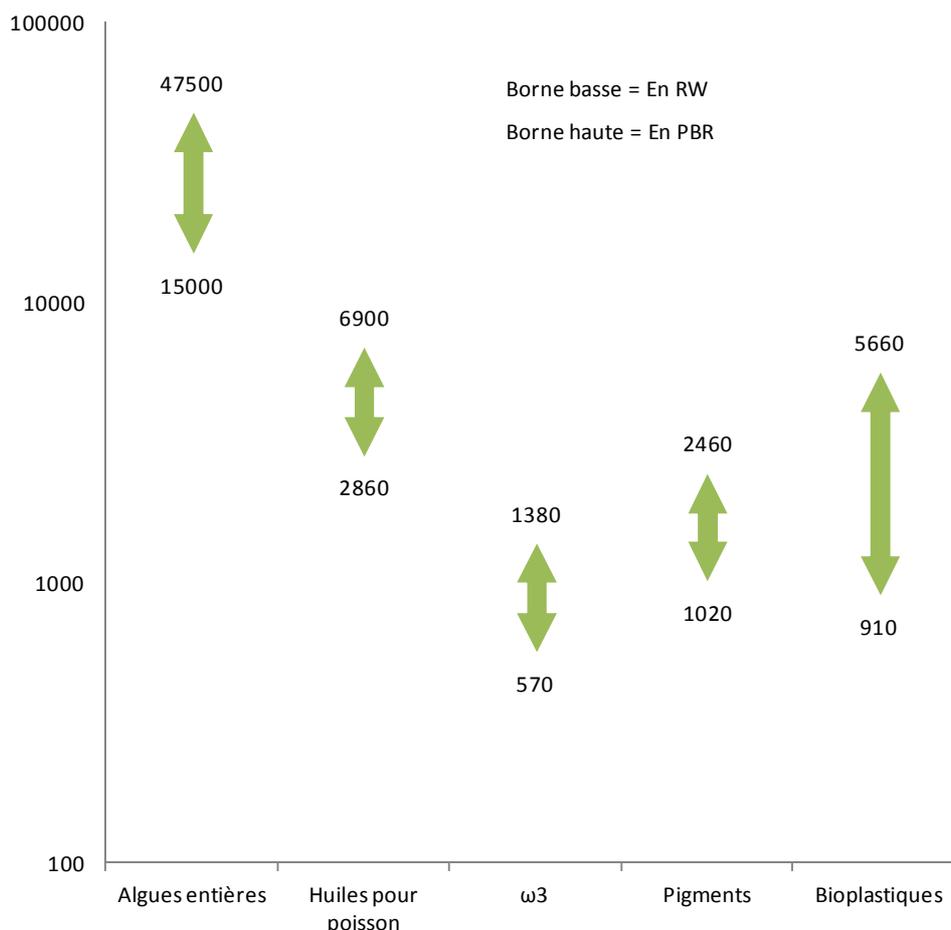


Figure 64 - Maxima physiques indépendants de production française de produits micro-algaux sur la base des ressources disponibles pour des algues autotrophes, en kt/an (échelle logarithmique)

4.2.3 Comparaison des potentiels « physique » et « marché » pour les différents produits micro-algaux (hors carburants)

La Figure 65 compare, pour l'ensemble des produits à vocation non-énergétique, les potentiels physiques de production à partir d'algues autotrophes (telles que présentées en Figure 64) et les tailles des marchés estimées pour ces produits (telles que présentées en Figure 35 page 67).

Pour les potentiels physiques, la borne basse correspond à une production en RW, la borne haute à une production en PBR et le curseur est placé sur la moyenne des deux. Pour les potentiels marchés, la borne haute correspond à la projection de la taille du marché européen des produits conventionnels à 2030, le curseur à la part de ce marché estimée pour les algues, et la borne basse à la part de ce marché estimée pour les algues françaises (cf. Annexe 3 – Analyse des marchés des produits algaux non énergétiques).

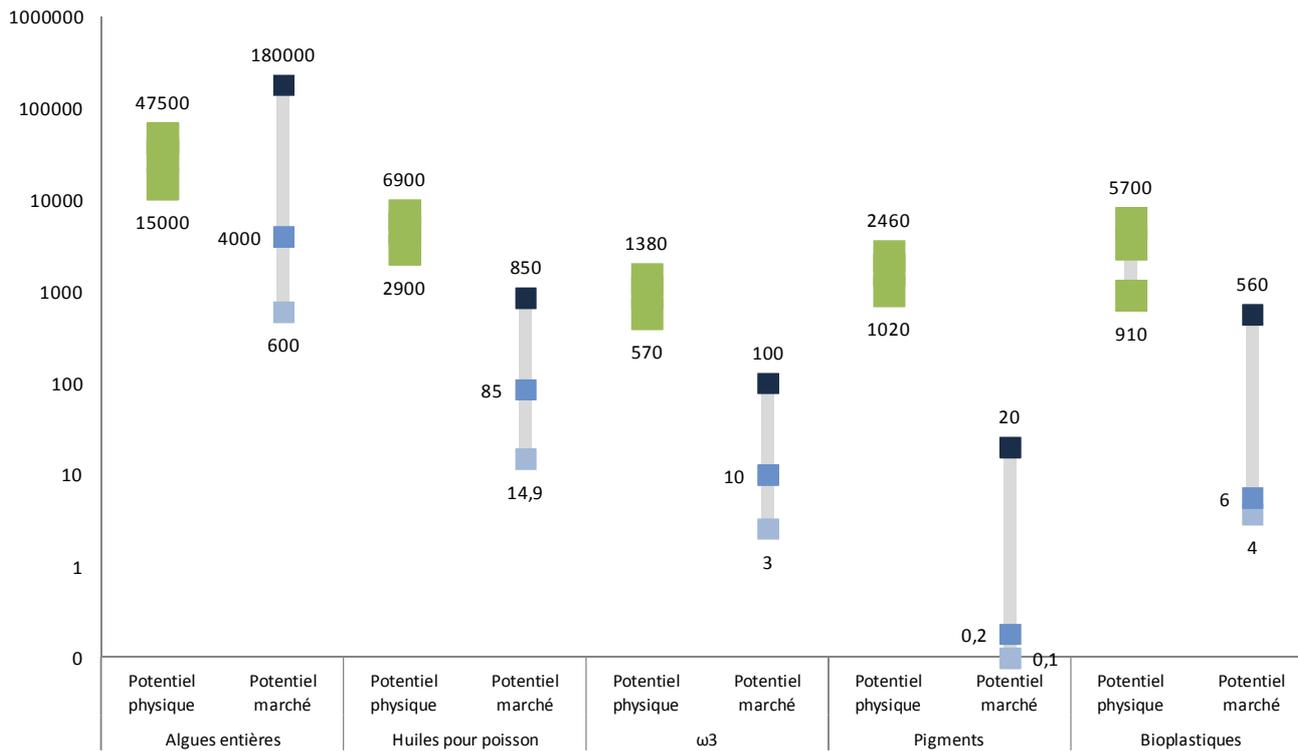


Figure 65 – Comparaison des potentiels physiques autotrophes et des potentiels marchés pour les produit micro-algaux non énergétiques, en kt/an (échelle logarithmique)

Ces ordres de grandeur confirment tout d'abord que dédier l'ensemble de la production potentielle d'algues à l'un de ces produits suffit à inonder l'ensemble du marché Européen prévu à 2030, à l'exception du marché des algues entières pour l'alimentation (porté par les très importants besoins en alimentation animale, notamment du bétail).

En faisant l'exercice inverse, la Figure 66 donne une indication du % du potentiel physique (autotrophe en raceway) nécessaire ou suffisant pour répondre aux besoins du marché européen en 2030 et à la part de marché estimée pour les algues françaises. Le % nécessaire à la fourniture du marché total Europe n'est pas renseigné pour les algues entières car le potentiel français est de plusieurs ordres de grandeur insuffisant (l'hypothèse de l'ensemble du marché de la nutrition animale, notamment, rend ce marché énorme).

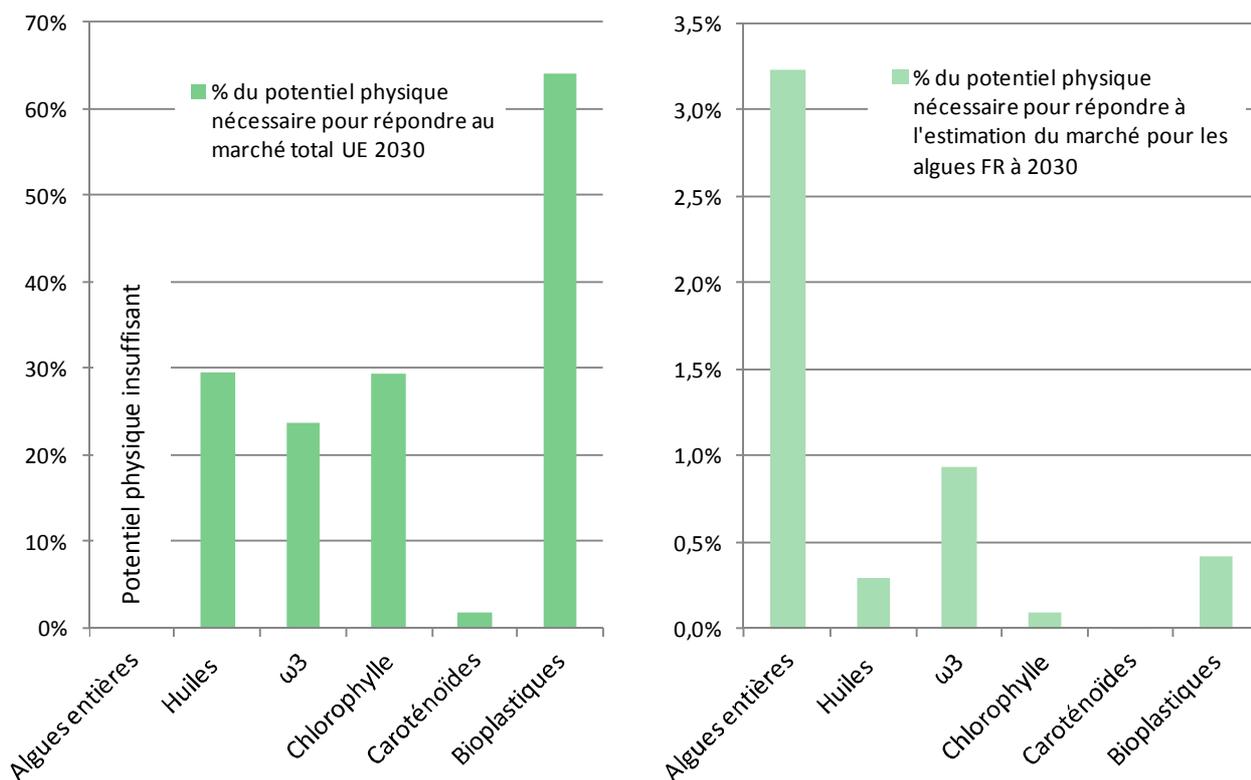


Figure 66 - % du potentiel physique nécessaire pour répondre au marché Europe 2030 (à gauche) et à la part de marché estimée pour les algues françaises (à droite)

Ainsi, avec l'ensemble des hypothèses sélectionnées pour le calcul de la part des marchés algaux susceptibles d'être couverts par des algues françaises à 2030, l'atteinte de ne serait-ce que 3 % du potentiel physique français suffirait à répondre aux estimations de marché en dédiant l'ensemble des cultures à la production d'algues entières, tandis que moins de 1 % du potentiel physique suffirait pour les autres produits (toujours dans l'hypothèse peu réaliste d'une culture française totalement dédiée à la production du produit en question).

En sommant ces pourcentages, on accède au pourcentage total du potentiel physique nécessaire pour répondre à l'ensemble des marchés. Ainsi, l'atteinte de 5 % du potentiel physique permettrait de fournir l'ensemble des estimations de marché établies pour les algues françaises à 2030. Le potentiel physique français est en revanche insuffisant pour répondre à l'ensemble des marchés européens, ce qui n'a de toute façon que peu de réalité.

4.2.4 Scénarios de co-valorisation et de développement de bio-raffineries

Comme nous l'avons vu dans les premières parties de ce rapport, non seulement la production algale française ne sera évidemment pas dédiée à un seul produit, mais chaque projet ou installation ne le sera probablement pas non plus, la commercialisation de plusieurs produits à partir de la même biomasse étant un pré-requis à une rentabilité économique dans de nombreux cas.

Le développement de schémas de co-valorisation ne modifiera pas en soit les ordres de grandeurs des potentiels physiques de production des différents produits présentés dans le paragraphe précédent, mais permettra éventuellement d'en cumuler certains.

Le Tableau 20 donne plusieurs exemples de scénarios de co-valorisation possibles ainsi qu'un indicateur (dire d'expert) de leur échéance de faisabilité technique. Ces stratégies de co-valorisation ne sont pas exhaustives, mais donnent un aperçu de ce qui peut être fait et visé par la filière dans le futur.

La faisabilité effective d'une co-valorisation dépendra fortement de la maturité et des performances des technologies d'extraction et plus généralement du développement technologique en matière de multi-extraction : développement de procédés non destructeurs permettant d'obtenir un résidu d'extraction valorisable, développement de techniques permettant l'extraction de simultanée mais séparée de plusieurs molécules au sein de la même brique procédé, ou

encore le développement de schémas procédés intégrés faisant intervenir plusieurs équipements d'extraction en cascade.

Echéance Faisabilité technique (CT/MT/LT ⁴⁰)	Biomolécule utilisée Produit principal	Biomolécule utilisée Produit secondaire	Biomolécule utilisée Produit tertiaire
CT	Triglycérides Biodiesel	Biomasse résiduelle Biogaz	-
MT	Triglycérides Biodiesel	Biomasse résiduelle Bioéthanol	-
MT	Triglycérides Biodiesel	Biomasse résiduelle Farines pour poisson	-
LT	Triglycérides Biodiesel	Biomasse résiduelle Plastiques bio-sourcés	-
LT	Sucres Plastiques bio-sourcés	Biomasse résiduelle Farines pour poisson	-
LT	Triglycérides ω 3 pour marchés divers	Pigments Colorants alimentaires	Biomasse résiduelle Compléments alimentaires

Tableau 20 – Exemples de scénarios de (co-)valorisation de la biomasse algale pour chaque scénario de production

Les stratégies de co-valorisation impliquant un carburant comme produit principal et des produits à plus haute valeur ajoutée peuvent permettre de viabiliser les projets à vocation énergétique mais à court terme uniquement, dans la mesure où une production à grande échelle de carburants avec co-valorisation de produits secondaires sur des marchés finis inonderait rapidement ces derniers. Seuls les modèles purement énergétiques (Ex : biodiesel plus biogaz) ou avec un produit secondaire de faible à moyenne valeur ajoutée (Ex : biodiesel plus plastiques bio-sourcés ou biodiesel plus alimentation animale) permettent réellement une co-valorisation sur des échelles importantes, au détriment cependant de la rentabilité de ces modèles.

Enfin, seules les principales catégories de produits sont représentées mais n'importe quel autre produit à moyenne ou haute valeur ajoutée développé dans le futur pourrait être combiné dans un schéma de multi-valorisation, du moment que l'ensemble des co-produits choisis font appel à des biomolécules (ou parties de l'algue) complémentaires et que les technologies d'extraction le permettent.

⁴⁰ CT : court-terme ; MT : moyen-terme ; LT : long-terme

4.3 Potentiel des macro-algues – Résultats et analyses

4.3.1 Potentiel physique maximum de production de biomasse macro-algale

4.3.1.1 Récolte de populations naturelles

Comme spécifié au paragraphe 3.2.2.1, la production de macro-algues en France est aujourd'hui d'environ 95 000 tonnes (poids humide, soit environ 14 250 t_{MS}), dont 90 000 tonnes (13 500 t_{MS}) en récolte et ramassage d'algues sauvages, et ce quasi-exclusivement en métropole (côtes Bretonnes principalement).

La France exploite déjà ce potentiel au maximum et les tonnages liés à la récolte de macro-algues ne devraient pas augmenter de façon majeure d'ici 2030 [43].

4.3.1.2 Algoculture en mer

L'algoculture en mer représente aujourd'hui 5 000 tonnes d'algues humides.

Si des espaces maritimes supplémentaires sont techniquement mobilisables pour cette activité, notamment en eau profonde, le frein est aujourd'hui principalement administratif. Obtenir une nouvelle concession maritime en Bretagne est devenu extrêmement rare, notamment en raison de nombreux conflits d'usage et d'enjeux d'acceptation sociétale particulièrement forts. Ainsi, si le projet Algolesko a récemment réussi à sécuriser 200 ha, ce cas reste, semble-t-il, une exception. Le projet porté par Aleor dans les Côtes d'Armor, par exemple, est en stand-by depuis un an faute d'accord.

La tendance est par conséquent plutôt à la récupération d'espaces sur des concessions existantes, typiquement les concessions conchylicoles. Les algues représentent notamment une source de diversification pour une activité ostréicole très impactée par la mortalité des naissains d'huîtres.

Les concessions d'éolien offshore permettraient également de sanctuariser des espaces maritimes de plusieurs hectares, où les activités de pêche et de plaisance y seraient potentiellement limitées. En revanche, contrairement aux espaces conchylicoles, la culture d'algues sur des concessions d'éolien en mer serait assurée par un acteur différent de l'acteur déjà en place, impliquant des modes d'articulation encore indéfinis. En fonction du développement de ces projets et de la place effectivement attribuable à une culture d'algues au sein de ces espaces, le potentiel de production est important, comme on peut le voir en Tableau 21.

La culture de macro-algues pourrait également se faire sur l'estran (zone littorale située entre les limites extrêmes des marées hautes et basses, immergée de façon périodique) avec des espèces comme *Ulva sp.* (dont la productivité à terre est d'environ 20-25 g_{MS}/m²/jour, contre 7,5 g_{MS}/m²/jour pour *Saccharina* en mer [44]). La surface de ces espaces potentiels est cependant difficile à estimer précisément à ce jour.

Espaces mobilisables	Surfaces (ha)	Part de ces surfaces dédiable à l'algoculture	Productivité des macro-algues [44] (Ex. de <i>Saccharina</i>)	Potentiel de production
	[ha]	[%]	[t _{MS} /ha/an]	[t _{MS} /an]
Conchyliculture	4 500 ⁴¹	0 – 30%	35	0 – 47 250
Parcs éoliens offshore	53 000 ⁴²	0 – 30%	35	0 – 556 500

Tableau 21 – Espaces mobilisables et potentiel de production de macro-algues sur les concessions conchylicoles et éolien offshore

⁴¹ Façade Atlantique et Manche [39]

⁴² Les 5 zones du premier appel d'offre de 2011 visant à installer 3 GW d'éoliennes offshore correspondent à une surface totale d'environ 53 000 ha [93]. Les objectifs du Grenelle de l'Environnement sont par ailleurs de 6 GW d'éolien offshore et énergies marines à horizon 2020.

4.3.1.3 Algoculture à terre

Ce cas, proche de la culture des micro-algues, correspond au scénario macro-algues modélisé. Les simulations pour les macro-algues prédisent des productivités moyennes légèrement inférieures aux micro-algues (de 20% en masse sèche). La production a lieu principalement en mi-saison, quand la température reste modérée. Les productivités au Sud pendant les mois chauds restent faibles, ce qui conduit à une inversion du gradient géographique Nord-Sud en été. D'une manière générale, la production est plus régulière que pour les micro-algues.

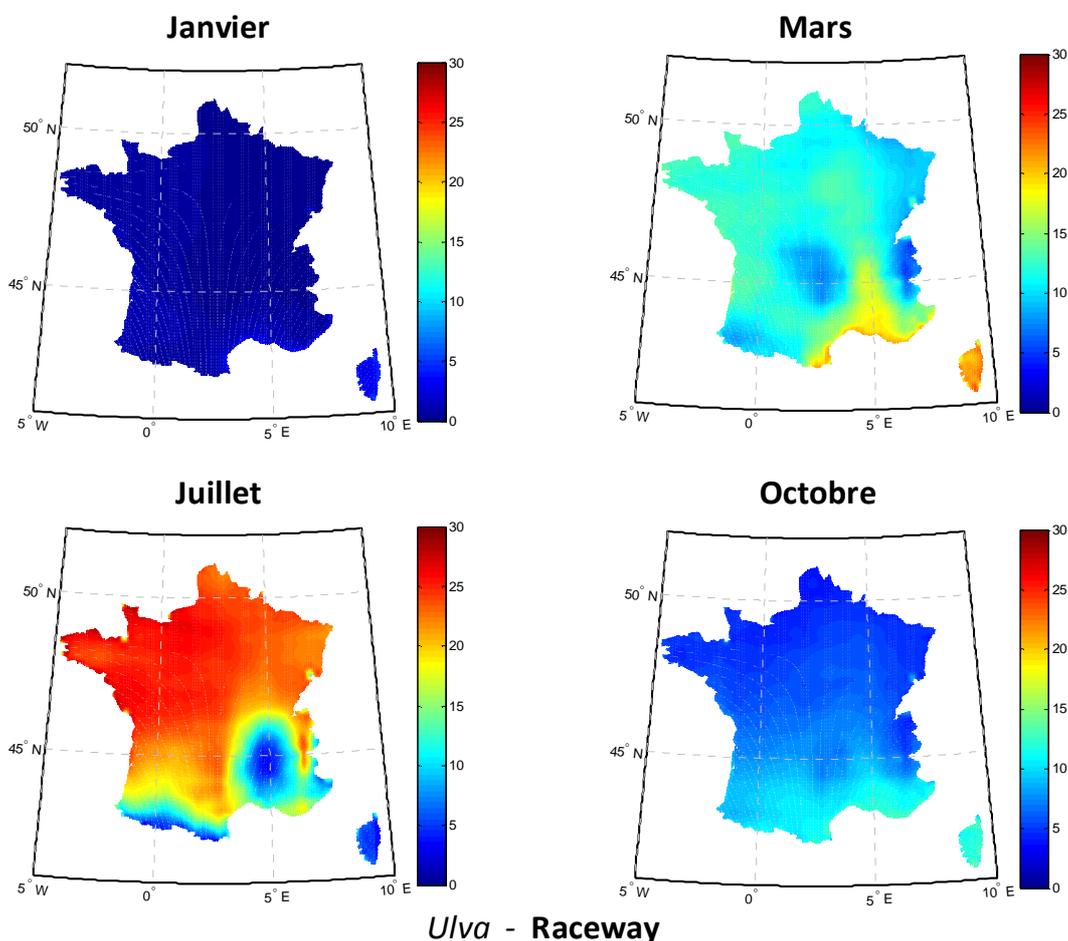


Figure 67 – Exemples de cartes de productivité (en $g/m^2/jour$) obtenues à l'échelle nationale – Cas d'*Ulva* cultivée en raceway pour les mois de janvier, mars, juillet et octobre

Le potentiel obtenu de production annuelle de macro-algues à terre en raceway va de 5,9 Mt_{MS}/an dans un scénario orienté biocarburants à 11,7 Mt_{MS}/an dans un scénario M&HVA (sans contrainte sur les sources de CO_2 et de nutriment).

4.3.1.4 Potentiel physique total pour les macro-algues

Le potentiel de production de biomasse macro-algale est synthétisé dans le Tableau 22.

Les différents tonnages affichés sont cumulables, à la fois entre eux et aux tonnages obtenus pour les micro-algues (sauf pour l'algoculture à terre, en compétition avec la culture de micro-algues).

Source de la biomasse	Surfaces maximales mobilisables	Potentiel de production
	[ha]	[kt _{MS} /an]
Récolte	-	14
Algoculture sur espaces conchylicoles	1 350 ⁴³	50 ⁴⁴
Algoculture sur parcs éoliens offshore	16 000 ⁴⁵	560 ⁴⁶
Algoculture à terre (RW) ⁴⁷	150 000	6 000 à 12 000
TOTAL	167 350	6 000 à 13 000

Tableau 22 – Synthèse des surfaces mobilisables et des potentiels maximaux de production de biomasse macroalgale en récolte, algoculture en mer et algoculture à terre (valeur arrondies)

Si le potentiel de récolte est globalement plafonné aux tonnages actuels, le potentiel physique de production en algoculture est de un à deux ordres de grandeur supérieur à la production actuelle de macro-algues selon que l'on considère une algoculture en mer ou à terre.

Ce potentiel n'inclut pas une éventuelle valorisation des algues vertes échouées sur les plages. En 2012, 60 000 m³ d'algues vertes ont été ramassées sur les littoraux bretons. Ces opérations de ramassage sont aujourd'hui décidées par les communes en fonction de la nuisance perçue, de la pression touristique, des conditions d'accès aux plages, des possibilités de valorisation ou d'élimination des algues et des coûts. Les quantités collectées sont donc très variables selon les années. L'usine de traitement de Launay Lantic, financée à 80 % par l'Etat, traite plusieurs milliers de tonnes d'algues vertes (8300 tonnes en 2012) pour en faire un sable « calco-organique » ensuite épandu par les agriculteurs (son caractère alcalin permet notamment de corriger le pH acide des sols bretons) [45]. Néanmoins, cette solution est présentée comme une solution de traitement d'urgence d'une pollution et non une stratégie de valorisation à proprement parler. Une valorisation tentée par la société Olmix mais qui, au-delà du challenge technique, doit faire face à des enjeux d'acceptation (une partie de l'opinion locale craignant qu'une valorisation pérenne des algues vertes échouées se fasse au détriment de la lutte contre les sources de cette pollution, à savoir les rejets d'azote issus des activités agricoles).

⁴³ Hypothèse de 30% maximum des 4500 ha de concessions conchylicoles

⁴⁴ Sur la base d'une productivité de 35 t_{MS}/ha/an pour *Saccharina*

⁴⁵ Hypothèse de 30% maximum des 53 000 ha de concessions éolien offshore en cours

⁴⁶ Sur la base d'une productivité de 35 t_{MS}/ha/an pour *Saccharina*

⁴⁷ Terres agricoles non éligibles

4.3.2 Potentiel physique maximum pour les produits macro-algaux et comparaison avec les tailles de marché

La traduction des tonnages de biomasse obtenus en produits macro-algaux est présentée en Figure 68 pour les produits énergétiques et en Figure 69 pour les produits non-énergétiques.

Le potentiel de récolte à 2030 étant sensiblement identique à la situation actuelle, la traduction de cette biomasse en produits indiquée correspond à la production actuelle en considérant que l'affectation de la biomasse ne changera pas radicalement, et non pas à un potentiel physique théorique si la totalité de la récolte était affectée à un produit donné. Par soucis de cohérence, le potentiel théorique de production de carburants à partir d'algues sauvages récoltées, de toute façon négligeable face au potentiel en algoculture, n'est par conséquent pas affiché en Figure 68.

Contrairement aux figures équivalentes présentées pour les micro-algues (Figure 63 à Figure 65, pages 100 à 103) présentant des scénarios indépendants (selon le type d'algues et le mode de culture), les potentiels présentés dans les figures suivantes ne s'excluent pas les uns les autres dans la mesure où ils font appel à des espaces -et surfaces- différents. Leurs tonnages sont par conséquent cumulables.

A l'exception du potentiel relatif à l'algoculture à terre, directement en concurrence avec les micro-algues pour les espaces éligibles, ces tonnages sont également cumulables avec les potentiels micro-algues.

La Figure 68 montre que le potentiel physique de production de bioéthanol est de l'ordre de 140 GWh_{PCI}/an en faisant appel à 30% des espaces conchylicoles, de 1,7 TWh_{PCI}/an en mobilisant 30% des futurs parcs éolien offshore et 18 TWh_{PCI}/an en utilisant les espaces à terres jugés éligibles à la culture des algues (les mêmes que pour les micro-algues, sans contrainte sur les intrants).

Les volumes totaux de bioéthanol en jeu sont importants (20 millions de barils/an environ) et couvriraient, cumulés sur les différents espaces, un peu plus de 30 % de la consommation française d'essence de 2011, ce qui est à la fois considérable et peu probable.

Le potentiel physique de production de biogaz à partir de l'ensemble de la biomasse macro-algues susceptible d'être cultivée est de plusieurs TWh_{PCI}/an (environ 9 Wh_{PCI}/an en mobilisant tous les espaces à terre comme en mer, contre un peu plus de 18 TWh_{PCI}/an pour les micro-algues). Cela correspond à plus de 2 fois la production de biogaz française de 2011.

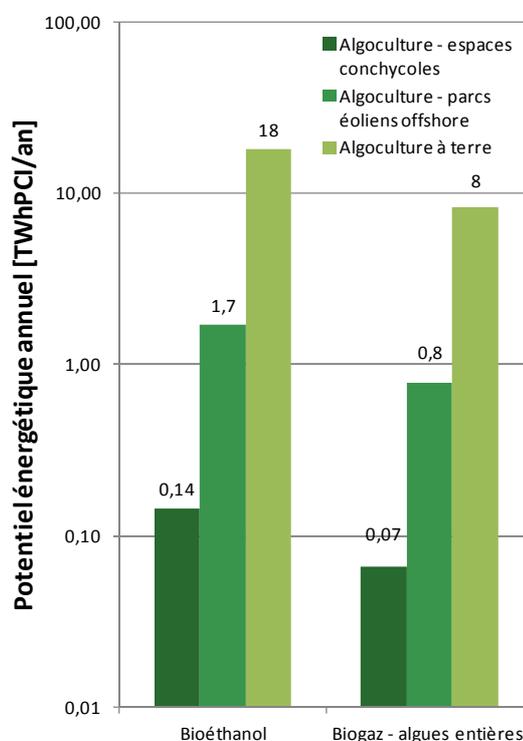


Figure 68 – Potentiel annuel maximal de production de bio-carburants à partir de macro-algues (échelle logarithmique)

Ces chiffres n'ont réellement d'intérêt que pour les marchés de l'énergie. En effet, les tailles des marchés mondiaux actuels des algues pour l'alimentation et les colloïdes sont respectivement de 2,4 Mt/an et 86 kt/an, comme on peut le voir en Figure 69, l'atteinte de respectivement 19 % (pour les algues aliments) et 3 % des potentiels physiques suffirait par conséquent à couvrir la consommation mondiale actuelle.

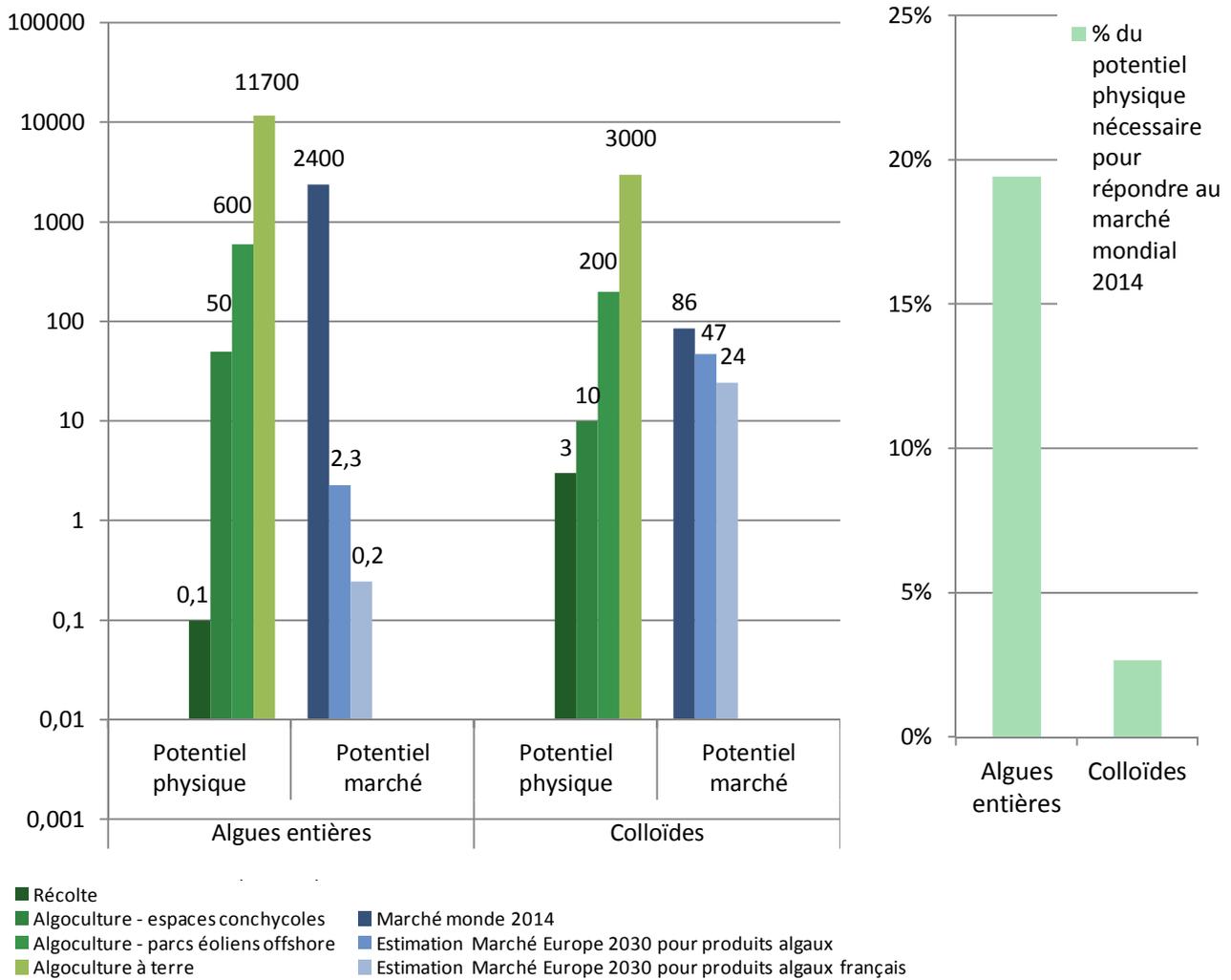


Figure 69 – Comparaison des potentiels physiques et des potentiels marchés pour les produits macro-algaux non énergétiques, en kt_{MS}/an (à gauche, échelle logarithmique) et % du potentiel physique nécessaire pour répondre au marché mondial actuel (à droite)

En se concentrant sur les espaces conchycoliques, potentiel le plus probable à 2030, il est possible de tripler la production actuelle de colloïdes ou de produire jusqu'à 50 kt d'algues sèches.

5 Conclusions générales sur le potentiel des filières algales françaises

Le potentiel des micro-algues

Un potentiel physique en biomasse substantiel...à modérer

Les quantités maximales de biomasse micro-algale susceptibles d'être produites sur le territoire français sont de l'ordre de plusieurs millions de tonnes de matière sèche par an (entre 7 et 53 Mt_{MS}/an selon les scénarios). Cette estimation peut donc varier de façon importante en fonction de chacune des hypothèses sélectionnées, que ce soit sur le procédé utilisé ou les conditions géoéconomiques (pentes des terrains, nécessité ou non de s'approvisionner en CO₂ et en nutriments auprès de sources industrielles).

Les productivités moyennes obtenues en optimisant le choix des espèces utilisées chaque mois en chaque point du territoire sont de 14,4 g/m²/jour pour les raceways et de 25,3 g/m²/jour pour les photobioréacteurs. Ces moyennes cachent de fortes hétérogénéités saisonnières mais aussi géographiques, les zones les plus productives étant les DOM-COM et les départements du pourtour méditerranéen, qui montrent respectivement des productivités massives de l'ordre de 75 % et 25 % supérieures à la moyenne.

Les hypothèses retenues pour prédire les productions de micro- et macro-algues à horizon 2030 semblent à certains égards plus conservatrices que celles qui ont été utilisées dans d'autres études. L'effet est d'autant plus marqué que ces critères ont été croisés pour identifier les zones propices à la culture de micro-algues (à moins de 5 km d'une source de CO₂ ET de nutriments ET sur des terrains peu pentus ET non déjà affectés à des usages jugés incompatibles). Les hypothèses biologiques retenues sont également nettement moins optimistes qu'un grand nombre de publications [47], qui décrivent souvent implicitement les meilleurs mois de l'année, pour des climats plus cléments. Ainsi, les rendements de conversion solaire en métropole sont compris entre 1,5 % et 3 %. Malgré ces hypothèses restrictives, mais qui se veulent réalistes, le potentiel de production algal français reste significatif, permettant de réaliser des productions d'un ordre de grandeur au-dessus de la plupart des marchés accessibles.

Les productivités annuelles sont plus faibles que les chiffres généralement annoncés notamment à cause de mois d'hiver très peu productifs et d'une certaine surchauffe des milieux de culture pendant les mois d'été, et ce bien que cet effet ait été en partie gommé dans l'étude grâce à l'utilisation de 5 espèces pouvant se relayer d'un mois à l'autre. Des développements devront être conduits pour mieux gérer les aspects thermiques des dispositifs de culture et réduire l'impact des oscillations thermiques sur la productivité. L'utilisation d'espèces plus tolérantes à des larges gammes de températures permettrait également d'améliorer les productivités.

La principale contrainte limitant le potentiel physique de production de biomasse micro-algale est l'usage des sols, la quasi-totalité des sols français étant déjà affectée à des usages ne permettant pas le développement de cette activité. Les hypothèses de disponibilité prises ici laissent néanmoins la place à plusieurs centaines de milliers d'hectares de culture au maximum (entre 150 et 500 000 suivant les contraintes sur la pente éligible, l'origine des intrants, etc.).

Ce potentiel pourrait par ailleurs évoluer à la hausse, dans la perspective d'une nouvelle vision de l'agriculture, si certaines productions de composés algaux à vocation alimentaire étaient partiellement réalisées sur des terrains agricoles. Ce point est d'autant plus important si l'on considère la production de micro-algues à la ferme couplée à de la méthanisation. Les calculs réalisés à partir des méthaniseurs répartis sur le sol français indiquent que le potentiel associé à ces sources ne constitue que 0,1 % du potentiel physique total, en grande partie du fait du manque de terrain de nature éligible dans les zones (de faible étendues pour ces petites sources) situées autour des méthaniseurs, pour la plupart « à la ferme ».

Un deuxième aspect important pourrait limiter ces estimations : les problèmes de contaminations par des organismes compétiteurs, prédateurs ou par des virus, non intégrés à la modélisation, induisent des pertes de production par rapport à la quantité théorique de l'ordre de 30 % à 50 %. Ce facteur externe, encore très mal maîtrisé est un réel frein au développement de la filière. Le problème est nettement plus prégnant pour des microorganismes pour lesquels les contaminants n'apparaissent pas de façon visible. Cet élément est en faveur des macro-algues, et dans une moindre mesure des photobioréacteurs (plus résistants aux contaminations mais nettement plus difficile à décontaminer).

De même, le constat de la forte sensibilité des productivités aux variations thermiques est directement associé à la question des besoins en eau. L'étude a fait l'hypothèse que l'eau de pluie pouvait être recyclée localement, ce qui conduit à une consommation moyenne de 10 m³ par tonne de masse sèche (50 litres d'eau par kg de biodiesel, ou 80 litres par kilo d'éthanol pour les macro-algues). Mais il existe une très forte variabilité sur le territoire, et le besoin en eau est 50% supérieur pour les départements du pourtour méditerranéen (où la productivité est augmentée de 25 %), régions plus facilement en stress hydrique. L'utilisation d'eau de mer ne semble possible que pour une frange marginale des territoires, ce qui signifie que l'essentiel de la production ne pourra se faire qu'à partir de ressources locales. Dans l'hypothèse d'une implantation des cultures autour des stations d'épuration, les flux liquides (10 m³/kg d'azote) sont à même d'assurer un apport suffisant en eau.

Pour la production de biocarburants 3G : un potentiel élevé, un enjeu sur les ressources en azote

Le potentiel physique de production de biocarburant est significatif : de l'ordre de 7 % de la consommation française de diesel (pour une production 100 % orientée vers la production de biodiesel) ou 15 % de la consommation en essence (pour une production 100 % orientée vers la production de bioéthanol).

Dans une optique de production de biocarburants, le développement effectif de cultures de micro-algues sur les terrains éligibles et l'atteinte du plein potentiel évalué dans cette étude implique de faire appel à d'autres sources de déchets azotés que les stations d'épuration, tels que des effluents industriels ou agricoles (non modélisés ici) ou la mise en place des stratégies de recyclage de l'azote comme un couplage avec des unités de méthanisation. L'étape de digestion anaérobie permet en effet le recyclage (au sein du digestat) d'une partie de l'azote (sous forme d'ammonium) et du phosphore (sous forme de phosphate). De plus, l'utilisation de l'azote issu des eaux usées est un point sur lequel nous manquons de recul technologique. Même si la faisabilité a été démontrée par de nombreuses études, les réalisations pratiques pour en cerner les limites sont encore rares. Il est certain que de nombreux développements seront nécessaires avant de pouvoir réellement mobiliser cet azote pour la culture de micro-algues.

La contrainte sur l'azote conduit à un modèle où les sites de production de micro-algues sont intégrés aux stations d'épuration, et sont pleinement impliqués dans le traitement de l'azote. De façon générale, se dessinent des logiques de recyclage local de l'azote et du carbone, au sein d'écosystèmes couplant auto et hétérotrophie. L'utilisation d'espèces marines peut poser problème dans ce contexte, car le sel est un inhibiteur de la digestion anaérobie. De façon plus générale, le traitement d'effluents salins en grande quantité est un vrai problème qui réduit considérablement la possibilité d'associer la production de micro-algues marines à une logique de traitement de l'eau.

Limiter le développement des micro-algues à vocation énergétique à la périphérie des sources de déchets azotés impacte également le choix des procédés de production. L'utilisation de technologies plus efficaces (photobioréacteur) conduit à des surfaces à mobiliser moindres, dans la périphérie des stations d'épuration pour utiliser les mêmes flux d'azote. Ce gain en densification du procédé (moindre surface et concentration algale plus forte) ne compensera sans doute pas les coûts d'investissement supérieurs d'un facteur dix par rapport aux raceways. Par ailleurs, l'utilisation de nutriments issus de STEP rendra la culture axénique⁴⁸ difficile, et pourrait compliquer le nettoyage des installations. L'utilisation de photobioréacteurs semble donc moins bien adaptée à un scénario de mobilisation de déchets azotés pour la production de biocarburants.

Le potentiel de production en hétérotrophie, s'il n'est que peu limité physiquement pour la production de molécules à haute valeur ajoutée, est d'un ordre de grandeur inférieur aux micro-algues autotrophes pour la production de biocarburants. Il est également plus incertain, les étapes pour passer d'une eau usée à la production de lipides issus de micro-algues hétérotrophes sont plus prospectives et nettement moins bien caractérisées dans la littérature. Par ailleurs, les techniques permettant de remobiliser l'azote dans les déchets pour assurer la croissance des algues (digestion anaérobie) contribuent à la transformation d'une majeure partie du carbone organique en CO₂ et CH₄. Il y a donc une compétition implicite entre les technologies de remobilisation du carbone et de l'azote organique et l'utilisation des deux simultanément est un verrou.

Pour la production de produits non-énergétiques

Si les marchés à moyenne et haute valeur ajoutée restent les plus accessibles à court terme, le développement des algues à grande échelle ne se fera que via le développement des applications biocarburants (ou une généralisation

⁴⁸ Dépourvue de contamination par d'autres micro-organismes pathogènes ou en compétition avec les algues

d'une alimentation animale par les algues). Sans cela, la production européenne sera plafonnée à quelques milliers de tonnes maximum du fait de contraintes marché fortes sur les applications à moyenne et haute valeur ajoutée.

Les schémas de co-valorisation de produits énergétiques et non-énergétiques, s'ils sont un bon moyen de rentabiliser les premières unités et de réduire les coûts par l'apprentissage et la standardisation, devront, dans l'hypothèse d'un déploiement massif des algues, laisser la place à des installations à vocation purement énergétique.

Le potentiel des macro-algues

Bien que le potentiel de récolte soit globalement plafonné aux tonnages actuels, le potentiel physique d'algoculture, aujourd'hui peu exploité, demeure très important.

Le premier frein à l'exploitation de ce potentiel est aujourd'hui d'ordre administratif (difficulté d'obtention de concessions maritimes) et la tendance est par conséquent à la récupération d'espaces de culture sur des concessions existantes.

Les espaces offrant le potentiel le plus direct, notamment en raison de synergies d'activités, sont les concessions conchylicoles. Les algues représentent notamment une source de diversification pour une activité ostréicole très impactée par la mortalité croissante des naissains d'huîtres. La culture de macro-algues sur 30 % de ces espaces permettrait à elle seule de générer plus de 50 000 tonnes de matière sèche supplémentaires (avec une productivité similaire à celle de *Saccharina*). Un couplage avec les futurs parcs éoliens offshore ouvrirait la porte à des surfaces plus importantes encore.

La culture de macro-algues à terre (en bassins ouverts), existante mais encore très peu répandue, a également été modélisée. Les macro-algues cultivées à terre conduisent à des productivités massiques sensiblement plus faibles que les micro-algues (inférieures d'environ 20% en masse sèche). Leur utilisation à des fins de biocarburant aboutit à des productivités énergétiques inférieures d'un facteur 5. Compte tenu des moindres coûts énergétiques de récolte et de séchage pour les macro-algues, et l'implication de procédés plus simples, les macro-algues constituent néanmoins une alternative pertinente aux micro-algues à moyen-terme. Un arbitrage entre les cultures à terre de micro-et macro-algues semble difficile sans une analyse économique comparative et au vu des incertitudes sur la levée de leurs verrous technologiques respectifs.

Du potentiel théorique à une réalité pour 2030

Même si l'activité de production de micro-algues devient viable sous certaines conditions, le potentiel proposé peut correspondre dans un certain nombre de situations à des productivités trop faibles pour qu'une rentabilité économique puisse être trouvée, si bien que certaines localisations n'ont pas de réel potentiel de rentabilité ou en tout cas pendant toute l'année. Le potentiel physique économiquement exploitable est donc inférieur au potentiel physique présenté ici, et dépendra des conditions technico-économiques minimales nécessaires à une rentabilité des projets.

Au-delà du potentiel théorique se pose la question du potentiel atteignable à horizon 2030. Un doublement annuel de la capacité française actuelle de production de micro-algues serait nécessaire pour atteindre les tonnages physiques correspondant au scénario le plus conservatif (S1A : production en raceway utilisant des intrants industriels). Ce scénario de montée en puissance semble démesurément optimiste ; un scénario encore optimiste d'une croissance annuelle de 50 % des tonnages de micro-algues produits ne permettrait d'atteindre en 2030 qu'environ 1 % du potentiel physique. Dans ce cadre et à horizon 15 ans, les scénarios de co-valorisation ont donc encore toute leur place.

Pour aller plus loin :

- La nécessité d'une analyse complémentaire centrée sur les coûts de production et la future compétitivité des produits algaux

La réponse à la question posée dans cette étude est relativement claire : oui, la France dispose de ressources physiques importantes et d'un tissu d'acteurs, tant dans la recherche que dans l'industrie, donnant la latitude nécessaire à la France pour prendre une place de choix sur le marché des algues et produire des volumes importants.

Si le potentiel est de taille, le niveau d'atteinte de ce potentiel à horizon 2030 est incertain, tant en biomasse qu'en termes de répartition entre les différents produits possibles. La vitesse de montée en puissance des espaces cultivés sera directement indexée sur la rentabilité économique des différentes voies de production algales et sur la compétitivité des différents produits algo-sourcés vis-à-vis des autres produits en compétition pour chaque marché.

Ici les contraintes économiques n'ont pu être abordées qu'indirectement, à travers :

- La nécessité pour les scénarios de production de biocarburants d'alimenter les cultures en CO₂ capté et en nutriments issus de stations d'épuration
- L'estimation des parts de marchés susceptibles d'être prises par les produits algaux à moyenne et haute valeur ajoutée, reposant en partie sur des éléments économiques comme les coûts des modes de production traditionnels, l'anticipation d'un premium associé à un produit bio-sourcé ou non, etc.

Bien que la faible maturité des technologies en jeu rende aujourd'hui difficile la réalisation d'évaluations économiques robustes, il est toutefois nécessaire de compléter les résultats de cette étude par un volet d'analyse de *business cases* avec études de sensibilité sur les différents paramètres et hypothèses afin de préciser les conditions qui feront la compétitivité ou non des produits algaux à horizon 2030 (réductions à viser en termes de coûts d'investissement, conditions de marché justifiant l'intérêt des produits algaux, etc.) et d'identifier les filières les plus susceptibles d'atteindre une rentabilité à l'horizon considéré.

Par exemple, l'atteinte du potentiel de culture de macro-algues en mer se heurtera probablement à la réalité économique. En effet, le coût d'une tonne de Laminaires aujourd'hui récoltées à partir de populations naturelles est estimé à approximativement 50 €, alors que le coût d'une tonne d'algues laminaires cultivée en mer revient à environ 1000 € [43]. Le coût de la main d'œuvre française est la principale raison de cet écart. Il est évident que le coût de production en Asie rend le marché des algues très compétitif, et c'est également pourquoi la production française, aujourd'hui basée sur les algues de récolte, ne fournit que 40 % de la consommation française et doit être complétée par ces importations. Les stratégies de développement s'appuieront vraisemblablement sur la qualité des algues cultivées pour trouver des relais sur des marchés à plus haute valeur ajoutée, comme ceux de la cosmétique [43], mais l'atteinte d'un potentiel de masse semble incertain dans ces conditions.

- Des besoins en R&D pour accéder à la maturité technico-économique

Les micro- et macro-algues présentent un potentiel certain pour les marchés pharmaceutiques, alimentaires et, à plus long terme, pour la chimie verte voire les biocarburants, et la France dispose des atouts physiques, scientifiques et industriels pour s'y positionner.

Pour réaliser ce potentiel, que ce soit pour les micro- ou les macro-algues, un effort de recherche important est encore nécessaire afin de lever les verrous sur l'ensemble de la chaîne de valeur : identification et sélection de souches plus performantes, meilleure connaissance du génome de ces organismes, recherche de techniques de culture et de récolte moins énergivores et moins coûteuses, mise au point de procédés de type bioraffinerie pour séparer efficacement les différents produits d'intérêt ou encore développement de méthodes pour se prémunir contre le développement de compétiteurs, pathogènes ou prédateurs. Les défis ne manquent pas.

L'effort de recherche engagé à travers le monde est conséquent (plusieurs milliards de dollars pour les micro-algues uniquement aux États-Unis au cours des dernières années, de nombreux projets de culture de macro-algues à grande échelle en Europe), et de nombreuses ruptures technologiques sont attendues, capables de faire baisser les coûts, améliorer les rendements énergétiques et plus globalement le bilan environnemental de ces solutions. Il apparaît que, pour ces deux filières, un modèle économique viable combinerait différentes voies de valorisation et services intégrés, via une approche de type bioraffinerie.

Alors que des macro-algues étaient récoltées dès le XIX^{ème} siècle et sont cultivées depuis plusieurs décennies, les micro-algues ont été et sont encore largement moins exploitées. La reprise des recherches pour les micro-algues, principalement sous l'impulsion d'une forte hausse du baril de pétrole en 2006, a déjà connu trois phases. Une première phase de type « bulle » où de nombreux acteurs ont investi un créneau qu'une analyse trop rapide semblait promettre à des débouchés lucratifs à très court terme. La R&D s'est repliée sur des consortia minimalistes, associant souvent un industriel à une équipe de recherche, mais le potentiel des micro-algues a continué à être largement sur-vendu ; le parti pris des startups qui visaient une commercialisation rapide, ou des équipes de recherche qui voyaient l'opportunité de faire financer leurs travaux a progressivement décrédibilisé une partie des acteurs du domaine. La bulle a finalement explosé au bout de cinq années, dans une phase de sélection, et seules les sociétés les plus solides ont survécu. Cette seconde phase a permis de prendre la mesure des enjeux et des échelles de temps nécessaires pour répondre aux différents marchés, depuis les molécules à haute valeur ajoutée jusqu'à l'énergie et la chimie biosourcée. La majorité des acteurs qui avaient annoncé des développements pour le marché de l'énergie se sont redirigés vers les applications nutrition ou santé. Plus récemment, une troisième phase s'est amorcée, où la R&D s'est inscrite plus sereinement dans des échelles de temps en accord avec les défis à relever.

En France, cette nouvelle dynamique s'est notamment traduite par la mise en place de l'Institut d'Excellence pour les Energies Décarbonées « Green Stars », soutenu par cent experts internationaux du domaine, et finalement labellisé en 2011 par le Commissariat Général à l'Investissement, après qu'un jury d'experts internationaux l'ait sélectionné. Cet institut permettait d'installer les recherches sur les micro-algues dans la durée, et surtout d'associer le monde académique et le tissu industriel autour de projets innovants. Le réseau d'experts pluridisciplinaires (la majorité des grands établissements publics de recherche étaient partenaires) et de plateformes innovantes, garantissait la cohérence nécessaire pour synchroniser et rationaliser les développements à l'échelle nationale. L'initiative a fait école, et des consortiums similaires sont en cours de montage dans d'autres pays (Allemagne, Royaume-Uni, etc.). L'annonce de l'arrêt du financement de cet IEED suite au retrait de certains industriels de l'énergie laisse à ce jour planer une incertitude sur le devenir de la filière micro-algues française, avec un risque de morcellement des efforts de recherche.

L'opération a réussi dans le domaine plus mature des macro-algues, où le projet IDEALG (Investissements d'Avenir, ANR), pour un budget global de 36 M€ sur 10 ans, réunit entreprises et chercheurs pour développer la filière des macro-algues en France (voir p75 §3.2.2.3).

- Une connaissance améliorée des impacts environnementaux

Au-delà des défis purement scientifiques et dans un contexte complexe, le développement de ces filières nécessite d'aborder également les aspects socio-économiques et environnementaux pour espérer susciter l'adhésion et produire durablement en anticipant les impacts d'un éventuel développement massif. Les difficultés liées à la gestion de l'eau devront notamment être prises en compte.

Cette étude démontre qu'il y a un potentiel réel pour les micro- et macro algues en France. Ce potentiel ne se concrétisera toutefois qu'au prix d'un effort de recherche et développement conséquent.

Bibliographie

- [1] ENEA Consulting, *Le potentiel des micro-algues*, Bioenergy International, Ed., 2011.
- [2] NREL, 2012.
- [3] Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie ; Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la forêt, "Expertise du projet de filière d'algoculture alimentaire en Bretagne," 2012.
- [4] Centre d'Etude et de Valorisation des Algues (CEVA), "Macro-algues, chiffres de la production," 2011.
- [5] DGCIS - Trimatec - Adebiotech, "Algues, filières du futur - Livre Turquoise," 2010.
- [6] Société Française des Antioxydants, "Polyphenols d'algues marines - minceur," 2013.
- [7] DBFZ, "Algae biorefinerie, material and energy use of algae," 2013.
- [8] MCD TECHNOLOGIES, INC., "Brochure de présentation des technologies MCD," 2013.
- [9] Y. Scharff, Axens, *Technology development within alternative fuels.*, 2012.
- [10] ALEOR, 2011.
- [11] Agence Nationale de la Recherche, "WinSeaFuel - Production de macroalgues en pleine mer pour une valorisation en biométhane et autres bioproduits," 2012.
- [12] National Petroleum Council (NPC), "Working Document of the NPC Future Transportation Fuels Study - Macroalgae (seaweeds)," 2012.
- [13] The Crown Estate, "Marine Estate Research Report - Product options for the processing of marine macroalgae," 2011.
- [14] University of Gothenburg & others, "Microalgae, a market analysis carried out as part of the Interreg KASK IVA project: Blue technology for Sustainable Innovations, "Blue Bio"," 2013.
- [15] Pulz & Gross, 2004.
- [16] Delrue, CEA, "Micro-algues et biocarburants de troisième génération," 2012.
- [17] Tractebel Consult & le Centre Universitaire de Biotechnologie Algale (CUBIA, Belgique), *Le marché mondial de la Spiruline.*, 2000.
- [18] International Energy Agency (IEA), "Algae, the Future for Bioenergy - summary and conclusions," 2010.
- [19] FAO, "Algae based biofuels, applications and co-products," 2010.
- [20] Société de Développement de l'Industrie Maricole (SODIM), "Etude d'opportunité des biotechnologies marines sur la production et l'utilisation des microalgues," 2006.
- [21] ENEA Consulting, "R&D international benchmark on microalgae cultivation - Confidential client," 2012.
- [22] Algal Biomass Organization, "Algal biofuels and federal policy: RFS2 and other policy issues," 2012.

- [23] US Congressional Research Service, "Algae's potential as a transportation biofuel," 2013.
- [24] Yuan-Kun Lee, Department of Microbiology, National University of Singapore, *Commercial production of microalgae in the Assia-Pacific rim*, Journal of Applied Phycology, Ed., 1997.
- [25] Third Algae World Australia, 2013.
- [26] ConsoGlobe, "Journée nationale de la spiruline, aliment aux 1000 vertus," 2012.
- [27] Fédération des Spiruliniers de France,, 2013.
- [28] Compétitivité.gouv.fr, "Production et valorisation des microalgues : une stratégie française en marche," 2010.
- [29] Bretagne Développement Innovation, "Etude de marché et d'opportunité économique relative au secteur de l'algue alimentaire en France, en Europe et à l'international," 2013.
- [30] Bretagne Développement Innovation (BDI), "Programme BREIZH'ALG - La filière de l'algue en Bretagne, une ambition à partager," 2012.
- [31] BDI, CEVA, Artesial consultants, Légumiers de la mer, CCI Rennes, "Les légumes de la mer: une mine d'opportunités pour un marché en croissance," 2012.
- [32] NetAlgae, "La filière des macro-algues en France," 2012.
- [33] Site web du projet Algolesko. [Online]. <http://www.algolesko.com/>
- [34] Chambre Syndicale des Algues, 2012.
- [35] ENEA Consulting, *Formation - Comprendre les enjeux et les technologies du biogaz.*, 2013.
- [36] ADEME - GrDF - Ernst & Young, *Etude de marché de la méthanisation et des valorisations du biogaz.*, 2010.
- [37] Murdoch University (Algae R&D Centre) & University of Western Australia (The School of Earth and Environment) , "Identification of the optimum sites for industrial-scale microalgae biofuel production in WA using a GIS model," 2012.
- [38] Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire, *Recensement Agricole 2010 - L'agriculture française en 2010.*, 2011.
- [39] FNTR - Fédération Nationale du Transport Routier, "Les chiffres de la consommation gazole en France," 2014.
- [40] Europaia - UFIP (Union Française des Industries Pétrolières), *Le livre blanc d'Europaia sur le raffinage européen et la situation française.*, 2010.
- [41] Selectra, *Le gaz naturel en chiffres.*, 2014.
- [42] Euroserv'ER, *Baromètre Biogaz.*, 2012.
- [43] Projet IDEALG – Station Biologique de Roscoff et Université Européenne de la Bretagne, "Entretien ENEA avec Monique RAS," 2013.
- [44] Broch, 2013.

- [45] E. Garcia, S. Joubaire, O. Marchal, A. Massimi, "Etat des lieux sur la problématique des algues vertes: connaissances et possibilités de valorisation," 2013.
- [46] Harris J. Bixler and Hans Porse, "A decade of change in the seaweed hydrocolloids industry," *Journal of applied Phycology*, vol. 23, pp. 321-335, 2011.
- [47] Wijffels et Barbosa,, 2010.
- [48] Département des pêches et de l'aquaculture de la FAO, "LA SITUATION MONDIALE DES PÊCHES ET DE L'AQUACULTURE," FAO, Rome, 2012.
- [49] Sheperd, "Demand perspectives on fishmeal and fishoil," Internation Fishmeal & fishoil organisation, 2011.
- [50] Frost & Sullivan, *Strategic Analysis of the European Marine and Algae Oil Omega-3 ngredients Market.*, 2010.
- [51] Trimatec, *Données Marché.*
- [52] GOED - Omega 3, *UPDATE ON THE OMEGA-3 MARKET.*, 2013.
- [53] Hans Kleivdal and Matilde S. Chauton, "Industrial production of marine microalgae as a source of EPA and DHA rich raw material in fish feed – Basis, knowledge status and possibilities," SINTEF, 2013.
- [54] Blue Biotechnology for Sustainable Innovations, "Blue Bio", *Micro Algae - Market analysis carried out as part of the Interreg KASK IVA project.*, 2013.
- [55] Eurostat. Milk and dairy productionstatistics. [Online]. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Milk_and_dairy_production_statistics
- [56] Cosmetic Valley. (2013) Chiffres clés de la Cosmetic Valley - Le marché mondial de la cosmétique. [Online]. <http://www.cosmetic-valley.com/page/presentation/chiffres-cles/>
- [57] European Advisory Services (EAS), "The use of substances with nutritional or physiological effect other than vitamins and minerals in food supplements," 2007.
- [58] Wisconsin State Journal. DNR ginseng sale nets nearly \$270,000. [Online]. http://host.madison.com/news/local/dnr-ginseng-sale-nets-nearly/article_44c8626d-e528-5547-a599-009082ee7e7f.html
- [59] Erik Heinrich. (2010) Inside China's garlic bubble. [Online]. http://money.cnn.com/2010/03/23/news/international/china_garlic_bubble.fortune/
- [60] www.algaeindustrymagazine.com. (2011) Development of a Spirulina Industry—Marketing. [Online]. <http://www.algaeindustrymagazine.com/special-report-spirulina-part-6/>
- [61] Pulz, *Photobioreactors for the production of useful microalgal biomass (cited in Micro Algae - market analysis carried out as part of the Interreg KASK IVA project, January 2013).*, 2009.
- [62] Philippe Stefanini, "Dires d'expert," 2014.
- [63] Transparency Market Research. (2013) Food Color Market is Expected to Reach USD 2,153.5 Million by 2018: Transparency Market Research. [Online]. <http://www.prweb.com/releases/2013/7/prweb10964581.htm>
- [64] Uubic-consulting. (2014) [Online]. <http://www.uubic-consulting.com/template/fs/documents/Flavors%20and%20Colorings/The-World-natural-coloring-agent->

[market.pdf](#)

- [65] Jane Byrne. (2011, Octobre) Nielsen poll indicates global preference for natural food colours. [Online]. <http://www.foodnavigator.com/Market-Trends/Nielsen-poll-indicates-global-preference-for-natural-food-colours>
- [66] Pauline Spolaore, Claire Joannis-Cassan, Elie Duran, and Arsène Isambert, "Commercial Applications of Microalgae," *JOURNAL OF BIOSCIENCE AND BIOENGINEERING*, vol. 101, no. 2, 2006.
- [67] AGRESTE. dossier. [Online]. http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_dossier11_salmonides.pdf
- [68] Nathan Atkinson, "The potential of microalgae meals in compound feeds for aquaculture," *International Aquafeed*, 2013.
- [69] "Demand and supply of feed ingredients for farmed fish and crustaceans," FAO, Rome, 2011.
- [70] FEDIOL, "SEEDS PRODUCTION, IMPORTS, EXPORTS AND CRUSHING - 2012 Annual Statistics," 2013.
- [71] Altech, "Global Feed Summary," 2013.
- [72] Revenu agricole. (2014) Évolution des cours. [Online]. http://www.revenuagricole.fr/focus-marches/cerealier/focus-produits/tourteau-colza-soja-tournesol-lin?cmcodecours=10006_0_10009
- [73] Observatoire des aliments - le porc. (2014) Observatoire des aliments - le porc. [Online]. <http://www.observatoire-des-aliments.fr/aliments/viandes/le-porc>
- [74] S Mokady, S Yannai, P Einav, and Z Berk, "Protein nutritive value of several microalgae species for young chickens and rats," *Algae biomass: production and use*, 1980.
- [75] M Yoshida and H Hoshii, "Nutritive value of Spirulina green algae for poultry feed.," *Japanese Poultry Science*, 1980.
- [76] Amos Richmond, *Handbook of Microalgal Culture.*: Blackwell Science, 2004.
- [77] FEFAC, "Feed & Food - Statistical Yearbook 2012," 2013.
- [78] Grand View Research. (2014, Janvier) Animal Feed additives Market. [Online]. <http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/animal-feed-additives-market>
- [79] Adebiotech., *Algues filière du futur.*: Livre Turquoise, 2011.
- [80] président du Club Bio-plastiques Christophe Doukhi-de Boissoudy. (2014, Février) Goodplanet. [Online]. <http://www.goodplanet.info/actualite/2014/02/27/le-bio-plastique-debouche-high-tech-ecolo-pour-les-agriculteurs/>
- [81] European Bioplastics. Facts & Figures Bioplastics. [Online]. http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2013/publications/EuBP_FactsFigures_bioplastics_2013.pdf
- [82] ICIS. (2010) Bioplastic development increases with new applications. [Online]. <http://www.icis.com/resources/news/2010/10/25/9402443/bioplastic-development-increases-with-new-applications/>
- [83] T.L. Chacon-Lee and G.E. Gonzalez-Marino, "Microalgae for "Healthy" Foods— Possibilities and challenges,"

*Comprehensive review in food science and food safety, 2012**.

- [84] Abd El Baky HH and El-Baroty GS, "Healthy Benefit of Microalgal Bioactive Substances," *Journal of Aquatic Science*, vol. 1, no. 1, pp. 11-23, 2013.
- [85] Virginie Mimouni, "The Potential of Microalgae for the Production of Bioactive Molecules of Pharmaceutical Interest ," *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 2012.
- [86] algue.alimentaire.confort.domicile.com, *La production et la consommation des algues alimentaires.*, 2011.
- [87] Planetoscope, *La consommation mondiale d'algues alimentaires.*, 2012.
- [88] NetAlgae, *Présentation de la filière des macro-algues par pays partenaire.*, 2012.
- [89] NetAlgae, *Macroalgae industry and management of resources in Norway.*
- [90] Ho & al., "Bioethanol production using carbohydrate-rich microalgae biomass as feedstock," 2012.
- [91] GrDF, "Biométhane de microalgues - Evaluation du potentiel de production en France aux horizons 2020 et 2050," 2013.
- [92] National Research Council (US) Chemical Sciences Roundtable., "Carbon Management: Implications for R&D in the Chemical Sciences and Technology: A Workshop Report to the Chemical Sciences Roundtable.," 2001.
- [93] Hosikian & al., "Chlorophyll Extraction from Microalgae: A Review on the Process Engineering Aspects," 2010.
- [94] Nobre & al., "A biorefinery from Nannochloropsis sp. microalga - extraction of oils and pigments. Production of biohydrogen from the leftover biomass.," 2012.
- [95] A. Bruhn (Aarhus University) et al., *Algae for biogas in the Central Denmark Region (2010-2013).*, 2012.
- [96] Spolaore, "Commercial applications of microalgae," 2006.
- [97] IJJANI-OSHUNGBOYE, Institute of Environmental Biotechnology Rhodes University, "Microalgae biomass as fermentation feedstock," 2011.
- [98] JP. Cadoret, O. Bernard, "La production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis," 2008.
- [99] Agricultural and Food Policy Center, "Economic and Financial Assessment of Algae Biofuels Technologies Developed by NAABB," 2013.
- [100] International Energy Agency (IEA), *Algae as a feedstock for biofuels : an assessment of the state of technology and opportunities.*, 2011.
- [101] OriginOil, "A breakthrough technology to transform algae into oil," 2010.
- [102] Muñoz-Tamayo et al, 2013.
- [103] Máirtín Walsh and Lucy Watson, "A Market Analysis towards the Further Development of Seaweed Aquaculture in Ireland.," BIM - Irish Sea Fisheries Board, 2011.
- [104] Carlsson et al., "Micro- and macro-algae : utility for industrial applications," 2007.

- [105] Premium Beauty News, "Numéro spécial Ingrédients cosmétiques," 2013.
- [106] J. Vandeputte, Pôle de Compétitivité Industries et Agro-ressources, "Les agro-tensioactifs," 2012.
- [107] CEVA. [Online]. <http://www.ceva.fr/fre/S-INFORMER/ALGUES-ALIMENTAIRES/Documents-Syntheses/France-Synthese-au-18-09-2012>
- [108] <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Chloroplaste/endosymbiose.htm>.
- [109] Ministère du Développement Durable, "Dossier de presse - Installation de 3000 MW d'éoliennes en mer," 2011.
- [110] Y. Lerat (CEVA), "Les algues spontanées, les algues cultivées et leurs utilisations," 2013.
- [111] IDEALG. (2014) L'utilisation des algues dans le monde. [Online]. <http://www.idealg.ueb.eu/macroAlgues/utilisation/>
- [112] Comité Professionnel du Pétrole (CPDP). 2011.
- [113] Lundquist et al.,, 2010.
- [114] ADEME, *Energies et matières renouvelables - Cogénération Biogaz*.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 149004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr