

# ÉVALUATION DU GISEMENT POTENTIEL DE RESSOURCES ALGALES POUR L'ÉNERGIE 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



---

**SYNTHESE**

## 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 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 CO<sub>2</sub>
- 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 CO<sub>2</sub>, 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

## SYNTHÈSE

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 et les tensions susceptibles d'en découler à court, moyen et long termes.

Dans cet environnement, les micro-algues (organismes photosynthétiques unicellulaires) et les macro-algues (organismes photosynthétiques multicellulaires aquatiques, généralement visibles à l'œil nu) apparaissent comme une solution attractive et trouvent des applications dans l'alimentation humaine et animale, l'énergie ou encore la chimie au sens large (pétrochimie, chimie fine, cosmétique, pharmaceutique).

Non seulement elles offrent un gisement de biomasse supplémentaire, sans créer de tension sur les marchés des matières premières alimentaires et avec une productivité surfacique supérieure aux plantes terrestres, mais les algues apportent aussi avec elles une diversité génétique et physiologique impressionnante ouvrant la porte à de nombreuses applications inédites.

### Panorama général de la situation actuelle

La production mondiale actuelle 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 et 3,3 milliards d'euros. Le premier marché en volume pour les micro-algues (74%) est celui de l'alimentation humaine, principalement en tant que complément alimentaire riche en protéines et oméga-3. Ce marché est porté par la culture de Spiruline, la plus cultivée au monde avec environ 5 kt<sub>MS</sub>/an<sup>1</sup>. La majorité de la production mondiale de micro-algues est située dans les pays asiatiques. En Europe, les micro-algues doivent passer une procédure relativement stricte d'homologation avant de pouvoir être commercialisées en alimentation humaine. Le premier producteur est l'Allemagne, avec environ 150 t<sub>MS</sub>/an. La France en produit quelques dizaines de tonnes (20 à 30 t<sub>MS</sub>/an environ, soit 0,2 % de la production mondiale).

La production mondiale actuelle de macro-algues a quant à elle atteint 16 Mt d'algues fraîches (environ 2,4 Mt<sub>MS</sub>/an) en 2012 pour une valeur de 5 milliards d'euros, soit un marché bien plus mature et conséquent en volume que celui des micro-algues. Ce marché est en croissance (+ 5 à 15 %/an depuis 10 ans), là encore porté par l'Asie (principal bassin de consommation en raison des habitudes alimentaires de sa population). La Chine en particulier a développé de très grandes installations d'aquaculture et réalise aujourd'hui les ¾ de la production mondiale. La France produit environ 100 kt/an d'algues fraîches (95 kt, soit un peu plus de 14 kt<sub>MS</sub> en 2012), ce qui la situe autour du 10<sup>e</sup> rang des pays producteurs, 2<sup>e</sup> en Europe derrière la Norvège. La part de la production française est donc supérieure pour les macro-algues mais reste bloquée à 0,6 % de la production mondiale, production plafonnée par l'utilisation de l'ensemble du potentiel de récolte d'algues sauvages présentes sur les côtes métropolitaines et, contrairement à la situation dominante dans le monde, une algoculture anecdotique. Le récolte d'algues sauvages, mode de production moins onéreux que l'algoculture, est en effet aujourd'hui le seul capable de concurrencer les coûts de production asiatiques sur des marchés autres qu'à haute valeur ajoutée. La production française de macro-algues est par ailleurs très largement orientée vers les hydrocolloïdes (à 90-95 %), marché dont l'Europe détient une part plutôt décroissante.

Si les algues (micro comme macro) se sont historiquement développées pour des applications alimentaires toujours dominantes aujourd'hui, l'intérêt pour les autres applications va aujourd'hui croissant et les besoins importants en R&D qui en découlent laissent aux États-Unis et à l'Europe l'opportunité d'y prendre une place plus importante.

La France, notamment, est l'un des premiers acteurs de la recherche amont dans le champ des micro-algues (1<sup>er</sup> rang pour les publications et 4<sup>ème</sup> rang mondial pour le dépôt de brevets en 2010) avec des laboratoires de recherche majeurs, des banques de souches algales de rang mondial et quelques plateformes technologiques. La France ne représente en revanche que 5 % des investissements sur les projets et fournit aujourd'hui une production industrielle anecdotique au niveau mondial, mettant en évidence le besoin d'améliorer et d'accélérer le transfert des connais-

---

<sup>1</sup> MS : matière sèche

sances scientifiques vers l'industrie. Sur les macro-algues, de l'innovation est également nécessaire pour trouver de nouveaux débouchés à valeur ajoutée sur lesquels la France pourrait se démarquer.

## **Le potentiel de production français : un potentiel physique substantiel... à modérer**

### **Présentation succincte de la méthodologie employée**

L'objectif premier de cette étude est d'évaluer le potentiel de la France en matière de production d'algues, tant en termes de biomasse que de produits algaux. L'objectif n'est donc pas de projeter et d'évaluer la compétitivité de chaque solution algale à 2030 mais bien, sur la base des ressources physiques disponibles, de l'analyse des marchés concernés et en considérant les solutions algales compétitives sur leurs marchés respectifs, d'estimer des ordres de grandeur réalistes de ce que la France pourrait produire au maximum **sans utiliser de terres agricoles**.

Le périmètre général de l'exercice est le suivant :

- Le périmètre géographique inclut l'ensemble du territoire français, métropole et DOM-COM.
- Les algues considérées incluent à la fois les micro-algues (autotrophes 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.

L'évaluation effectuée repose sur plusieurs principes généraux décrits ci-dessous.

**La modélisation de divers scénarios indépendants** : 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. Les surfaces éligibles à la production et la productivité même des unités de production d'algues dépendent 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 entièrement basée sur un mode de production donné et orientée préférentiellement vers un type de débouchés ou un autre. On distingue tout d'abord des scénarios autotrophes (algues puisant leur énergie de la lumière solaire, lors de la photosynthèse) et hétérotrophes (algues tirant leur énergie de substrats organiques). On distingue également des scénarios orientés « biocarburants » (culture adossée à des sources industrielles de carbone et de nutriments) et orientés vers des produits à « moyenne et haute valeur ajoutée » (sans contrainte particulière sur ces intrants)<sup>2</sup>. Enfin, chaque scénario autotrophe est modélisé avec deux systèmes de cultures (bassins ouverts type raceways et photobioréacteurs, correspondant aux variantes A et B des scénarios 1 et 2 indiqué ci-après). Les calculs ont été réalisés indépendamment pour 6 espèces de micro-algue (5 autotrophes, 1 hétérotrophe) et 2 macro-algues.

**Le Erreur ! Source du renvoi introuvable.** récapitule les différents scénarios modélisés ainsi que les données d'entrée utilisées pour chacun d'entre eux.

---

<sup>2</sup> Chaque scénario n'exclut pas la production d'autres produits en cas de co-valorisation de la biomasse, simplement la chaîne de production est conçue et orientée préférentiellement vers la production de l'un ou l'autre des débouchés (vers des biocarburants dans un cas, vers des produits à plus haute valeur ajoutée dans l'autre).

SCENA- RIO	TYPE D'ALGUES	ORIEN- TATION	Données climatiques	Usage des sols	Pentes	Dispo. CO <sub>2</sub> capté	Présence de STEP <sup>3</sup>
S1 A & B	Micro-algues Autotrophes	Biocarb.					
S2 A & B	Micro-algues Autotrophes	M&HVA					
S3	Micro-algues Hétérotrophes	Biocarb.					
S4	Macro-algues	M&HVA					

**Tableau 1 – Résumé des couches utilisées pour chacun des scénarios**

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 couplage dynamique « ensoleillement-température » sur des pas de temps de 6h, permettent une prise en compte réaliste de l'équilibre entre productivité en biomasse et accumulation de biomolécules.
- Une approche géographique prenant en compte, au-delà du climat, des 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, permettant d'aller au delà d'un potentiel purement climatique sans aucune réalité de terrain.

**La conversion des tonnages annuels maximaux de biomasse obtenus en tonnages annuels maximaux de produits** algaux, à travers, pour chaque produit : l'identification de la partie de l'algue ou biomolécule d'intérêt utilisée, la conversion de la productivité en biomasse en productivité en cette biomolécule, l'identification d'une chaîne d'extraction et/ou conversion type ce cette biomolécule et enfin l'application du ratio massique entre la biomolécule et le produit sur la chaîne de production type sélectionnée.

**Une confrontation de ce potentiel orienté « ressources » à la réalité des marchés présents et futurs**, 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.

Une analyse comparative de l'ensemble de cette approche avec l'état de l'art indique que la présente étude se distingue par un périmètre sensiblement plus large et plus complet que les autres études du même ordre, 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 un niveau de précision vraisemblablement inégalé pour une si large couverture géographique. 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.

<sup>3</sup> STEP : Station(s) d'épuration

## Le potentiel des micro-algues

### Potentiel physique de production annuelle de biomasse

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.

La Figure 2 fournit les résultats des 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).

On constate que les estimations peuvent varier d'un facteur 7 en fonction des hypothèses sur le procédé utilisé, et sur les conditions géo-économiques (pentes des terrains, nécessité ou non de s'approvisionner en CO<sub>2</sub> et en nutriments auprès de sources industrielles).

### Tonnage annuel en biomasse [Mt<sub>MS</sub>/an]

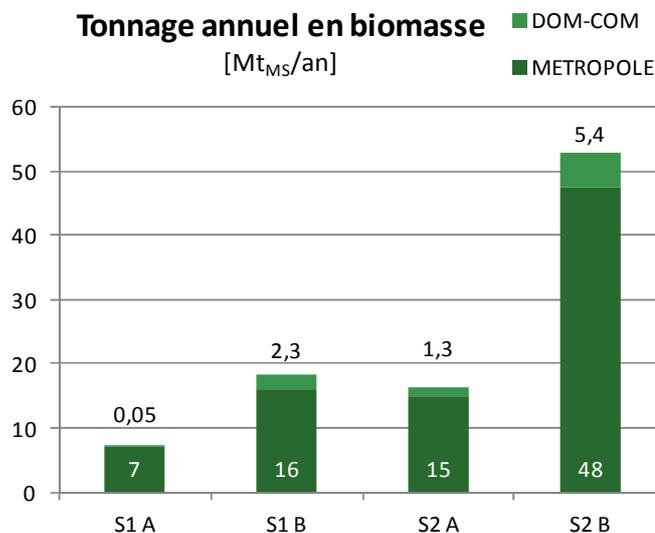


Figure 1 – Potentiel physique annuel de biomasse algale généré pour les scénarios autotrophes

Ces tonnages annuels sont la résultante de deux éléments : les productivités surfaciques d'une part, et les surfaces éligibles d'autre part.

### Productivités surfaciques

Les productivités surfaciques moyennes obtenues en optimisant le choix des espèces utilisées chaque mois en chaque point du territoire sont de 14,4 g/m<sup>2</sup>/jour pour les raceways et de 25,3 g/m<sup>2</sup>/jour pour les photobioréacteurs, soit des rendements de conversion solaire sont compris entre 1,5 % et 3 %. 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 massiques de l'ordre de 75 % et 25 % supérieures à la moyenne.

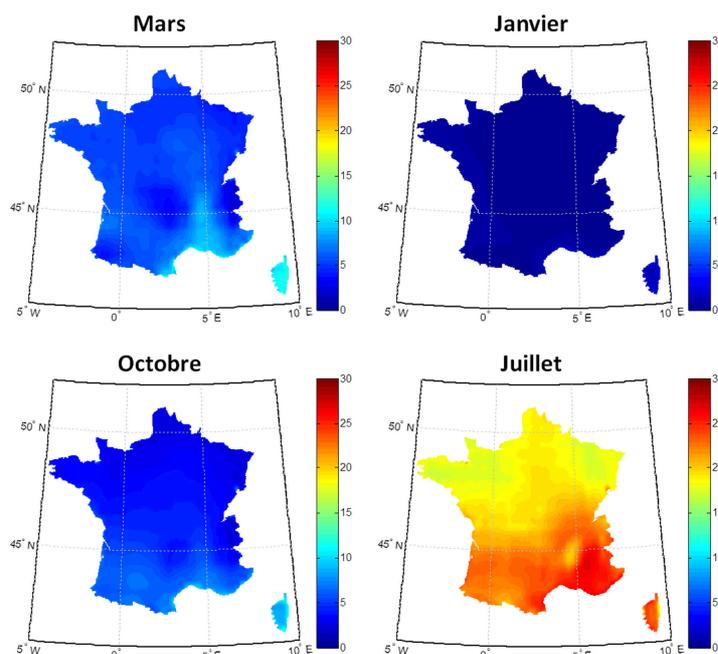


Figure 2 – Exemples de cartes de productivité (en g/m<sup>2</sup>/jour) obtenues à l'échelle nationale – Cas de *Nannochloropsis oculata* cultivée en raceway pour les mois de janvier, mars, juillet et octobre

Les hypothèses retenues pour prédire les productivités des micro-algues sont à certains égards plus conservatives que celles utilisées dans beaucoup de publications, qui décrivent souvent implicitement les meilleurs mois de l'année, pour des climats plus cléments.

En réalité, les modélisations affichent des mois d'hiver très peu productifs et une certaine surchauffe des milieux de culture pendant les mois d'été. 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 ces productivités.

Un 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 difficiles à décontaminer).

Par ailleurs, 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 m<sup>3</sup> par tonne de masse sèche (30 litres d'eau par litre de biodiesel, ou 50 litres par litre d'éthanol pour les micro-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 m<sup>3</sup>/kg d'azote) sont à même d'assurer un apport suffisant en eau.

### Surfaces éligibles à la culture des algues

En termes de surfaces éligibles à la culture des micro-algues, seuls 0,27% des terres françaises (soit un peu moins de 150 000 ha) sont 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 concentrée de CO<sub>2</sub> et une station d'épuration à proximité, et une utilisation actuelle du sol non réshibitoire pour cultiver des algues. Pour une production à plus haute valeur ajoutée en PBR, la surface allouable à la culture des algues est estimée à 0,94% du territoire (soit plus de 500 000 ha) en considérant des contraintes sur l'utilisation du sol identiques, mais une pente maximale élargie à 5% et aucune contrainte sur les sources de CO<sub>2</sub> et 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 quant à elles 18,4 millions d'ha.

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. Ce potentiel pourrait être réévalué à la hausse si la production de composés algaux, à vocation alimentaire en particulier, s'avérait réalisable 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.

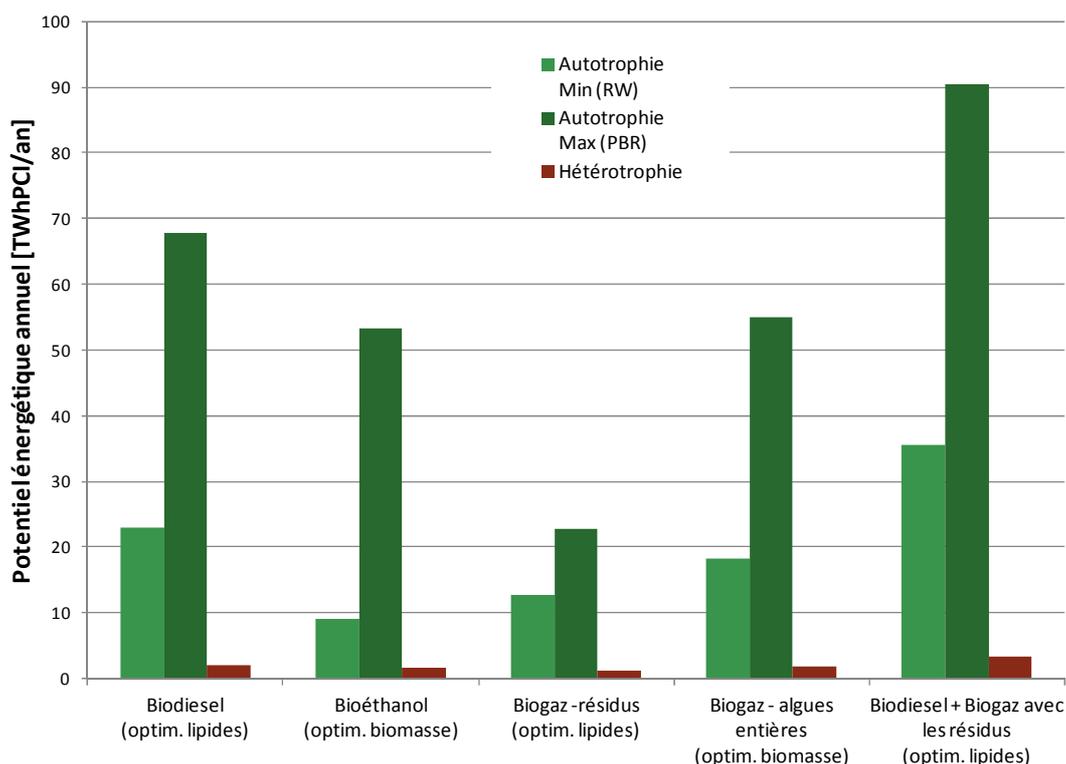
### Pour la production de biocarburants 3G : un potentiel élevé, un enjeu sur les ressources en azote

La Figure 3 fournit les potentiels métropolitains 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 CO<sub>2</sub> 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.

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<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> scénarios du graphique).



**Figure 3 – 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, le potentiel maximal de production de biodiesel est d'environ 23 TWh<sub>PCI</sub>/an soit 16 millions de barils par an, ce qui représente environ 7 % de la consommation métropolitaine annuelle de diesel et représenterait 9 % de cette même consommation projetée à 2030. Orienter l'ensemble de la biomasse produite vers une production de bioéthanol conduirait à un maximum de 9 TWh<sub>PCI</sub>/an pour 10 millions de barils par an, soit 16 % environ de la consommation actuelle d'essence et 20% de cette consommation projetée à 2030.

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 milliards de litres (environ 7 Mbbbl/an), dont plus de 60 % de diesel. La production maximale potentielle de biodiesel algal dans les DOM s'élève donc à 4% de leur consommation actuelle de diesel 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<sub>PCI</sub> par an, contre 18,4 TWh<sub>PCI</sub> en méthanisant l'ensemble de la biomasse<sup>4,5</sup>. A titre de comparaison, la consommation française de gaz naturel était de 514 TWh<sub>PCI</sub> en 2012. La production française de gaz est quant à elle d'environ 10 TWh<sub>PCI</sub> de gaz naturel (données 2012) et 4 TWh<sub>PCI</sub> de biogaz (données 2011 ; biogaz de décharge en provenance d'ISDND<sup>6</sup> à 78%).

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<sub>PCI</sub>/an en raceway.

<sup>4</sup> On considère un biogaz moyen à 70% de méthane

<sup>5</sup> 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.

<sup>6</sup> Installations de Stockage des Déchets Non Dangereux

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). Il est également possible de mettre en place des stratégies de recyclage de l'azote et du phosphore en couplant la production d'algues à des unités de méthanisation. La digestion anaérobie, en plus de fournir une source d'azote et de phosphore minéraux (respectivement sous forme d'ammonium et de phosphate présents dans le digestat), permet en effet de minéraliser une partie de l'azote et du phosphore organiques contenus dans les résidus d'algues après extraction des composés d'intérêt. Cependant, l'utilisation de l'azote issu des eaux usées pour la culture des algues est un point sur lequel les retours d'expériences en conditions réelles sont encore insuffisants. 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 pourrait 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 impacterait également le choix des procédés de production, en faveur des bassins ouverts. En effet, au-delà des enjeux de coût de production qui pénalisent déjà les PBR pour les applications carburant, l'utilisation d'eaux usées rend la culture axénique<sup>7</sup> difficile et pourrait compliquer davantage le nettoyage de ces types de réacteurs.

Enfin, 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 en prenant les STEP comme seule source de nutriments. La consommation de l'ensemble de la Demande Chimique en Oxygène contenue dans le débit total des presque 20 000 STEP de France métropolitaine conduirait en effet 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 mode de production est également plus incertain que l'utilisation d'algues autotrophes, les étapes pour passer d'une eau usée à la production de lipides issus de micro-algues hétérotrophes étant plus prospectives et nettement moins bien caractérisées dans la littérature.

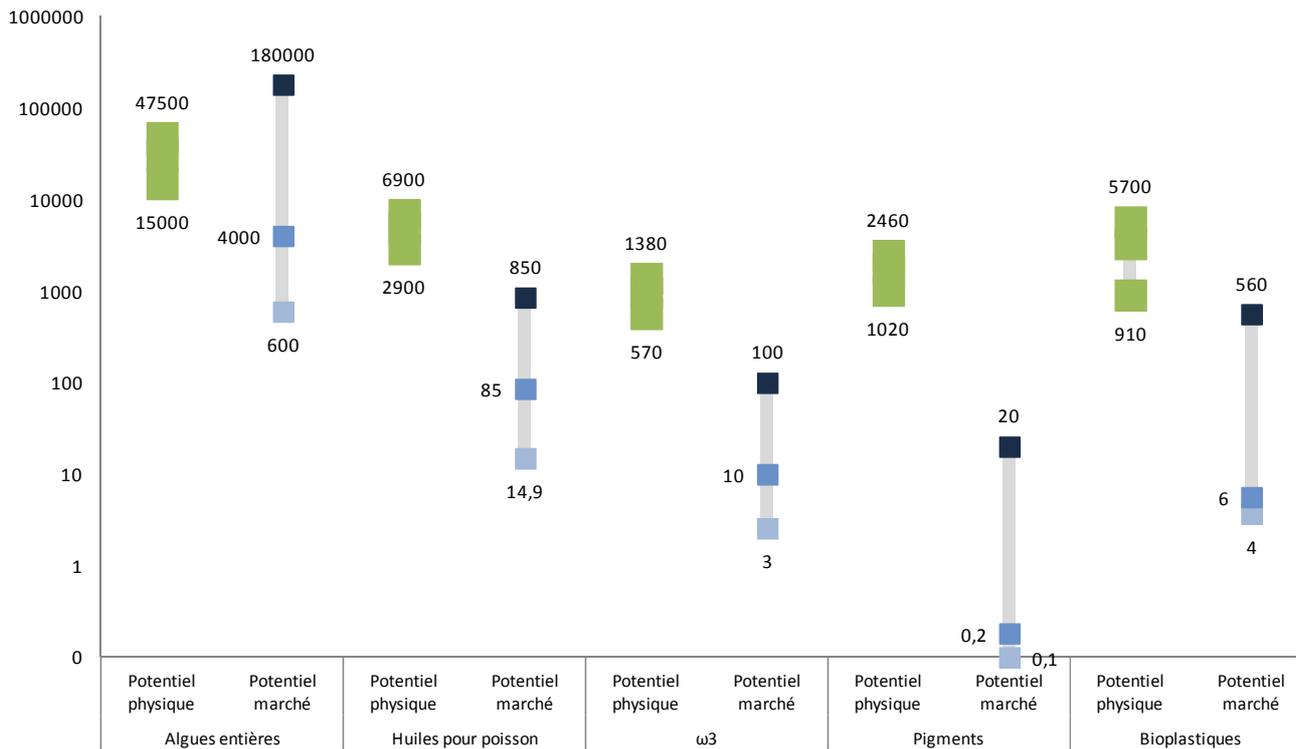
### **Pour la production de produits non-énergétiques**

La Figure 4 compare, pour l'ensemble des produits à vocation non-énergétique, les potentiels physiques de production à partir d'algues autotrophes et les tailles des marchés estimées pour ces produits.

Pour les potentiels physiques, la borne basse correspond à une production en RW, la borne haute à une production en PBR. Pour les potentiels marchés, le curseur haut correspond à la projection à 2030 de la taille du marché européen des produits conventionnels, le curseur moyen à la part de ce marché estimée pour les algues, et le curseur bas à la part de ce marché estimée pour les algues françaises.

---

<sup>7</sup> Dépourvue de contamination par d'autres micro-organismes pathogènes ou en compétition avec les algues



**Figure 4 – Comparaison des potentiels physiques autotrophes et des potentiels marchés pour les produits micro-algaux non énergétiques, en kt/an (échelle logarithmique)**

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). Cela reste vrai en imaginant un scénario de production répondant à l'ensemble de ces marchés de produits algaux MVA et HVA, qui ne mobiliserait que 5% du potentiel physique français de production micro-algale.

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 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.

## 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.

## Le potentiel des macro-algues

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 (cf. Tableau 2).

Source de la biomasse	Surfaces maximales mobilisables	Potentiel de production
	[ha]	[kt <sub>MS</sub> /an]
Récolte	-	14
Algoculture sur espaces conchyliques	1 350 <sup>8</sup>	50 <sup>9</sup>
Algoculture sur parcs éoliens offshore	16 000 <sup>10</sup>	560 <sup>11</sup>
Algoculture à terre (RW)	150 000	6 000 à 12 000
<b>TOTAL</b>	<b>167 350</b>	<b>6 000 à 13 000</b>

**Tableau 2 – Surfaces mobilisables et potentiels maximaux de production de biomasse macro-algale en récolte, algoculture en mer et algoculture à terre<sup>12</sup>**

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

Les espaces offrant le potentiel le plus direct, notamment en raison de synergies d'activités, sont les concessions conchyliques. Les algues représentent 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*), soit une hausse de 60 % par rapport à la production actuelle. Un couplage avec les futurs parcs éoliens offshore ouvrirait la porte à des surfaces bien 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 de 20% en masse sèche). Leur utilisation à des fins de biocarburant aboutit à des productivités énergétiques inférieures d'un facteur 5 en comparaison avec les micro-algues. Toutefois, les coûts énergétiques de récolte et de séchage sont moindres pour les macro-algues, et les procédés impliqués plus simples. Un arbitrage entre les cultures à terre de micro-algues et macro-algues semble difficile sans une analyse économique comparative et au vu des incertitudes sur la levée des verrous technologiques respectifs.

La conversion de ces potentiels en volumes de produits issus de macro-algues est donnée en Figure 5 pour les produits énergétiques et en Figure 6 pour les produits non-énergétiques.

Contrairement aux résultats équivalents affichés pour les micro-algues et 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 un 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-algaux.

<sup>8</sup> Hypothèse de 30% maximum des 4500 ha de concessions conchyliques

<sup>9</sup> Sur la base d'une productivité de 35 t<sub>MS</sub>/ha/an pour *Saccharina*

<sup>10</sup> Hypothèse de 30% maximum des 53 000 ha de concessions éolien offshore en cours

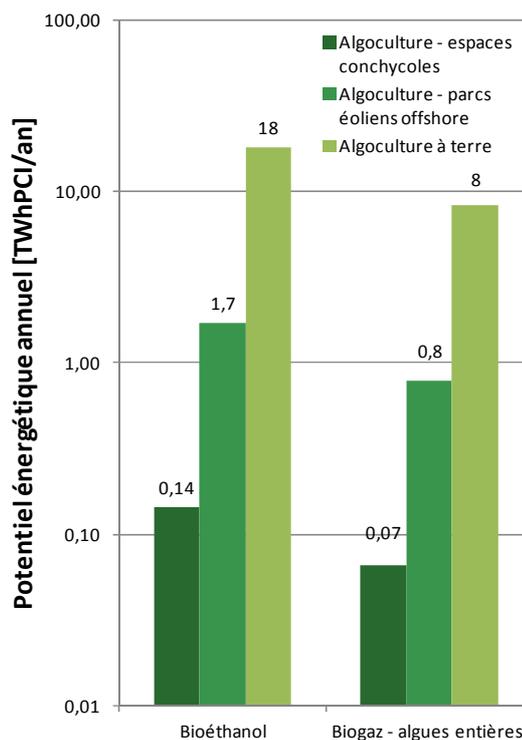
<sup>11</sup> Sur la base d'une productivité de 35 t<sub>MS</sub>/ha/an pour *Saccharina*

<sup>12</sup> Terres agricoles non éligibles

La Figure 5 montre que le potentiel physique de production de bioéthanol est de l'ordre de 140 GWh<sub>PCI</sub>/an en faisant appel à 30% des espaces conchylicoles, de 1,7 TWh<sub>PCI</sub>/an en mobilisant 30% des futurs parcs éolien offshore et 18 TWh<sub>PCI</sub>/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).

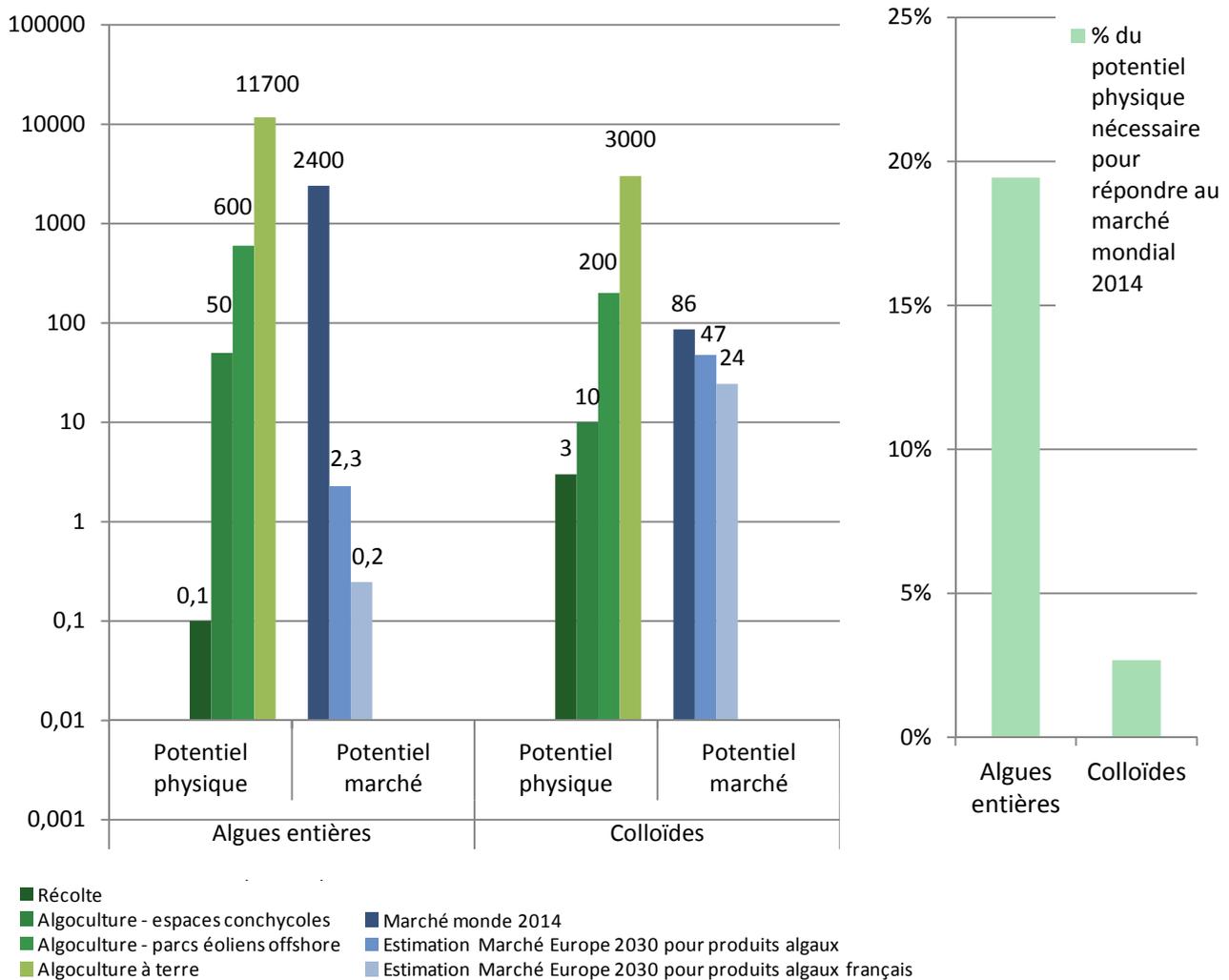
Les volumes totaux de bioéthanol en jeu sont importants (20 millions de barils/an environ) et couvriraient, cumulés sur les différents espaces, un peu plus de 30 % de la consommation française d'essence de 2011, ce qui est à la fois considérable et peu probable.

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<sub>PCI</sub>/an (environ 9 Wh<sub>PCI</sub>/an en mobilisant tous les espaces à terre comme en mer, contre un peu plus de 18 TWh<sub>PCI</sub>/an pour les micro-algues). Cela correspond à plus de 2 fois la production de biogaz française de 2011.



**Figure 5 – Potentiel annuel maximal de production de biocarburants 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 6, l'atteinte de respectivement 19 % (pour les algues aliments) et 3 % des potentiels physiques suffirait par conséquent à couvrir la consommation mondiale actuelle.



**Figure 6 – Comparaison des potentiels physiques et des potentiels marchés pour les produits macro-algaux non énergétiques, en kt<sub>MS</sub>/an (à gauche, échelle logarithmique) et % du potentiel physique nécessaire pour répondre au marché mondial actuel (à droite)**

En se concentrant sur les espaces conchylicoles, 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.

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

La réponse à la question posée dans cette étude est donc relativement claire : les micro- et macro-algues présentent un potentiel certain pour les marchés (agro-)alimentaires, la chimie verte voire les biocarburants et la France dispose à la fois de ressources physiques et d'un tissu d'acteurs, tant dans la recherche que dans l'industrie, lui donnant la latitude nécessaire pour prendre une place de choix sur le marché des algues et produire des volumes importants.

Si le potentiel est de taille, l'atteinte de ce potentiel à horizon 2030 est incertain, tant en termes de biomasse qu'en termes de répartition entre les différents produits possibles. Le développement des espaces cultivés sera directement lié à 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. Pour aller plus loin, une analyse complémentaire centrée sur les coûts de production et la future compétitivité des produits algaux est donc nécessaire.

Techniquement, de nombreuses chaînes de production peuvent déjà être mises en œuvre aujourd'hui, tant pour des produits à moyenne et haute valeur ajoutée que pour des carburants ; il est d'ores et déjà possible de convertir des algues en produits en utilisant uniquement des procédés technologiquement matures.

Toutefois parmi celles-ci, seules certaines chaînes 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 CO<sub>2</sub> 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 beta-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). 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, mais ces applications se heurtent encore 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 produire des volumes significatifs nécessaire à un quelconque impact 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<sup>e</sup> génération passera probablement, à moyen-long terme, par :

- Le développement de systèmes de culture hybrides, conciliant les bas coûts des systèmes ouverts avec les productivités volumiques supérieures des PBR liées au meilleur contrôle des conditions opératoires et à la 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 « traite (milking) » et des procédés 3G+ consistant à produire directement des biomolécules d'intérêt sans avoir même à récolter les algues.
- 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 CO<sub>2</sub> 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.

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 valorisés 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 conséquent un écosystème d'acteurs relativement diversifié et éclaté. Si les consortiums de recherche public-privés peuvent se montrer efficaces pour faire avancer la R&D et démarrer les projets pilotes, des acteurs capables d'intégrer ces compétences seront probablement nécessaires à moyen-long terme.

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 soutenu de recherche et développement.

## 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](http://www.ademe.fr)