

Le secteur des micro-algues en Méditerranée

Perspectives et contribution
au développement durable

Jean-Louis RASTOIN

Etude coordonnée par Kelly ROBIN



IPEMED

- INSTITUT DE PROSPECTIVE ÉCONOMIQUE DU MONDE MÉDITERRANÉEN -

PRÉFACE DU PROFESSEUR BEN OUADA

Poussées par la nécessité de subvenir aux besoins alimentaires en protéines, particulièrement dans le contexte de malnutrition qui a sévi à l'issue de la Deuxième Guerre mondiale, les premières exploitations industrielles des microalgues ciblaient, essentiellement, l'alimentation humaine.

Proches des bactéries par leur capacité à croître rapidement et des plantes par leur capacité de photosynthèse oxygénée, les microalgues offrent un atout de taille permettant de puiser des protéines de qualité dans le premier maillon de la chaîne alimentaire avec une forte efficacité. Mais, ceci n'a pas permis pour autant un grand essor du secteur des microalgues. Les raisons en sont multiples et ne relèvent pas uniquement de la technologie. Les contraintes économiques et sociales y contribuent pour une large part : il faudra certainement beaucoup d'efforts pour surmonter ces contraintes, notamment celles qui relèvent des habitudes alimentaires de la société méditerranéenne.

Le développement des technologies relatives aux photo-bioréacteurs et aux techniques d'extraction a donné à la production des microalgues une nouvelle orientation. Les microalgues sont dotées d'une plasticité métabolique exceptionnelle favorisant la synthèse de diverses molécules bioactives. Elles se prêtent aux méthodes des biotechnologies permettant de modéliser artificiellement et d'une manière dynamique leur métabolisme en forçant la synthèse de molécules d'intérêt potentiel. Une panoplie de substances bioactives de différentes natures et de propriétés diverses est ainsi produite avec un fort rendement. Ces substances ont permis à cette activité d'intégrer différents secteurs : nutraceutique, cosmétique, pharmaceutique, médical et également bioénergétique... La production de microalgues s'est donc beaucoup diversifiée, poussée par la tendance actuelle à substituer des produits naturels aux composants synthétiques, ou même à ceux d'origine animale, et par la volonté de disposer d'une source d'énergie renouvelable.

Malgré ce potentiel énorme, le secteur des microalgues reste émergent et encore loin d'atteindre une maturité suffisante pour être considéré comme un secteur économique à part entière, particulièrement au niveau de la Méditerranée.

Une analyse fine, rétrospective et prospective, de ce secteur constitue actuellement une nécessité afin de clarifier les orientations biotechnologiques et socio-économiques à promouvoir, dans une vision fixant le court, le moyen et le long terme.

L'étude actuelle finalisée par l'IPEMED est, dans ce contexte, d'un intérêt indubitable. D'une part, elle met en exergue les contraintes et les perspectives du développement du secteur des microalgues, englobant les aspects technologiques, économiques et sociaux et d'autre part, elle offre une assise de collaboration entre les pays du sud, riches en biodiversité et en superficies de terre non arables, et entre les pays de la rive nord, disposant de technologies avancées. Elle constitue certainement une vision futuriste pour permettre le développement du secteur dans un objectif de durabilité.

Pr. Hatem BEN OUADA

Directeur de Recherches en Biotechnologie Marine
Institut National des Sciences et Technologies de la Mer (INSTM), Monastir

PRÉFACE DU PROFESSEUR LAURENZ THOMSEN

Les microalgues sont considérées depuis longtemps comme une ressource intéressante au sein des matières premières renouvelables. En comparaison, elles contiennent des quantités importantes de protéines, d'huiles, de substances bioactives et se retrouvent, de ce fait, au croisement des branches industrielles de l'agroalimentaire, de la cosmétique, de la chimie, de la pharmacie et de la bioénergie. Cependant, il subsiste toujours quelques incertitudes quant à la rentabilité de leur production, et on constate de plus en plus que les algues produisent des ingrédients encore inconnus. De nouvelles lignes de produits peuvent être développées, en substitution à la chimie de synthèse, sachant que seulement environ une quinzaine des 50 000 espèces de microalgues connues sont utilisées. La rentabilité n'est cependant possible que grâce à une utilisation en cascade, par laquelle sont extraites tout d'abord des matières premières de haute qualité, avant que les résidus ne soient utilisés, par exemple, pour la production de biogaz ou de bioplastiques et qu'ensuite des nutriments soient recueillis à partir de la masse résiduaire.

À l'origine, le concept de valorisation résidait dans la culture d'algues pour la remédiation (traitement des eaux usées) et dans la transformation de la biomasse produite en carburant. Dans les années 1980, la recherche et développement ne s'est concentrée que sur les biocarburants. Puis, du fait de la baisse des prix du pétrole, la recherche publique a été presque totalement arrêtée. Parallèlement, au milieu des années 60, s'est développé au Japon un intérêt pour la production de compléments alimentaires, et ces travaux de R&D se sont étendus aux États-Unis, à Taiwan, à l'Australie, à la Chine et à d'autres pays. Depuis environ deux décennies, l'Europe investit également sur les microalgues à plus grande échelle, et de petits groupes de travail se sont constitués dans les différents pays de l'Union européenne, conduits par l'Italie, l'Espagne et la France. En 2009 a été créée l'EABA (European Algae Biomass Association), visant à favoriser davantage de coopération entre ses membres et à faire avancer le sujet aux niveaux national et international.

Toutes ces initiatives ont pour objectif de développer surtout les microalgues comme alternatives à la production de compléments alimentaires humains et animaux, de substances bioactives, de carburants et de mécanismes de réduction d'eaux résiduaires, et de développer des systèmes de production abordables. Jusqu'à aujourd'hui, les coûts de production restent trop élevés et les quantités de produites trop restreintes, mais les conditions de production évoluent. Du fait du changement climatique, nous observons une réduction du rendement des cultures sur beaucoup de surfaces agricoles qui jusqu'à présent étaient fertiles. La montée du niveau de la mer conduit à la salinisation des nappes phréatiques dans beaucoup de régions côtières, si bien que les microalgues issues de la mer constituent une véritable alternative aux plantes terrestres. Ceci est vrai en particulier pour la Méditerranée et la Chine, où une population en progression est exposée à une désertification croissante des terres agricoles. La Chine a déjà réagi en conséquence et mise de façon renforcée sur l'utilisation de matières premières biomarines. Non seulement les grandes fermes de production de macroalgues qui atteignent une surface de 70 km² ont un rôle important, mais la production de microalgues est également en forte augmentation.

En Europe et en Afrique du Nord, la région méditerranéenne offre à la culture d'algues des conditions environnementales idéales. La production peut avoir lieu non seulement à terre, mais aussi en mer lorsque celle-ci est pauvre en substances nutritives, donc translucide. Les températures clémentes, tout au long de l'année,

constituent également des atouts. Il n'est sûrement pas erroné de penser qu'une production de microalgues offre une opportunité exceptionnelle, particulièrement pour les pays méditerranéens, de créer des filières alimentaires d'un type nouveau, depuis la production jusqu'à la transformation en ingrédients à haute valeur ajoutée. Une initiative de l'UE en faveur de la formation de jeunes dans le domaine de l'aquaculture pourrait créer des perspectives économiques intéressantes pour ces pays. C'est pourquoi, j'ai un grand plaisir à préfacer l'étude de l'IPEMED, qui offre un éclairage sur ces perspectives et sur le potentiel de cette source de matières premières négligée jusqu'à présent, mais néanmoins importante, en espérant que dans dix ans, une nouvelle bioindustrie se sera déployée en Méditerranée.

Brême, le 30/05/2016

Dr. Laurenz Thomsen
Professor of Geosciences
Director of Ocean Lab Department of Physics and Earth Sciences
Jacobs University, Bremen

TABLE DES MATIÈRES

RESUME	7
SUMMARY	7
INTRODUCTION	8
LA MÉDITERRANÉE, ENTRE CRISES ET RÉSILIENCE : DONNÉES DE CADRAGE PHYSIQUES, DÉMOGRAPHIQUES ET MACROÉCONOMIQUES DE LA RÉGION MÉDITERRANÉENNE ET ENJEUX POSÉS PAR LES CRISES ALIMENTAIRE ET ENVIRONNEMENTALE AUJOURD'HUI ET À MOYEN TERME (2050)	10
Démographie et emploi : des complémentarités entre les rives à valoriser	10
Économie : une croissance à deux vitesses.....	12
Des ressources naturelles menacées	13
Un fort potentiel en énergie renouvelable	15
Menaces sur la biodiversité et pollutions multiples.....	15
Une insécurité alimentaire aggravée en méditerranée du Sud à l'horizon 2050	17
Perspectives méditerranéennes en termes de développement durable	18
PRINCIPALES APPLICATIONS DES MICROALGUES ET TECHNOLOGIES MOBILISABLES DANS UN OBJECTIF DE DÉVELOPPEMENT DURABLE	20
Qu'est-ce qu'une microalgue ?	20
Écosphères des microalgues.....	22
Le « portefeuille de produits » des microalgues : de très nombreuses applications	22
Les technologies de production : une filière complexe	25
Les marchés et les entreprises de microalgues aujourd'hui : prédominance de la spiruline.....	31
Les microalgues en Méditerranée.....	36
PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT DES MICROALGUES	43
Un exercice de futurologie : prospective mondiale 2100	43
Prospective Europe et France 2030	46
Éléments de prospective pour les pays méditerranéens.....	48
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	56
BIBLIOGRAPHIE	62
LISTE DES TABLEAUX, GRAPHIQUES, FIGURES ET ENCADRÉS	67
LISTE DES ANNEXES	68

RÉSUMÉ

Les microalgues, avec plusieurs milliers d'espèces potentiellement utilisables constituent un réservoir majeur de bioressources avec des applications multiples déjà parvenues au stade de la commercialisation (intrants pour l'agriculture, compléments pour l'alimentation humaine et animale, composants pour la cosmétique, molécules pour l'industrie pharmaceutique) ou en cours de développement pour des marchés à horizon proche (dépollution de l'air et de l'eau, biomatériaux) ou plus lointain (biocarburants). L'intérêt des microalgues réside d'une part, dans leur capacité à substituer du carbone fossile par du carbone renouvelable, tendance forte impulsée par les consommateurs et la société civile et d'autre part, dans leur exceptionnelle productivité surfacique permettant de conserver pour des usages prioritaires des ressources naturelles rares (terres agricoles et eau), en valorisant des énergies alternatives. Les principaux freins au développement du secteur tiennent à une faible compétitivité-prix des produits du fait d'investissements matériels et immatériels lourds. Dans les pays méditerranéens, ces atouts et ces contraintes génériques sont amplifiés par des conditions naturelles et socio-économiques bien identifiées (biodiversité, énergie solaire, potentiel de croissance économique d'une part, réchauffement climatique, insécurité alimentaire, déficit institutionnel d'autre part). Un modèle adapté de développement du secteur des microalgues doit donc être imaginé, avec une priorité à donner aux zones rurales périphériques. Ce modèle peut être qualifié de bioéconomie circulaire territorialisée dont le pivot serait constitué par des fermes microalgales.

SUMMARY

With several thousands of potentially useful species, micro-algae constitute a major reservoir of bioresources with multiple applications. While some of them are already being marketed (agricultural inputs, food supplements for humans and animals, cosmetics components, molecules for the pharmaceutical industry), others are being developed to be marketed in the short term (air and water clean up, biomaterials) or in the longer term (biofuels). The interest of micro-algae lies in their capacity to replace fossil carbon by renewable carbon, a strong trend initiated by consumers and the civil society. Besides, thanks to their exceptional surface productivity, rare natural resources can be saved for priority uses (farm land and water), via the development of alternative energies. The main obstacles to the development of this industry come from a low price competitiveness of products, as the industry requires major material and immaterial investments. In Mediterranean countries, well identified natural and socio-economic conditions enhance these assets and constraints (biodiversity, solar energy and economic growth potential on the one hand, versus global warming, food insecurity and institutional deficit on the other hand). Therefore, it is necessary to imagine an appropriate development model for the micro-algae industry, by giving priority to peripheral rural areas. This model can be qualified of territorialised circular bioeconomy, with micro-algae farms as a cornerstone.

INTRODUCTION

Le document final du Sommet des Nations Unies consacré, fin 2015, à l'adoption du programme de développement pour l'après-2015 explicite les enjeux qui sous-tendent les Objectifs de développement durable (ODD) 2015-2030 :

« Dans ces objectifs et cibles, nous définissons un projet extrêmement ambitieux et porteur de changement. Nous aspirons à un monde libéré de la pauvreté, de la faim, de la maladie et du besoin, où chacun puisse s'épanouir. Un monde libéré de la peur et de la violence » (Assemblée générale, 2015).

Les ODD mettent au premier plan des questions hautement sensibles dans les pays méditerranéens :

- Objectif 1. Éliminer la pauvreté sous toutes ses formes et partout dans le monde ;
- Objectif 2. Éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture durable ;
- Objectif 3. Permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge.

Or les contraintes multiples qui pèsent sur la région méditerranéenne constituent un lourd défi, y compris dans l'hypothèse souhaitée d'une situation enfin pacifiée : changement climatique compromettant le niveau des récoltes et multipliant les risques sanitaires ; dégradation environnementale sévère ; inégalités sociales prononcées ; compétitivité économique menacée par la concurrence internationale ; déficit de gouvernance.

La Conférence des parties sur le climat a été précédée par un Forum uniquement dédié à la Méditerranée (MEDCOP21), qui s'est tenu les 4 et 5 juin 2015 à Marseille. Dans ce cadre, des solutions innovantes visant à améliorer la résilience des villes et territoires méditerranéens au réchauffement climatique ont été proposées¹. L'une des contributions porte sur la mobilisation de la biomasse dont les microalgues constituent une composante importante.

En effet, la région méditerranéenne possède de solides atouts pour desserrer ces contraintes : vaste espace maritime et terrestre, biodiversité élevée, énergie solaire de haut niveau, potentiel de croissance économique, savoir-faire et culture millénaires constituant un patrimoine exceptionnel.

La mise en œuvre de ce potentiel appelle un immense effort d'innovation technologique et organisationnelle. De nombreuses pistes existent. Parmi celles-ci figurent les microalgues, avec de nombreux avantages, mais aussi des incertitudes sur les modèles technologiques et économiques à promouvoir.

1 – Agenda positif des solutions : http://www.medcop21.com/doc/MEDCOP21_solutions_agenda_positif.pdf

Ce document est organisé en 3 parties :

- Données de cadrage physiques, démographiques et macroéconomiques de la région et enjeux posés par les crises alimentaire et environnementale
- Principales applications des microalgues et technologies mobilisables dans un objectif de développement durable
- Perspectives de développement des microalgues

La méthodologie adoptée pour cette étude exploratoire repose sur une revue sélective des publications scientifiques et de vulgarisation disponibles sur Internet (cf. bibliographie), l'interrogation d'un panel d'experts (cf. liste en Annexe 1) à partir d'un questionnaire (Annexe 2), sur un traitement des informations à partir d'une évaluation SWOT et enfin sur des synthèses à caractère stratégique.

LA MÉDITERRANÉE, ENTRE CRISES ET RÉSILIENCE : DONNÉES DE CADRAGE PHYSIQUES, DÉMOGRAPHIQUES ET MACROÉCONOMIQUES DE LA RÉGION MÉDITERRANÉENNE ET ENJEUX POSÉS PAR LES CRISES ALIMENTAIRE ET ENVIRONNEMENTALE AUJOURD'HUI ET À MOYEN TERME (2050)

La région méditerranéenne stricto sensu se définit par les pays riverains de la mer Méditerranée, qui sont au nombre de 25² : 10 appartiennent à l'Union Européenne (UE), 11 sont des Pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée (PSEM) et 4 relèvent de la zone Adriatique hors UE.

D'autres approches existent, notamment géopolitique (UPM, Union pour la Méditerranée, créée en 2007, beaucoup plus large avec 43 pays, englobant certains pays arabes et africains non méditerranéens) ou économique (zone « ANMO », Afrique du Nord et Moyen-Orient, MENA en anglais, découpage géographique de la Banque mondiale).

Nous retiendrons ici la définition à 25 pays des géographes, sachant que la plupart des analyses de ce rapport sont applicables sur un espace plus vaste. Par simplification, nous considérerons deux groupes de pays dans la zone méditerranéenne ainsi définie : 11 PSEM et 14 pays « européens » (hors Monaco et Gibraltar, incluant les 4 pays des Balkans).

Or la région méditerranéenne est marquée par une triple fracture Nord/Sud en termes démographiques, économiques et sociaux.

Démographie et emploi : des complémentarités entre les rives à valoriser

Le bassin méditerranéen compte aujourd'hui un peu plus de 500 millions d'habitants, dont 41% sur les rives européennes. La dynamique démographique est différente selon la rive méditerranéenne, avec une faible progression de la population au Nord dans les 20 dernières années (+9%) et une croissance de 37% dans les PSEM (80 millions d'habitants supplémentaires).

TABEAU 1 : POPULATION DES PAYS RIVERAINS DE LA MÉDITERRANÉE

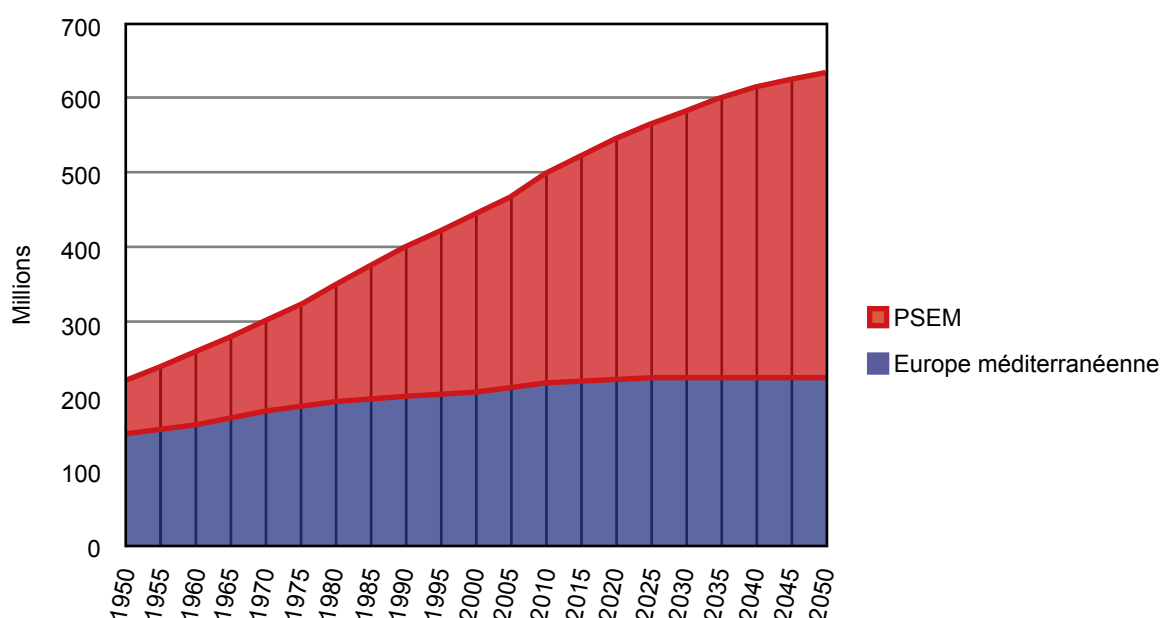
PAYS	POPULATION TOTALE (MILLIONS)	VARIATION
	2015	1995-2015
EUROPE MÉDITERRANÉENNE (16 PAYS)	222	9%
PSEM (11 PAYS)	301	37%
TOTAL PAYS MÉDITERRANÉENS (27 PAYS)	523	24%
MONDE	7 325	28%

Source: United Nations, 2014, World Urbanization Prospects, NY

2 – 27 pays, avec Monaco et Gibraltar pour les statistiques de population. Cf. liste des pays dans les tableaux Annexe 4.

Or, le déséquilibre démographique Nord/Sud constitue une complémentarité à considérer d'autant que l'écart entre les rives de la Méditerranée risque de se creuser à l'horizon 2050. D'après les projections (cf. Annexes 3 à 6), en un siècle, de 1950 à 2050, la population des pays méditerranéens aura presque triplé, pour atteindre 630 millions de personnes. L'Europe méditerranéenne voit sa croissance démographique fortement ralentie depuis le début du XXI^e siècle. Elle aura atteint son maximum en 2035 avec 227 millions d'habitants, puis déclinera jusqu'à 220 millions en 2050. Au contraire, la population des PSEM va augmenter de 19% entre 2015 et 2030 et de 36% entre 2015 et 2050, atteignant à cette date 410 millions de personnes, représentant les 2/3 de la population régionale.

GRAPHIQUE 1 : POPULATION DES PAYS MÉDITERRANÉENS, 1950-2050



Source: United Nations, 2014, World Urbanization Prospects, NY

Cette population sera vieillissante, au Nord comme au Sud, avec un important décalage : 18% de seniors (plus de 60 ans) en Afrique du Nord et au Moyen-Orient (région ANMO) en 2050, 37% dans l'Europe méditerranéenne, avec un déclin corrélatif des jeunes de 0 à 19 ans (respectivement 31% et 19%) et de la population active théorique de 20 à 59 ans (52% et 44%).

Cependant, la pression sur le marché de l'emploi va se maintenir. La population théorique en âge de travailler (20-59 ans) dans la région ANMO va augmenter de 66 millions de personnes entre 2015 et 2030 et de 71 millions entre 2030 et 2050. En d'autres termes, il faudra créer de 2016 à 2050, dans cette région, 137 millions d'emplois supplémentaires (hors prise en compte du chômage). Dans le même temps, la population active théorique diminuerait de 22 millions de personnes dans l'Europe méridionale.

L'urbanisation gagnera également du terrain au Nord et au Sud. Il y aura encore près de 150 millions de ruraux en 2050 dans les pays méditerranéens (108 millions dans les PSEM et 39 millions dans l'Europe méditerranéenne) et, si le scénario tendanciel se poursuivait avec sa concentration urbaine croissante (67% de la population totale en Méditerranée en 2015, 77% en 2050), il y aurait près de 110 millions d'urbains supplémentaires, principalement sur le littoral maritime. Un tel scénario est générateur de risques humains et environnementaux résultant de la concentration d'activités.

Le contraste est donc frappant entre un Nord stagnant, vieillissant et urbanisé et un Sud à forte natalité, jeune et encore largement rural : 112 millions de ruraux en 2015 dans les PSEM, un peu en dessous de 110 millions en 2050, soit le quart de la population. L'afflux de jeunes sur le marché du travail, alors que le chômage est déjà élevé pose de difficiles problèmes, et explique largement les migrations, amplifiées par les conflits militaires et politiques. Compte-tenu des tendances observées, les gisements d'emplois en zone rurale ne doivent pas être négligés et la politique d'industrialisation et d'urbanisation côtières revue (Rastoin *et al.*, 2012, Lorient *et al.*, 2013). Une approche « territorialisée » innovante est nécessaire pour mieux anticiper les évolutions futures en Méditerranée et exploiter le potentiel multifonctionnel des espaces ruraux constitue une alternative souhaitable.

Économie : une croissance à deux vitesses

Les disparités de richesse économique restent élevées entre l'Europe méditerranéenne et ses voisins du Sud : en 2014, les PIB totaux des deux zones étaient dans un rapport de 3,5 à 1. Les populations respectives amplifient les écarts de PIB par tête : 33 000 USD dans les pays méditerranéens de l'Europe, 6 400 dans les PSEM, soit un écart de 5 à 1. Néanmoins, les taux de croissance économique étant d'importance inverse (la croissance a été 3 fois plus importante entre 2004 et 2014 dans les PSEM), le dynamisme économique se trouve au Sud et les différences devraient à long terme s'atténuer.

TABEAU 2 : PIB ET CROISSANCE ÉCONOMIQUE CONTRASTÉS

ZONE	2014 (MDS USD)	VARIATION 2004-2014
UE	18 156	44%
EUROPE MÉDITERRANÉENNE	6 974	38%
PSEM	1 916	137%
PSEM/EUROPE MÉDIT.	27%	

Source: WB, database World Development Indicators, Last Updated: 02/17/2016

La zone méditerranéenne accuse un lourd déficit de son commerce extérieur : plus de 340 milliards de dollars en 2014, dont près de 200 pour les PSEM. Les exportations de l'Europe méditerranéenne représentent 4 fois celles des PSEM et les importations 3 fois. La croissance du commerce international est de plus en plus rapide dans les PSEM : 1,5 fois pour les exportations et 2 fois pour les importations. Cette situation est celle des pays émergents en phase de croissance économique, avec des besoins d'équipement et un dynamisme à l'exportation traduisant une bonne compétitivité.

TABLEAU 3 : COMMERCE EXTÉRIEUR DE MARCHANDISES DÉFICITAIRE, 2014

ZONES	EXPORTS	IMPORTS	SOLDE
MILLIARDS USD			
EUROPE MÉDITERRANÉENNE	1 605	1 746	(141)
PSEM	392	584	(192)
ÉVOLUTION 2014/2000 (x)			
EUROPE MÉDITERRANÉENNE	2,2	2,1	1,4
PSEM	3,3	3,8	5,6

Source : WTO Database, 2016

Il est impossible de faire des prévisions économiques à long terme du fait de la multiplicité des facteurs à prendre en compte. A moyen terme (5-10 ans), le climat d'insécurité risque de compromettre la croissance économique et d'amplifier les déficits commerciaux de la région. *A contrario*, la fin des conflits en cours confirmerait le statut de pays émergents des PSEM. Dans tous les scénarios, des mutations vers plus de durabilité sont indispensables et des innovations technologiques, notamment dans le secteur bioéconomique devront être mises en œuvre, ce qui donnerait des perspectives aux microalgues.

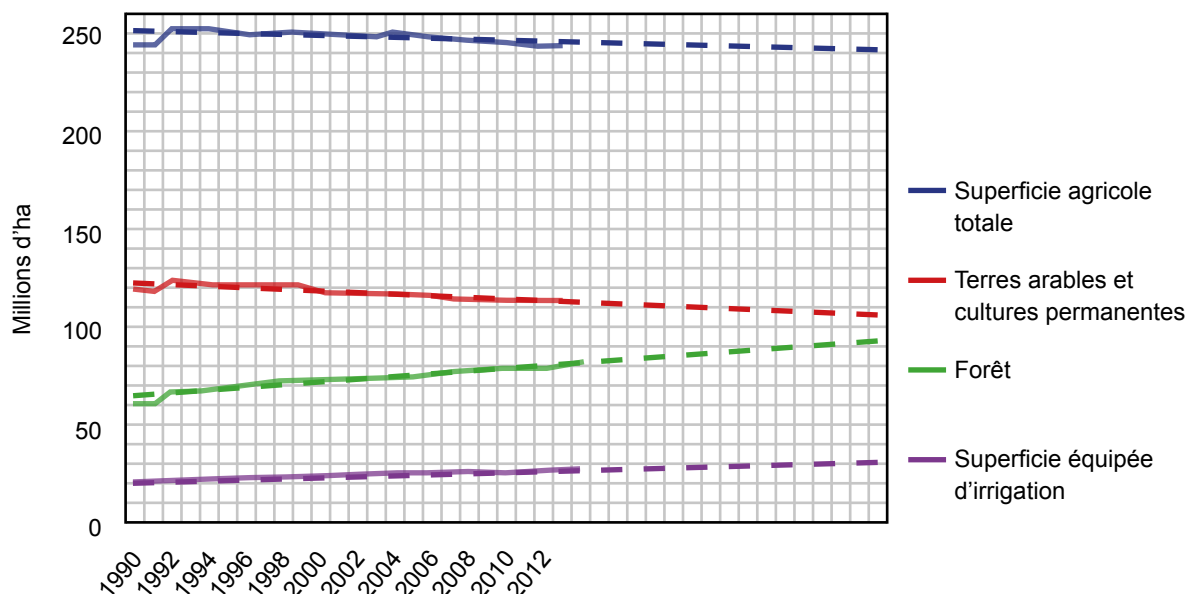
Des ressources naturelles menacées

La tendance à la réduction des utilisations agricoles des terres ne semble pas pouvoir être inversée à l'horizon 2030 (240 millions d'ha), par suite de la concurrence urbaine, industrielle et infrastructurelle, mais aussi de la progression de la forêt et des friches : près de 4 millions d'ha de terres agricoles pourraient être perdus (en quasi-totalité des cultures annuelles et de l'arboriculture). L'irrigation devrait plafonner à environ 31 millions d'ha en 2030 (pour 110 millions d'ha de terres arables). Seule la forêt progresserait (+ 13%, avec 90 millions d'ha en 2030)³.

Trois impératifs se profilent en matière de terres agricoles : limiter les changements d'usage défavorables à l'agriculture, étendre le réseau d'irrigation, substituer l'agriculture intensive par l'agro-sylvo-pastoralisme (agroécologie) afin de restaurer la fertilité des sols et d'assurer leur conservation.

3 – Pour des éléments plus complets sur la dynamique des ressources agricoles en Méditerranée, se référer à Rastoin, 2011

GRAPHIQUE 2 : SURFACES AGRICOLES ET FORESTIÈRES, PAYS MÉDITERRANÉENS, 1990-2013-2030



Source: Faostat, 07/03/2016

L'agriculture utilise 70% de l'eau disponible et la plupart des pays méditerranéens se trouvent en situation de déficit hydrique. La demande en eau dans les PSEM excède d'ores et déjà les ressources en eau conventionnelles potentielles (116%) et on relève dans ces pays une surexploitation des nappes phréatiques fossiles et renouvelables qui représentent 30% des utilisations d'eau au Maghreb et 40% en Syrie. Alors même que 22 millions de personnes dans les PSEM n'ont pas accès à l'eau potable (Bourlion, 2015), les ressources en eau devraient baisser de façon préoccupante dans la plupart des pays méditerranéens.

Selon une étude du *World Resources Institute* (WRI), 15 pays méditerranéens sur 22 seront classés à un niveau de stress hydrique « élevé » à « très élevé » à l'horizon 2030 totalisant 40 pays sur 158 dans le monde, dans un scénario de hausse moyenne des températures. Il en résultera une concurrence accrue entre les utilisations de l'eau (cf. Annexe 7). Entre 2000 et 2050, les disponibilités en eau dans les pays méditerranéens devraient baisser de 30 à 50% (Milano *et al.*, 2012).

TABLEAU 4 : EXPOSITION DES PAYS MÉDITERRANÉENS AU STRESS HYDRIQUE EN 2030

NIVEAU DE STRESS HYDRIQUE	SCORE	PAYS (RANG MONDIAL / 158 PAYS)
TRÈS ÉLEVÉ	4,10 à 4,99	ISRAËL (8), PALESTINE (9), LIBAN (12), JORDANIE (15), LIBYE (16), MAROC (18), MACÉDOINE (21), SYRIE (22), GRÈCE (27), TURQUIE (28)
ÉLEVÉ	3,51 à 3,93	ESPAGNE (31), ALGÉRIE (35), TUNISIE (36), ITALIE (39), MONACO (40)
MOYEN À ÉLEVÉ	2,15 à 2,93	ALBANIE (55), FRANCE (72)
FAIBLE À MOYEN	1,03 à 1,48	ÉGYPTE (72), MONTÉNÉGR0 (96)
FAIBLE	0,46 à 0,58	SLOVÉNIE (119), CROATIE (125), BOSNIE-HERZÉGOVINE (128)

Source : Luo *et al.*, 2015, WRI

Or, le stress hydrique, combiné à la baisse de fertilité des sols, à l'évolution de la physiologie des plantes et à l'effet des plantes et ravageurs invasifs induits par le changement climatique pourraient avoir un effet dépressif sur les rendements du blé de l'ordre de 12 à 54 % dans le cas de la France et de l'Égypte comme l'indique un rapport de la FAO. On peut donc anticiper d'ores-et-déjà une montée de l'insécurité alimentaire et nutritionnelle dans les pays méditerranéens, particulièrement les PSEM.

TABLEAU 5 : IMPACT POTENTIEL DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE RENDEMENT EN BLÉ

PAYS	RENDEMENT EN T/HA (MOY. 1986-90)	VARIATION DE RENDEMENT « MIN »	VARIATION DE RENDEMENT « MAX »
FRANCE	5,93	-12 %	-28 %
ÉGYPTE	3,79	-28 %	-54 %

Source : Bazzaz & Sombroek, Fao, 1997

Un fort potentiel en énergie renouvelable

Du fait de leur latitude, les pays méditerranéens bénéficient d'un ensoleillement élevé : entre 2 000 et 2 300 kWh/m² et par an sur les rives sud et est, 1 500 à 1 800 kWh/m² sur la rive nord, contre 1 000 à 1 200 en Europe septentrionale (cf. Annexe 8), ce qui constitue un atout indéniable pour la biomasse et donc les microalgues.

Plus largement, que ce soit pour les pays dotés de ressources pétrolières ou pour les autres, le potentiel photovoltaïque des pays méditerranéens est un facteur de développement économique à prendre en compte. En effet, la dépendance des pays méditerranéens aux combustibles fossiles et les enjeux induits par la transition énergétique et écologique nécessitent de nouvelles innovations économiques et technologiques.

Menaces sur la biodiversité et pollutions multiples

La Méditerranée est l'une des zones au monde les plus riches en biodiversité (Padilla, 2012) :

- Première (sur 8) au classement des Centres Vavilov de la diversité des cultures et des origines (Harlan 1995, cité par Padilla, 2012) ;
- 30 000 espèces de plantes dont plus de 13 000 endémiques (Plantlife International, 2010, Ibid) ;
- 10% des plantes connues et 18,4% des espèces de mammifères pour 1,6% des terres mondiales ;

- 8-9% des organismes marins connus pour 0,7% des eaux marines mondiales, avec 12 000 espèces décrites dont 25% d'endémique (Sundseth, 2009, Ibid) ;
- La grande diversité des milieux, une domestication précoce des plantes et animaux, des civilisations anciennes (Babylone, Égypte, Grèce, Rome) ont produit une diversité culturelle très riche (Heywood 1998, Ibid)

Cette biodiversité est menacée par les conflits d'usage de la terre entre espaces urbains (19 mégapoles de plus d'un million d'habitants et 85 villes de 300 000 à 1 million d'habitants), industriels et infrastructurels qui grignotent des dizaines de milliers d'ha agricoles (-3%, soit 9 millions d'ha dans les 20 dernières années, principalement au Nord) ou naturels par an. Les terres arables ne représentent que le tiers des terres agricoles dans les PSEM, les steppes, le plus souvent en zone semi-aride en occupant les 2/3 (35% de prairies dans l'UE). La forêt progresse partout (+16%, soit 10,5 millions d'ha en 20 ans). Les eaux intérieures sont limitées : 5,2 millions d'ha, soit à peine 1,1% du total mondial, contre 4,9% des terres et 2% des forêts.

TABEAU 6 : TERRES ET EAUX INTÉRIEURES EN MÉDITERRANÉE

MILLIONS HA	SUPERFICIE AGRICOLE		FORÊT		EAUX INTÉRIEURES	
	2013	ÉVOLUTION 1993-2013	2013	ÉVOLUTION 1993-2013	2013	ÉVOLUTION 1993-2013
EUROPE MÉDITERRANÉENNE	88	-10%	60	15%	2,1	-3%
PSEM	156	1%	21	18%	3,1	0%
PAYS MÉDITERRANÉENS	244	-3%	81	16%	5,2	-1%
PAYS MÉDIT./MONDE	4,9%		2,0%		1,1%	

Source : Faostat, 03/03/2016

D'autres menaces pèsent sur la biodiversité et l'environnement en Méditerranée : des modèles de production intensifs et prédateurs (aggravés par les apports de déchets industriels de 3 grands fleuves européens, Ebre, Pô et Rhône) ; une consommation en augmentation rapide du fait de la démographie amplifiée par des flux touristiques massifs (plus de 300 millions de visiteurs en 2012) ; le réchauffement climatique.

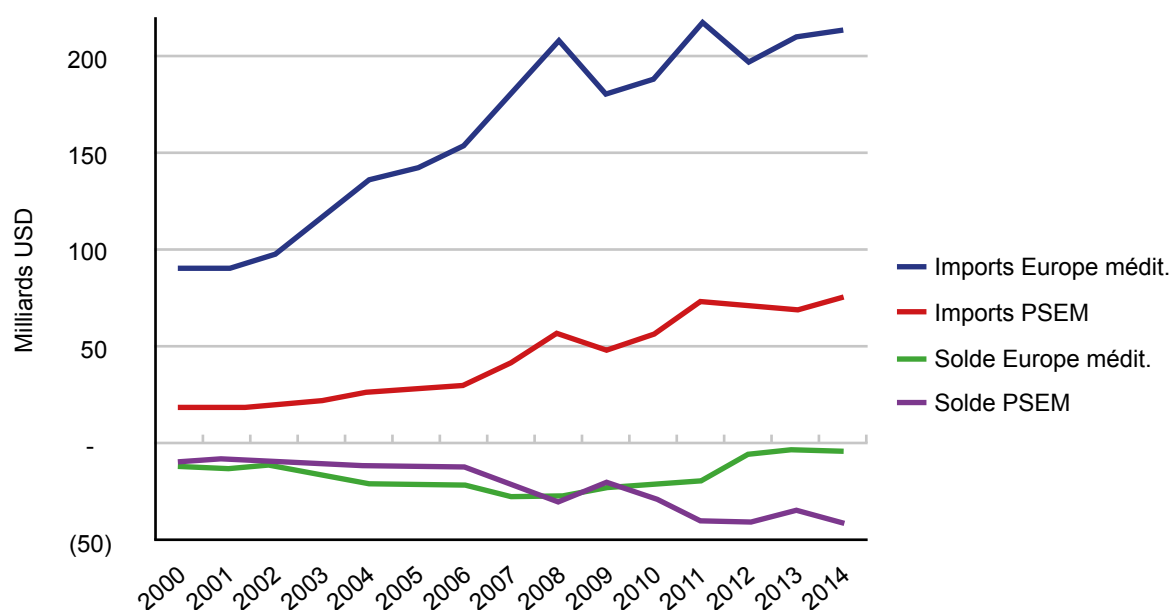
La Méditerranée serait la mer la plus polluée au monde. Les pollutions sont multiples : physiques (notamment minéralisation des sols augmentant la turbidité des eaux, micro et macro-déchets tels que les plastiques), chimiques (hydrocarbures, métaux lourds, molécules PCB, POP et HAP, antibiotiques, nitrates et phosphates, alors que les ¾ des zones habitées ne seraient pas reliées à des réseaux d'assainissement ou dotées de stations d'épuration des eaux usées peu efficaces) et biologiques (phytotoxines, espèces invasives) (Courteau, 2011).

Une insécurité alimentaire aggravée en méditerranée du Sud à l'horizon 2050

Le secteur agricole et agroalimentaire présente une situation préoccupante. Tous les pays sont déficitaires à l'exception de la France, de l'Espagne et de la Turquie, ce qui traduit un potentiel productif faible dans les autres pays et/ou des politiques publiques peu stimulantes, s'accompagnant d'importations massives de produits alimentaires (40% de la consommation dans les PSEM).

La dépendance externe ne cesse de s'aggraver. La facture alimentaire extérieure des pays méditerranéens s'élève à 212 milliards de dollars par an au Nord et 75 milliards au Sud. Le déficit se creuse de façon inquiétante dans les PSEM.

GRAPHIQUE 3 : COMMERCE EXTÉRIEUR AGRICOLE ET AGROALIMENTAIRE



Source: OMC, 2016

A cette fragilité économique s'ajoutent des problèmes de malnutrition (expansion rapide des maladies chroniques d'origine alimentaire telles que l'obésité, les pathologies cardio-vasculaires, certains cancers et le diabète de type 2), avec la disparition de la diète méditerranéenne au profit d'une alimentation industrielle de type occidental. De plus, la déprise agricole foncière, la raréfaction des ressources en eau et le changement climatique compromettent l'augmentation de la production locale.

Un exercice de prospective conduit par l'Inra et Pluriagri pour la région ANMO (Afrique du Nord & Moyen-Orient) montre une forte progression de l'insécurité alimentaire dans cette zone à l'horizon 2050 dans un scénario tendanciel prenant en compte les effets du changement climatique.

« L'évolution très défavorable des conditions de la production agricole au Maghreb se traduirait par une hausse très forte de sa dépendance aux importations, celles-ci passant de 54 % en 2008 à 68 % des utilisations domestiques d'ici 2050. La tendance à l'accroissement de la dépendance aux importations agricoles du Moyen-Orient et du Proche-Orient (...) est confirmée avec des coefficients de dépendance qui s'établiraient à 64 et 67 %, respectivement. Dans ce paysage assez sombre, la Turquie fait figure d'exception, les effets bénéfiques du changement climatique sur les surfaces cultivables y compensant les effets contraires sur les rendements en culture pluviale. Par rapport au scénario tendanciel hors changement climatique, la Turquie renforcerait un peu sa position d'exportateur net de produits agricoles » (Le Mouél et al., 2015).

Dans ces conditions critiques, les auteurs du rapport préconisent d'agir sur trois leviers en les combinant :

- L'innovation technique en agronomie et zootechnie (marge de progrès des rendements de l'ordre de 20%) ;
- La réduction des pertes et gaspillages (gisement de mobilisation supplémentaire de 10 à 20% de la production) ;
- La réhabilitation de la diète méditerranéenne (limitation de la consommation de produits animaux, de sucres et d'huiles végétales) (Ibid)

Avec l'insécurité alimentaire en Méditerranée, on est donc en présence d'un méta-problème, d'envergure macro-régionale, de caractère polysémique et systémique. La mobilisation de la biomasse, dans une perspective de durabilité constitue une piste très prometteuse de solution, et – au sein des bioressources –, les microalgues. Cependant, il faut être conscient que les microalgues ne peuvent prétendre à elles seules résoudre le problème de la sécurité alimentaire et que, par ailleurs, les différentes sources biomassiques sont concurrentes entre elles.

Perspectives méditerranéennes en termes de développement durable

Le bilan des potentialités et des contraintes des pays méditerranéens en termes de développement durable est donc contrasté.

TABLEAU 7 : BILAN DES OPPORTUNITÉS ET DES MENACES POUR UN DÉVELOPPEMENT DURABLE DE PAYS MÉDITERRANÉENS

CRITÈRES	OPPORTUNITÉS	MENACES
RESSOURCES HUMAINES	CROISSANCE DÉMOGRAPHIQUE, PYRAMIDE DES ÂGES AU SUD	CHÔMAGE, DÉFICIT D'INNOVATION ET D'ORGANISATION AU NORD ET AU SUD, VIEILLISSEMENT AU NORD
RESSOURCES NATURELLES	ÉNERGIE SOLAIRE, ESPACE MARITIME	RESSOURCES EN TERRES CULTIVABLES ET EN EAU INSUFFISANTES
ENVIRONNEMENT	BIODIVERSITÉ	POLLUTIONS MULTIPLES ET MASSIVES
ÉCONOMIE	CROISSANCE SOUTENUE AU SUD, ENTREPRENEURIAT	STAGNATION AU NORD
SOCIAL	CONVIVIALITÉ ET SOLIDARITÉ	INTÉGRISMES ET COMMUNAUTARISMES, INÉGALITÉS
PATRIMOINE	PAYSAGES, MONUMENTS, CULTURES	GLOBALISATION

Pour relever ces défis, une vision stratégique, une qualification des ressources humaines, des organisations plus solides, un renforcement des innovations constituent des préalables incontournables. Ensuite, un recensement de toutes les ressources naturelles doit être effectué et des plans ambitieux de développement durable établis. Parmi ces ressources, la biomasse dispose d'un potentiel exceptionnel, en particulier les microalgues dont la polyvalence des applications permet d'envisager des contributions originales à une sortie des crises énergétique, environnementale et alimentaire.

PRINCIPALES APPLICATIONS DES MICROALGUES ET TECHNOLOGIES MOBILISABLES DANS UN OBJECTIF DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Les microalgues figurent parmi les premières créatures vivantes, apparues voici environ 3,5 milliards d'années. Leur utilisation (et donc leur collecte) est très ancienne et probablement antérieure à l'agriculture du néolithique. Leur production est plus récente et leur spectre d'utilisation très large du fait de leur adaptation à tous les milieux. Il en résulte un large éventail de choix technologiques. Leur développement reste conditionné par des modèles économiques à ce jour non compétitifs dans leur univers concurrentiel, principalement du fait que nous ne sommes pas encore sortis de la « civilisation » du carbone fossile et de l'industrie lourde. Le faible prix des énergies non renouvelables (pétrole, gaz et charbon) et l'absence de politiques résolument orientées vers la durabilité retardent la transition énergétique, écologique et sociale. Notre entrée dans l'âge du développement durable devrait permettre aux microalgues de connaître une forte croissance, car elles sont souvent en phase avec les exigences de la bioéconomie⁴ : économie circulaire, décarbonée, décentralisée et donc territorialisée, en réseaux participatifs. De lourdes incertitudes pèsent cependant sur l'agenda de la transition : de profondes évolutions sont nécessaires en termes d'encadrement institutionnel (fiscalité du C fossile et du C organique, taxation des externalités négatives et subvention des externalités positives, réglementation des novel foods, etc.)

Qu'est-ce qu'une microalgue ?⁵

La phycologie ou étude des algues définit ces dernières comme des organismes photosynthétiques à chlorophylle, généralement associés aux milieux humides. La classification des algues est complexe et fait appel à de nombreux critères (morphologiques et métaboliques : cf. encadré) et reste en devenir du fait notamment des progrès de la génomique. Les « algues » constituent ainsi un vaste assemblage artificiel d'organismes phylogénétiquement éloignés (Deslandes, in Person, 2011). Nous retiendrons ici, en fonction du thème du rapport, la distinction selon la dimension physique (macroalgues et microalgues).

4 - Le concept de bioéconomie développé dans les années 1970 à partir des travaux de Nicholas Georgescu-Roegen désigne les activités productives qui mobilisent des ressources issues du monde vivant plutôt que de la chimie de synthèse (cf. infra des compléments).

5 - Pour une réponse combinant rigueur scientifique, talent pédagogique et humour, on consultera ouvrages de Claude Guéin (en particulier Guéin, 2013)

ENCADRÉ N°1 - CLASSIFICATION DES ALGUES : COMPLEXE ET ÉVOLUTIVE...

Les algues sont présentes dans les 2 lignées de la classification des organismes vivants de Carl Woese (1977) : procaryotes (à cellules dépourvues de noyau) et eucaryotes (à cellules contenant un noyau délimité par deux membranes). Les algues bleues ou cyanobactéries apparentées aux bactéries sont des procaryotes. Toutes les autres algues (la grande majorité) sont des eucaryotes que l'on regroupe en 2 de leurs 3 lignées :

- La lignée Unikonta ne comprend pas d'algues ;
- La lignée Excavata inclut les euglénophycées qui sont des algues vertes unicellulaires ;
- La 3^e lignée se subdivise en 2 branches :
 - Plantes (Plantae) qui comprend les embryophytes, les algues vertes, les algues rouges (Rhodophyta) ainsi que les glaucophytes (algues unicellulaires) ;
 - SAR (Straménopiles, Alvéolés et Rhizaires), avec les algues brun-doré (ou Ochrophyta, dont les algues brunes et les diatomées), des algues ciliées comme les dinophytes (Dinophyta), un groupe d'algues de couleur verte : les chlorarachniophycées (Chlorarachniophyceae), ainsi que des algues planctoniques unicellulaires marines, les haptophytes (Haptophyta) (de Reviers, 2002).

Les algues peuvent relever d'autres classifications :

- Selon le métabolisme (mode alimentaire) : organismes **autotrophes** (capables de réaliser la photosynthèse⁶, et donc de se nourrir de façon autonome à partir de la lumière, d'eau et de sels minéraux, dont font partie la quasi-totalité algues) et **hétérotrophes** (qui utilisent pour se développer de la matière organique obtenue à partir d'autres êtres vivants, dont font partie certaines algues marines de grande profondeur), ou encore mixitrophes (combinant les deux modes d'alimentation)
- Selon la morphologie (notamment la taille) : organismes multicellulaires (macroalgues) ou monocellulaires (microalgues)
- Selon le mode de reproduction : sexuée et/ou multiplication végétative.

Les microalgues se répartissent en plusieurs groupes, différenciés par leurs couleurs et leur structure. Les chercheurs estiment à plus de 200 000 le nombre d'espèces de microalgues à travers le monde, et certains auteurs avancent des chiffres de l'ordre du million, dont quelques milliers d'identifiées⁷. Toutefois, seules quelques dizaines d'espèces sont aujourd'hui exploitées (Sialve et Steyer, 2013).

6 – La chlorophylle permet aux algues et aux embryophytes de synthétiser de la matière vivante à partir du dioxyde de carbone (CO₂) et de l'énergie lumineuse (mécanisme de la photosynthèse), tout en rejetant du dioxygène (l'oxygène que nous respirons). Quelques algues peuvent cependant avoir perdu cette capacité à utiliser l'énergie lumineuse au cours de l'évolution, ou peuvent la perdre momentanément dans certaines conditions de vie (de Reviers, ibid)

7 – La base de données taxonomique internationale sur les algues AlgaeBase recense environ 143 000 noms d'espèces et de sous-espèces, dont une majorité de microalgues (Guiry & Guiry, 2016)

Parmi la cinquantaine d'espèces eucaryotes étudiées scientifiquement, et la vingtaine utilisée, on peut mentionner (cf. Annexe 9) :

- Les Diatomées (contenant de la silice et formant environ 90 % du plancton marin : *Skeletonema*, *Thalassiosira*, *Phaeodactylum*, *Chaetoceros*) ;
- Les Flagellées (*Isochrysis*, *Monochrysis*, *Dunaliella*) ;
- Les Chlorophycées (*Chlorella*, *Scenedesmus*) ;
- Les Chrysophycées.

Les Cyanophycées (microalgues bleues, le groupe le plus ancien sur Terre, probablement 3,5 milliards d'années, dont la *Spirulina*) sont à considérer à part, puisque ce sont des organismes procaryotes (bactéries), comme indiqué dans l'encadré ci-dessus.

Écosphères des microalgues

En raison de leur métabolisme, les algues autotrophes ne peuvent occuper que des niches écologiques permettant l'accès à la lumière (même s'il peut exister un stade non photosynthétique) (Ghobara et al., 2015). Pour le milieu marin qui renferme une large proportion des algues, il s'agit de la zone du plateau continental (moins de 100 m de profondeur, voire beaucoup moins selon la turbidité des eaux). Les microalgues sont donc limitées à la frange littorale et à la couche photique en eau libre. La vie des algues contribue à l'équilibre biosphérique, particulièrement en zone côtière riche en sels nutritifs (« bloom » phytoplanctonique). En zone océanique, dont les surfaces sont considérables, la richesse en plancton végétal est conditionnée par la remontée d'eaux profondes riches en nutriments (Deslandes, *ibid*). Les microalgues hétérotrophes et mixotrophes sont également présentes en eaux saumâtres (lagunes) et douces et, de manière plus marginale, sur les roches, les arbres et les animaux en mode symbiotique.

L'artificialisation de leur milieu permet d'étendre à l'ensemble des sites, aqueux et secs, leur production.

Le « portefeuille de produits » des microalgues : de très nombreuses applications

L'arbre de production des microalgues est chargé de fruits : les microalgues peuvent en effet être valorisées dans des domaines très variés tels que (Spolaore et al., 2006, Priyadarshani and Rath, 2012, Bougaran et Saint-Jean, 2014, Lerat et al., 2014) :

- **L'agriculture** : intrants pour l'agriculture biologique et l'agroécologie (fertilisants et traitements sanitaires des plantes et des animaux par biomimétisme : stimulateurs de défenses naturelles et phytohormones) ;

- **La nutrition humaine** : consommation directe des algues ou extraction de composants additifs (pigments colorants : caroténoïdes, et pigments bleu, rouge, jaune et vert ; texturants ; arômes ; corps gras) ;
- **La phytopharmacie humaine et animale** (pigments, acides aminés essentiels ; molécules d'intérêt anti-oxydant : catalase, polyphénols, tocophérols ; antibactériens pouvant se substituer dans certains cas aux antibiotiques, médicaments de prophylaxie en nutrition : acides gras insaturés, ω_3 et ω_6 ; anti-inflammatoires et anti-mutagènes ; restauration de la résistance cellulaire au cancer ; activité anti-angiomatique ; pratiquement toutes les vitamines A, B1, B6, B12, C, E ; prophylaxie en neurologie et ophtalmologie) (Mimouni et al., 2012 ; Buono et al., 2014) ;
- **L'alimentation animale** : aquaculture (poissons et coquillages, unique source alimentaire pour les éclosiers et intérêt pour le contrôle de la toxicité), animaux d'élevage et animaux de compagnie (pet foods), comme source de protéines (en substitution aux farines de poissons qui constituent un prélèvement minier sur la ressource pélagique) et/ou de compléments nutritifs ;
- **La cosmétique** : de nombreux produits comportent, dans leurs formulations, des ingrédients issus de microalgues ;
- **La production d'énergie** : algocarburants diesel principalement, mais également éthanol et biogaz (en utilisant les microalgues comme intrants en méthanisation) ;
- **Les matériaux biosourcés** : bioplastiques algaux, adjuvants pour les BTP (béton et bitume, matériaux de construction), adhésifs, polysaccharides, polyesters et hydroxyacides ;
- **La dépollution (ou bioremédiation)** : assainissement, et gestion des déchets industriels et organiques en zones urbaines et rurales (gaz d'usines et station d'épuration des eaux usées - STEP) (Pedroni et al., 2001).

TABLEAU 8 : COMPOSITION DES MICROALGUES « CONNUES »

ÉLÉMENT	TENEUR EN % MS*	REMARQUES
LIPIDES	5 à 40	JUSQU'À 70 %
PROTIDES	15 à 65	ACIDES AMINÉS PROCHES DE CEUX DU SOJA
GLUCIDES	10 à 50	POLYSACCHARIDES (AMIDON) ET MONOSACCHARIDES (GLUCOSE)
PIGMENTS	0,5 à 1,5	CAROTÉNOÏDES : JUSQU'À 14% CHEZ DUNALIELLA SALINA

* Matière sèche. Un effluent algal ne contient que 0,1 à 0,3% de MS
Source : Kerlero de Rosbo et Bernard, Ademe, 2015

Pour chaque application, une ou plusieurs espèces de microalgues sont sélectionnées en fonction de leurs performances (par exemple spiruline ou chlorelle en complément nutritionnel humain grâce à leur richesse en protéines et oligoéléments), comme le montre le tableau suivant.

TABLEAU 9 : VALORISATION DES MICROALGUES : UN LARGE SPECTRE D'APPLICATIONS

PROPRIÉTÉS\UTILISATION	ALIMENTATION HUMAINE ET ANIMALE	ALICAMENTS ET COSMÉTIQUE	AGRICULTURE, BIOCARBURANTS ET DÉPOLLUTION
NATURE	COMPOSANTS ALIMENTAIRES (PROTÉINES)	INGRÉDIENTS ET EXTRAITS	GESTION ENVIRONNEMENTALE
FORMULATION	CONSERVATION EN PÂTE, SURGELÉ OU DÉSHYDRATÉ	EXTRACTION SUPER-CRITIQUE, SOLVANTS VERTS	INOCULATION DE FERTILISANTS
ESPÈCES	SPIRULINA, CHLORELLA, DUNALIELLA	ASTAXANTHIN, BETA-CAROTÈNE	NOMBREUSES ESPÈCES POTENTIELLEMENT EXPLOITABLES
ORIGINE	AQUACULTURE (EUROPE, 1997)	EXTRAITS DE PLANCTON	PRESSION SOCIALE (DÉVELOPPEMENT DURABLE)

Source: Verdelho Vieira, 2014

Les avantages des produits issus des microalgues par rapport aux autres sources biomassiques (forêt, cultures annuelles à haut rendement comme la canne de Provence, etc.) sont nombreux (Kerlero de Rosbo et Bernard, Ademe, 2015) :

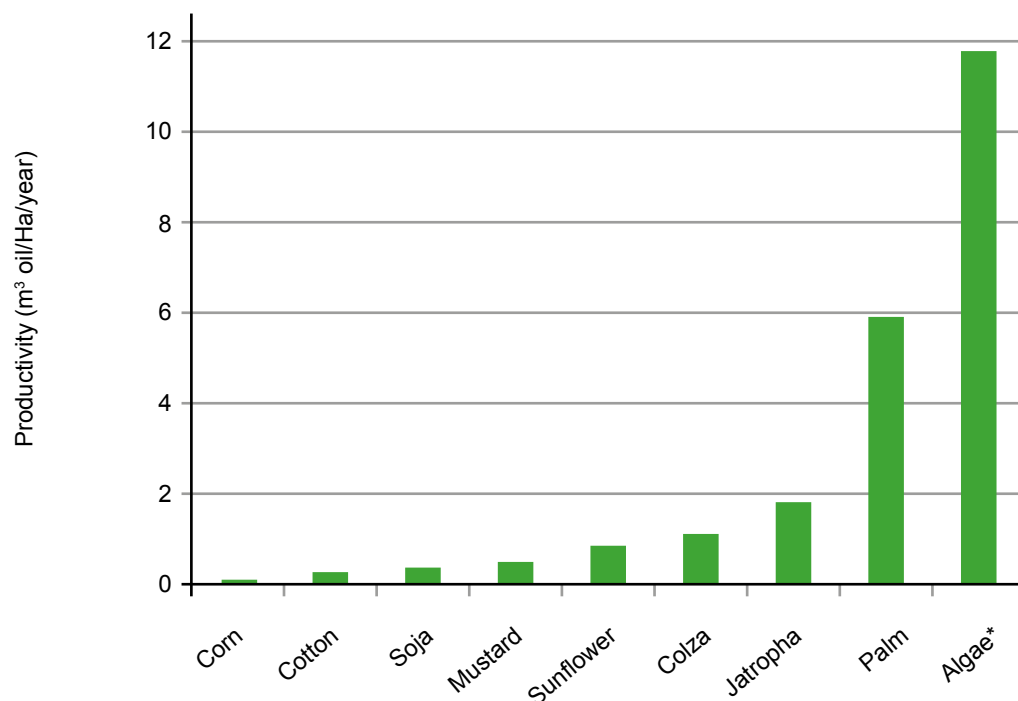
- Une productivité bien supérieure aux plantes terrestres, notamment en raison de leur cycle reproductif plus court (par exemple, le rendement en huile par ha et par an des microalgues riches en corps gras est 12 fois plus élevées que celle du tournesol et du colza, 6 fois plus élevée que celle du jatropha (euphorbiacée) et 2 fois plus que celle du palmier à huile) ;
- La possibilité de développer de nouveaux usages pour la biomasse sans créer de tensions sur les marchés des matières premières alimentaires (nombreux co-produits) ;
- 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 (en laissant la priorité aux cultures vivrières dans un objectif de sécurité alimentaire) ;
- La possibilité de rendre des services environnementaux parallèlement à leur production : traitement des eaux et valorisation du CO₂ (puits de carbone).

En contrepoint de ces atouts, les microalgues peuvent présenter des risques de toxicité (efflorescences ou bloom) préjudiciables aux autres organismes vivants (Guallar-Morillo et al., 2015) et souffrent de coûts de production encore élevés.

Sous les réserves faites ci-dessus, notamment en matière de politiques publiques nationales et internationales, les avantages présentés par les microalgues pourront demain constituer de solides avantages concurrentiels fondés sur une triple performance écologique et environnementale (valorisation de la biodiversité et économie circulaire), économique (produits recherchés par les consommateurs et co-produits) et sociale (création d'emplois, développement territorial, notamment en zone rurale).

GRAPHIQUE 4 – PRODUCTIVITÉ EN HUILE DE CERTAINES MICROALGUES ET DE DIVERSES PLANTES TERRESTRES EN M₃/HA/AN

(HYPOTHÈSE MICROALGUES : PRODUCTIVITÉ DE 20 G/M/JOUR ET 15 % D'HUILE EN MATIÈRE SÈCHE)



Source : ENEA, 2011

Les technologies de production : une filière complexe

La trajectoire technologique des microalgues est relativement ancienne puisqu'elle remonte à l'isolement de l'espèce *Tabellaria* en 1703, puis sa description en 1844. Une longue période de dormance s'en est suivie jusqu'au milieu du XXe siècle, avec le premier photobioréacteur (PBR) mis en route au MIT.

TABLEAU 10 : MICROALGUES, DE LA RECHERCHE AUX PRODUITS *

RECHERCHE	TECHNOLOGIE	PRODUIT
PREMIÈRE MICROALGUE ISOLÉE : TABELLARIA (1703)	PREMIER PBR AU MIT (1957)	RÉCOLTE DE SPIRULINES DANS LE LAC TCHAD (PLUSIEURS SIÈCLES)
PREMIÈRE MICROALGUE DANS L'ESPACE (1968, SOYUZ)	PROCÉDÉS DE PRODUCTION FLOTTANT EN OcéAN (OMÉGA)	CONSOMMATION DE SPIRULINES PAR LES AZTÈQUES
PLUS DE 20 ESPÈCES EN PHASE DE PRODUCTION (1980')	TECHNOLOGIES LACUSTRES	UTILISATION DE MICROALGUES POUR L'AQUACULTURE
PREMIER SÉQUENÇAGE DU GÉNOME D'UNE MICROALGUE (2007)	TECHNOLOGIES EN BASSIN OUVERT	UTILISATION DE SIRULINE DANS UN LARGE SPECTRE D'ALIMENTS
FORMULATION DU PHYTOPLANCTON : C53.5 H7.4 O28.2 N9.4 P1.3	NOMBREUSES CONFIGURATION DE PBR	EXTRAITS DE MICROALGUES DANS LES ALICAMENTS ET LES COSMÉTIQUES
LE PHYTOPLANCTON EST LA PRINCIPALE SOURCE DE FIXATION DU CO ₂	FERMENTEURS HÉTÉROTROPHIQUES (CELSYS, 1985)	UTILISATION DE DIATOMAE DANS PLUSIEURS INDUSTRIES

* Lecture du tableau en colonne, pas de correspondances sur les lignes

Source: Verdelho Vieira, 2014

La filière microalgue comporte de nombreux segments entre les intrants et l'utilisateur final qui peut être une entreprise (BtoB) ou un consommateur (BtoC). L'analyse de filière peut se pratiquer selon une méthode « descendante », à partir d'une matière première, ou « ascendante », à partir du marché final ; on peut compléter une analyse technico-économique par un diagnostic en termes de « chaîne de valeur » (Rastoin et Gherzi, 2010). Nous utiliserons ici la méthode descendante, les microalgues étant le thème central. Une analyse du type chaîne de valeur, très intéressante pour les décideurs, est malheureusement impraticable du fait du déficit informationnel, caractéristique de marchés émergents et/ou opaques.

Les microalgues autotrophes représenterait 50% du potentiel mondial de captation de CO₂ par la biomasse (Bougaran et Saint-Jean, 2014). Elle constitue donc un gisement fabuleux qui peut être valorisé selon 3 voies (Kerlero de Rosbo et Bernard, Ademe, 2015) :

- Directement pour l'alimentation humaine et animale et les algocarburants de 2^e génération, actuellement au stade commercial, mais encore en dessous du point mort ;
- Comme source de biomolécules de haute valeur ajoutée à extraire et transformer pour la pharmacie, la cosmétique, les IAA et la production de biocarburants de première génération, actuellement au stade commercial, mais encore en dessous du point mort ;
- Comme producteur direct de biomolécules à usages multiples (procédés « 3G+ » : utilisation de microalgues comme réacteur biologique pour la production directe de biohydrogène par exemple), encore au stade du laboratoire.

TABEAU 11 : LA FILIÈRE MICROALGUE : DE MULTIPLES SENTIERS TECHNOLOGIQUES

TYPE TROPHIQUE & SOUCHE	PHOTOAUTOTROPHES, CHIMIOHÉTÉROTROPHES, MIXOTROPHES : 30 000 ESPÈCES
AMONT	INTRANTS NÉCESSAIRES : SOUCHES DE MICROALGUE, ÉNERGIE (NATURELLE/SOLAIRE OU ARTIFICIELLE/ÉLECTRICITÉ, GAZ (CO ₂), NUTRIMENTS MINÉRAUX (N, P, K), ÉQUIPEMENTS (STRUCTURES ET MACHINES, MATÉRIAUX : VERRE, PLASTIQUE)
CULTURE	BASSINS OUVERTS, PBR, FERMENTEURS, COMBINAISONS, ETC. (TYPES ET DESIGN ?)
EFFLUENT ALGAL (0,1 - 0,3 % MS)*	
RÉCOLTE	FILTRATION, CENTRIFUGATION, SÉDIMENTATION, FLOCCULATION (CHIMIQUE, ÉLECTRIQUE, BIOLOGIQUE, AUTOFLOCCULATION), ETC.
PÂTE D'ALGUES (2 -25 % MS)*	
SÉCHAGE	SOLAIRE, FLASH, SPRAY, MICRO-ONDES, ETC.
EXTRACTION	SÈCHE OU HUMIDE ? SOLVANTS ORGANIQUES, FLUIDES SUPER-CRITIQUES, PRESSE, SONICATION, HYDROLYSE ENZYMATIQUE, ETC.
BIOMOLÉCULES D'INTÉRÊT	LIPIDES, PROTÉINES, CARBOHYDRATES, ETC.
GÂTEAU D'ALGUES (15-30 % MS)*	
POST PROCESS	PHYSICO-CHIMIQUE (TRANS-ESTÉRIFICATION), BIO-CHIMIQUE (FERMENTATION ALCOOLIQUE HYDROGÉNATION, MÉTHANISATION), THERMO-CHIMIQUE (LIQUÉFACTION HYDROTHERMALE), ETC.
PRODUIT FINAL	DIFFÉRENTS PRODUITS FINAUX...ET CO-PRODUITS

* MS = matière sèche

Source : Kerlero et Bernard, Ademe, 2015, adaptation de l'auteur

Les sentiers technologiques de la filière microalgue sont donc multiples : on ne recense pas moins d'une trentaine de types de *process* dans le tableau ci-dessus, lesquels sont à choisir et combiner dans le design des unités de fabrication. Ces *process* s'inscrivent dans le vaste et très prometteur univers des biotechnologies (Proux, 2015). On parle aussi de « bioraffinerie » à propos des microalgues du fait de leur polyvalence en termes d'usages.

Le premier maillon de la filière est représenté par les intrants et leurs fournisseurs. Il a un grand impact sur le coût de production. Il comprend en premier lieu les souches de microalgues qui seront multipliées. Cette multiplication va nécessiter de l'énergie (naturelle/solaire ou artificielle/électricité), des gaz (oxygène, hydrogène et gaz carbonique), des nutriments minéraux (N, P, K). Un schéma circulaire permettra d'économiser une partie des intrants par « autoproduction », ce qui donne un caractère plus durable au *process* de fabrication (cf. Annexe 10).

Le type d'algue va déterminer en partie les possibilités technologiques en ce qui concerne le deuxième maillon de la filière, la culture. On aura ainsi, en simplifiant une demi-douzaine d'itinéraires techniques possibles selon l'espèce des microalgues choisies (TABLEAU 13).

TABLEAU 12 : PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE CULTURES DES MICROALGUES

TYPE DE MICROALGUES	TECHNOLOGIE	VARIANTES
PHOTOTROPHES	BASSINS OUVERTS (OPEN PONDS OU RACEWAY)	INTENSIF
		EXTENSIF
	PBR (PHOTOBIOREACTEURS)	PLATS
		TUBES
		SACS
HÉTÉROCHIMIOTROPHES ET MIXOTROPHES	FERMENTEURS	

Source : adapté de Kerlero et Bernard, Ademe, 2015

La culture en bassin est un système ouvert, simple et connu. Peu coûteuse et rapide à mettre en place, c'est une technique dont l'efficacité est très dépendante du milieu extérieur (conditions climatiques, contaminations, etc.).

La culture en photo-bioréacteurs (PBR) est un système fermé de géométrie plane ou tubulaire. Contrairement au bassin, il offre un bon contrôle des conditions de culture. La productivité y est donc plus élevée, mais les coûts d'investissement et de fonctionnement sont plus importants.

La culture en fermenteur est un procédé en hétérotrophie que l'on peut rapprocher d'un PBR pour lequel la lumière n'est pas la source d'énergie. Cette technologie étant déjà parfaitement maîtrisée sur d'autres micro-organismes, ses coûts sont plus faibles que ceux des PBR et son industrialisation est aisée. Elle n'est toutefois pas adaptée à toutes les souches ni à toutes les applications (Agria-Lorraine, 2015 ; pour plus d'informations, cf. Annexe 11).

La multiplicité des combinaisons technologiques possibles pour valoriser les microalgues est très grande (Steyer, 2014, cf. illustration en Annexe 12). En conséquence, des formats différents sont envisageables à tous les stades de la filière, du plus grand au plus petit comme le montre le tableau suivant.

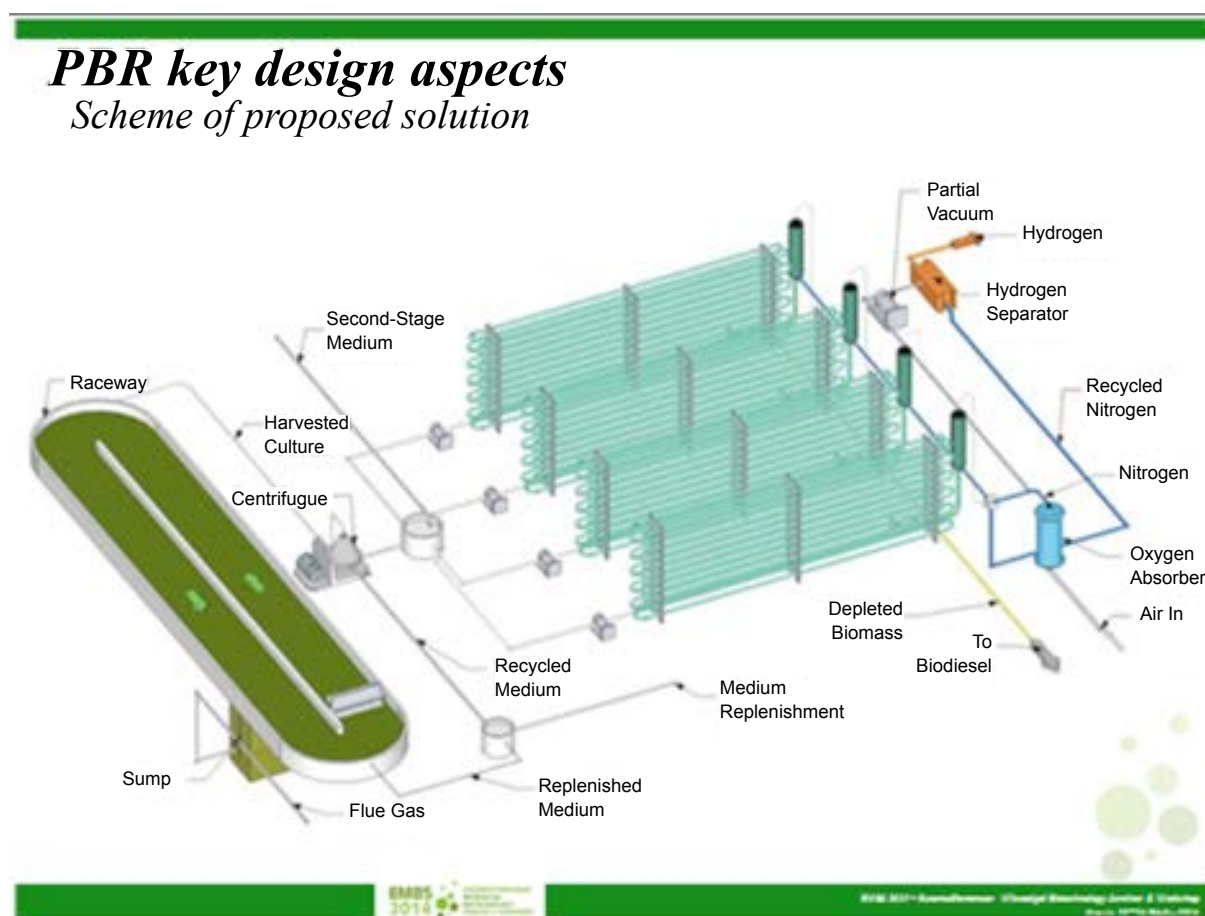
TABLEAU 13 : TYPOLOGIE DES FORMATS D'UTILISATION DES MICROALGUES EN AGRICULTURE

TYPE D'AGRICULTURE/TECH- NOLOGIE DE PRODUCTION DE MICROALGUES	GRANDE ÉCHELLE	ÉCHELLE MOYENNE	MICRO ÉCHELLE
BASSINS OUVERTS	> 100 HA	10 – 100 HA	1 – 10 HA
PBR	> 1000 M3	100 – 1000 M3	10 – 100 M3
FERMENTEURS			

Source: Verdelho Vieira, 2014

Une combinaison de différents systèmes de culture est possible comme le montre le schéma ci-dessous représentant une unité de production d'hydrogène associant d'une part, un bassin ouvert, présentant l'avantage de la simplicité, avec une productivité moyenne et d'autre part, une batterie de tubes photobioréacteurs pour la production de microalgues, avec un rendement élevé, avec une maintenance plus délicate (Fernandez-Sevilla, 2014) :

FIGURE 1 : SCHÉMA TECHNOLOGIQUE COMBINANT PBR ET BASSIN DE PRODUCTION DE MICROALGUES



Source: Fernandez-Sevilla, 2014

Les écarts de productivité entre système extensif de bassin ouvert et système ultra-intensif (PBR) sont considérables, de l'ordre de 1 à 100 (5 à 10 t/ha/an pour le premier, 500 à 1000 t/ha/an pour le second). Bien entendu, les investissements nécessaires sont en proportion. Pour ces raisons, il est nécessaire de concevoir et mettre en œuvre dans les pays en voie de développement et notamment dans les PSEM, des dispositifs adaptés tels que les bassins, en combinaison avec des PBR peu coûteux (technologie des sacs en plastique ou biofilms) plutôt que des tubes en verre).

FIGURE 2 : SCHÉMA TECHNOLOGIQUE COMBINANT BIOFILMS ET BASSIN DE PRODUCTION DE MICROALGUES

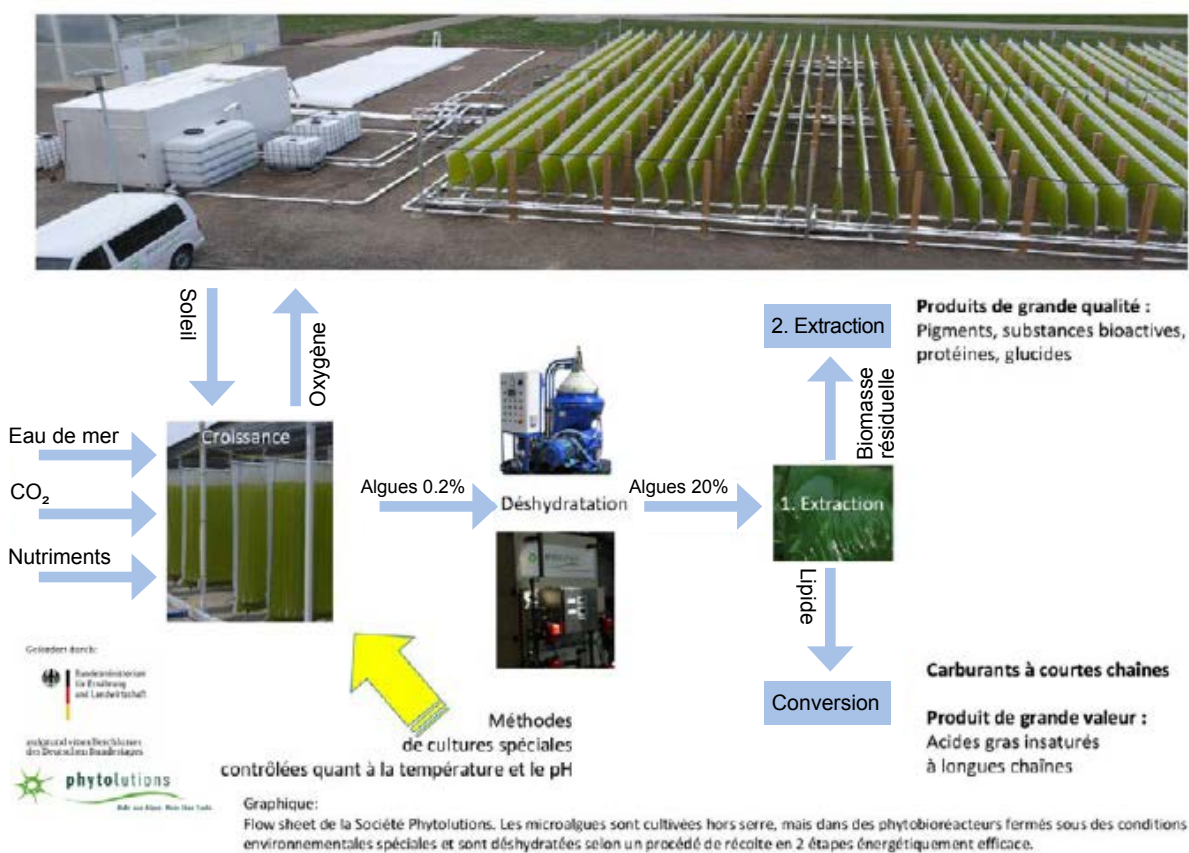
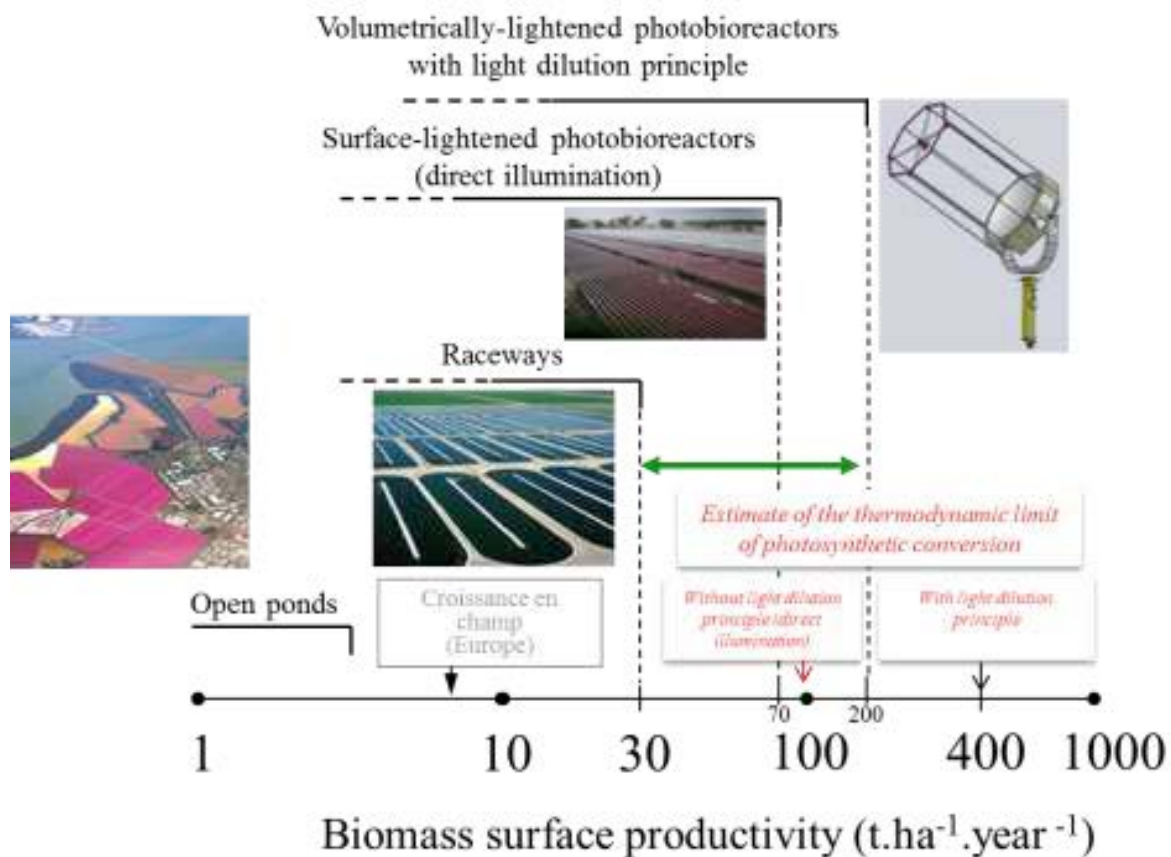


FIGURE 3 : PRODUCTIVITÉS COMPARÉES DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE CULTURE DES MICROALGUES



Source : Person, 2011, d'après ANR, Biosolis

Finalement, la performance globale de la filière ou chaîne de valeur dépendra de celle de chacun de ses maillons et de leur combinaison par le pilote ou *driver* de la chaîne. Dans le cas de la filière microalgue, on est clairement dans une chaîne globale de valeur (CGV) pilotée par l'entreprise aval qui achète les extraits secs de microalgues (IAA, industrie cosmétique ou pharmaceutique, service logistique). La compétitivité par rapport aux produits concurrents conventionnels issus aujourd'hui du C fossile dépendra de 2 éléments : l'attractivité du produit aux yeux du client final et le « plus » représenté par les co-produits.

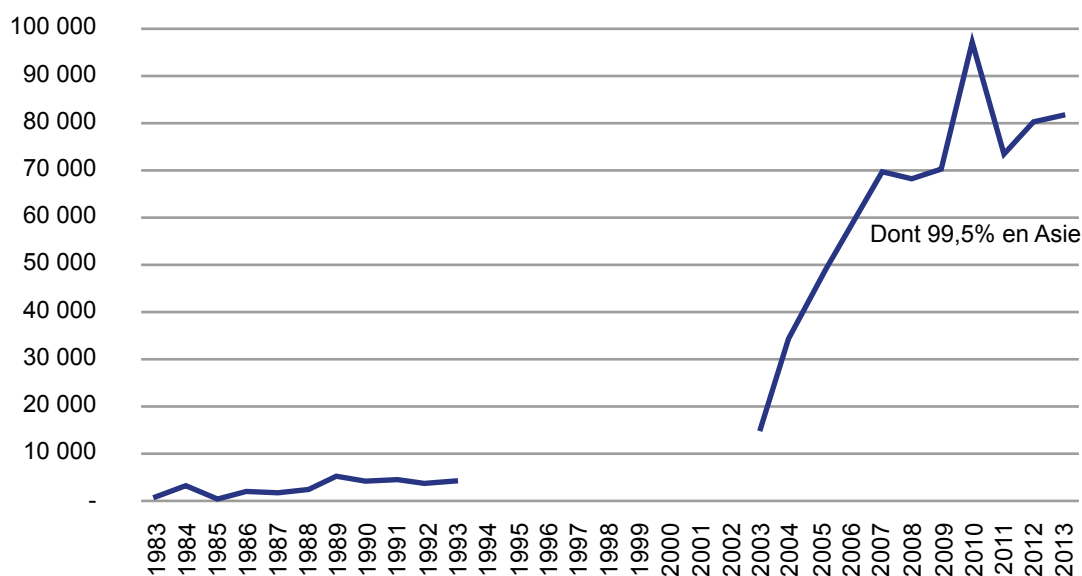
Les marchés et les entreprises de microalgues aujourd'hui : prédominance de la spiruline

Les recherches sur les microalgues ont débuté en Europe durant la Seconde Guerre mondiale, dans un objectif de complémentation nutritionnelle. La première installation industrielle de culture de chlorelle, pour l'alimentation des alevins remonte à 1960, au Japon, puis à Taïwan et, en France pour les éclosiers de mollusques et l'aquaculture, à la fin des années 1970 (Person, 2011). La spiruline a été produite au début des années 1970 au Mexique, puis en Thaïlande, aux États-Unis, en Inde, etc. L'exploitation de la *dunaliella* pour la production de pigment bêta-carotène a été initiée dans les années 1980 en Australie par BASF, puis aux États-Unis et en Israël. Enfin, l'élevage d'*haematococcus* pour l'astaxanthine (antioxydant puissant, classé comme colorant alimentaire par l'UE) a démarré aux États-Unis et en Israël dans les années 1990 (Benemann, 2014). Le choc de la crise énergétique et financière de 2007-2008 a relancé l'intérêt pour des carburants issus de la biomasse et donc pour les microalgues. Des centaines de start-up se sont alors créées dans le monde pour explorer ce marché.

La production mondiale de microalgues est passée de moins de 5 t en 1975 à 3500 t en 2000. Elle était estimée, en 2004, à une fourchette comprise entre 7 000 et 10 000 tonnes de matière sèche par an, pour une valeur marchande globale de plus de 4,5 milliards USD⁸. 276 entreprises étaient alors référencées dans ce domaine à l'échelle mondiale, un tiers d'entre elles produisant essentiellement les trois espèces dominantes : *Spirulina*, *Chlorella* et *Dunaliella*. Aujourd'hui, avec seulement quelques dizaines d'espèces de microalgues cultivées, la production mondiale plafonnerait à 10 000 tonnes (ms) par an⁹. Cette valeur reste négligeable en comparaison de celle de la production mondiale de macroalgues (15 millions de tonnes) (Person, 2011).

GRAPHIQUE 5 : PRODUCTION MONDIALE DE SPIRULINE (T)

PRODUCTION MONDIALE DE SPIRULINA SPP (POIDS BRUT)



Source : Fao, Fishstat, 29/02/2016

8 – D'autres sources avancent un CA compris en 600 et 3 300 M.€ en 2010 (Kerlero et Bernard, 2015)

9 – Vingt mille tonnes de matière sèche selon Verdelho Vieira (2014)

« Les espèces de microalgues les plus cultivées sont par ordre décroissant : la cyanobactérie *Arthrospira* (la spiruline, qui représenterait 50% de la production mondiale), suivie par les microalgues vertes *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus*, *Nannochloropsis* et la diatomée *Odontella*. L'Asie est le premier producteur de microalgues au monde, et représente à elle seule environ 50% de la production mondiale. Les principaux autres pays producteurs sont les USA, le Chili, l'Argentine, Israël, l'Australie. En Europe, l'Allemagne et les Pays-Bas sont les premiers producteurs avec environ 50 tonnes chaque année. La France quant à elle, a développé les premières unités de production de microalgues plus tardivement – à la fin des années 80 – et l'on dénombre aujourd'hui une trentaine de sites sur le territoire et pour une production d'environ 10 à 15 tonnes par an. De manière générale, en dehors de quelques espèces, les microalgues n'ont pas encore atteint leur niveau de maturité industrielle. Des problématiques de qualité et de coût de production se posent encore, ce qui limite leur accès à certains marchés » (Person, 2011).

Le marché mondial actuel des microalgues (10 à 20 kt de MS par an) se répartit entre l'alimentation humaine (74%, en volume dont 50% pour la spiruline), l'alimentation animale (25%, principalement aquaculture) et les produits chimiques et cosmétiques (1%).

Le secteur des microalgues compterait environ **200 entreprises dans le monde** (hors Chine). L'EABA (European Algae Biomass Association) en recense dans 29 pays, avec au premier rang les États-Unis (43 entreprises), au 7^e Israël (10) et au 8^e le Canada (8) ; 102 au total en Europe, avec une présence significative en Espagne (17), Allemagne (14), France (12)¹⁰, Pays-Bas (11), Royaume-Uni (10), Portugal (7), Italie (6), Suisse (4). Il s'agit essentiellement de PME, voire de TPE (cas de la spiruline), avec cependant quelques filiales de très grandes entreprises : Aqualia, Exxon (États unis), BASF (Australie et Arabie Saoudite), DSM, Roquette et Unilever. Le chiffre d'affaires des entreprises européennes approcherait 1 milliard d'euros avec un effectif de 10 000 emplois (Verdelho Vieira, 2015). On est donc en présence d'un secteur émergent composé de start-up, avec une veille stratégique de grands groupes multinationaux. Les premières créations d'entreprises remontent aux années 1980 (Greensea en France en 1988) et sont le fait de pionniers innovateurs et/ou visionnaires. Aucune entreprise (en dehors – probablement - du sous-secteur de la spiruline) ne semble avoir atteint le point mort financier en 2015, ce qui s'explique par de lourds investissements qui peinent à s'amortir par défaut de marchés porteurs.

Les pays méditerranéens hébergent 72 entreprises de microalgues : 50 en Europe et 22 dans les PSEM (cf. infra et Annexe 16).

L'un des problèmes rencontrés par les entreprises microalgales (en dehors de ceux, déjà mentionnés, de la compétitivité-prix par rapport aux produits de la chimie de synthèse et de l'étroitesse des marchés) réside dans la difficulté, en Europe, et encore plus dans les PSEM, à lever des fonds pour installer des pilotes de production industrielle permettant de fournir des échantillons de produits aux clients potentiels.

10 – Hors spiruliniers, au nombre de 200 réunis dans l'association française des producteurs de spiruline

Microalgues et bioéconomie : un aperçu mondial

Les microalgues, d'un point de vue économique, doivent être considérées comme l'une des ressources issues de la biomasse¹¹. A ce titre, elles vont se trouver en concurrence avec de nombreuses autres matières premières disponibles pour la production alimentaire et non alimentaire (bois, textiles, chimie) et pour les « résidus et déchets » valorisables en co-produits et en énergie de l'agriculture, de l'élevage de la pêche et de l'aquaculture, de la forêt, des industries agricoles et alimentaires, de la restauration et de la commercialisation (déchets urbains). L'utilisation de la biomasse pour la production d'énergies renouvelables est encouragée par la directive européenne 2009/28/CE. Une étude (FranceAgriMer, 2012) réalisée pour la France du VSD (volume supplémentaire disponible) de biomasse (hors déchets urbains et biomasse aquatique) utilisable à des fins énergétiques estime à environ 16 Mtep, soit 80% des besoins en énergie renouvelable du plan national d'action à l'horizon 2020 (20 Mtep de plus qu'en 2006)¹².

La part de la biomasse dans les bilans énergétiques actuels de l'Algérie, de l'Egypte et de la Libye est négligeable. Il existe cependant un potentiel non négligeable en Algérie, Maroc et Tunisie (forêts, déchets animaux et végétaux, eaux usées) (Bekaye, 2012).

La bioéconomie est « un ensemble d'activités économiques liées à l'innovation, au développement, à la production et à l'utilisation de produits et de procédés biologiques » dont la matière première est la biomasse et le mode de valorisation les biotechnologies, avec de multiples applications en agriculture, industrie et santé (OCDE, 2009).

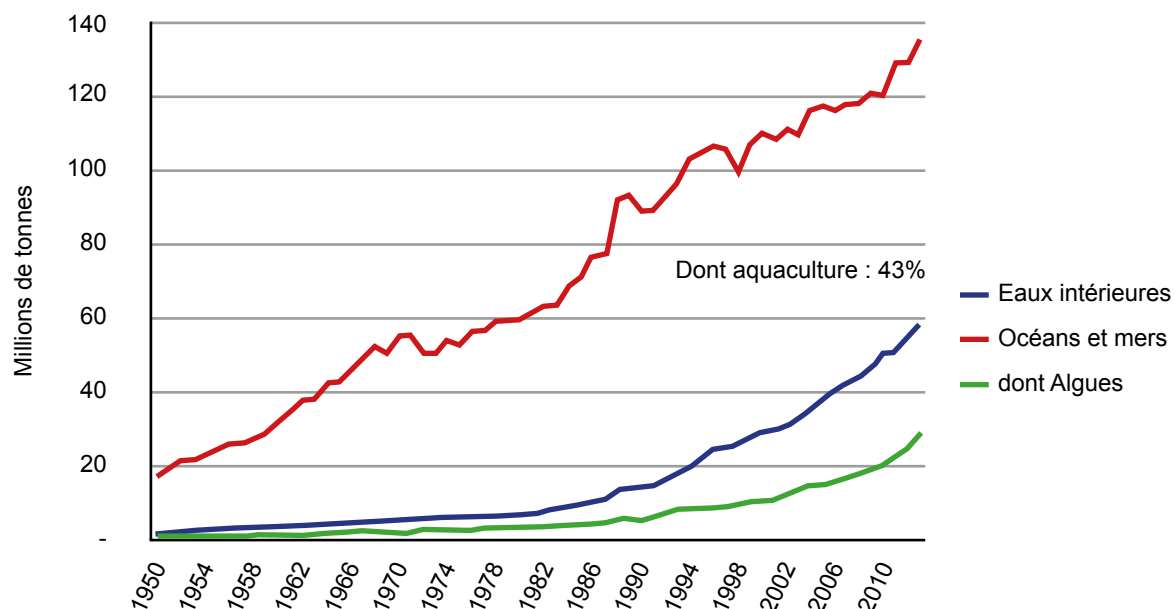
Au sein de la biomasse, l'écosphère halieutique et des eaux douces est particulièrement importante puisqu'en sont issus les captures ou les élevages de poissons, crustacés et mollusques et, au-delà, de nombreux produits telles que les farines et autres co-produits. La hausse de la production aquacole a été vigoureuse dans la deuxième moitié du XXe siècle et se poursuit au XXIe siècle, accompagnant la croissance démographique, tout comme les autres denrées alimentaires animales et végétales.

11 – « La biomasse est la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers » (Article 19 de la loi française n° 2009-967 de programmation relative à la mise en oeuvre du Grenelle de l'environnement)

12 – Objectif conforté par la loi relative à la transition énergétique, promulguée en août 2015, qui porte la part des énergies renouvelables à 32 % de son bouquet énergétique en 2030 et à 40 % de la production d'électricité.

GRAPHIQUE 6 : PRODUITS DE LA MER ET DES EAUX TERRESTRES (DONT ALGUES)

PRODUCTIONS AQUACOLES, MONDE, 1950-2013



Source : Fao, Fishstat, 2016

TABLEAU 14 : PRODUCTIONS AQUACOLES MONDIALES, 2013

EAUX TERRESTRES (M.T)	
Poissons, mollusques, crustacés, autres	57,9
Algues eaux douces	0,1
MILIEUX MARINS (M.T)	
Poissons, mollusques, crustacés, autres	106,6
Algues marines	28,2
TOTAL MONDE (M.T)	
Poissons, mollusques, crustacés, autres	164,5
Algues	28,3

Source: FAO - Fisheries and Aquaculture Information and Statistics Branch - 29/02/2016

Les algues vivent principalement en milieu aqueux et les microalgues représentent une part majoritaire du plancton et, à ce titre, constituent un maillon essentiel (le premier) de la chaîne alimentaire qui aboutit aux poissons carnassiers. La culture des microalgues, c'est-à-dire leur production maîtrisée, peut donc contribuer significativement à améliorer notre système alimentaire, sur la base de l'exceptionnel potentiel hydrique mondial (Muller-Feuga, 2013).

Sur les marchés les plus importants en volume, les produits concurrents des microalgues sont principalement les protéagineux (notamment soja, fournissant de l'huile pour l'alimentation humaine et des tourteaux pour l'alimentation animale) et les huiles et farines de poisson (Tableau 4). On constate que les écarts de volume et de prix entre produits-source restent considérables.

TABLEAU 15 : L'UNIVERS CONCURRENTIEL DES MICROALGUES EN ALIMENTATION, 2014

HUILES ET FARINES	SOJA	POISSONS	MICROALGUES
PRODUCTION (T/AN)	> 200 MILLIONS	> 7 MILLIONS	> 20 MILLE
APPLICATIONS	ALIMENTATION ANIMALE	ALIMENTATION ANIMALE	ALIMENTATION HUMAINE
PRIX	< 0,5 €, EN MOYENNE 0,35 €/KG	< 2 €, EN MOYENNE 1,5 €/KG	< 5 €, EN MOYENNE 10 €/KG

Source: Verdelho Vieira, 2014

Les microalgues les plus utilisées (*Spirulina*, *Chlorella*, *Dunaliella* et *Haematococcus*) représentent aujourd'hui un marché cumulé d'environ 400 à 500 M.USD, pour des prix moyens au kg de matière sèche s'établissant entre 5 €/kg (spiruline basique) et 340 €/kg (haematococcus). L'astaxanthine – antioxydant très puissant extrait de cette dernière microalgue – dépasserait les 7 000 €/kg (Verdelho Vieira, 2014, cf. Annexe 13).

Selon les spécialistes, à court terme, les marchés porteurs sont ceux des molécules à haute valeur ajoutée (santé, compléments alimentaires, cosmétiques), à moyen terme ceux des biomatériaux et de l'alimentation animale, et à long terme ceux de la dépollution et de l'énergie. Au total, ces marchés se chiffrent en milliards de dollars (cf. Annexe 14).

TABLEAU 16 : HORIZONS DES MARCHÉS DES PRODUITS ISSUS DES MICROALGUES (MONDE, 2015)

PRODUITS	HORIZON DE MATURITÉ	TAILLE ACTUELLE (USD)
BIOFERTILISANTS ET BIOPESTICIDES POUR L'AGRICULTURE	3 À 5 ANS	1 À 2 MILLIARDS
COMPLÉMENTS ALIMENTAIRES EN NUTRITION HUMAINE	3 À 5 ANS	1 À 2 MILLIARDS
ALIMENTATION ANIMALE		250 À 500 MILLIONS
PHYTOPHARMACIE		100 MILLIONS
COSMÉTIQUE		50 MILLIONS
BIOMATÉRIAUX	10 ANS	NS
DÉPOLLUTION	5 À 10 ANS	NS
ÉNERGIE	30 ANS	NS

Dans ce panorama mondial, « la France est l'un des premiers acteurs de la recherche amont dans le champ des microalgues (1^{er} rang pour les publications et 4^e 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 connaissances scientifiques vers l'industrie » (Kerlero et Bernard, 2015).

Les autres pays méditerranéens, à l'exception de l'Espagne, se trouvent dans une situation comparable.

Le rôle déterminant de la demande sociale

Le client final de la filière microalgue est le ménage (BtoC), acheteur de produits de grande consommation alimentaires, pharmaceutiques, cosmétiques, mais aussi d'eau potable et de carburants pour ses déplacements, et, dans le monde professionnel (BtoB) : l'agriculteur, l'éleveur, l'aquaculteur. Pour ces utilisateurs, le caractère durable est de plus en plus important : le pic de la consommation de masse standardisée, opaque et prédatrice a été atteint depuis la fin du XXe siècle et le début des années 2000 dans les pays à haut revenu et concerne une part croissante de la population. Le même phénomène s'observe aujourd'hui dans les pays émergents.

TABLEAU 17 : LE NOUVEAU PARADIGME DE LA CONSOMMATION

ATTRIBUT PRODUIT	SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE	SOCIÉTÉ DURABLE
PRIX	LE PLUS BAS POSSIBLE	CONSENTEMENT À PAYER FONCTION DES ATTRIBUTS
QUALITÉ	STANDARD	TOTALE : PRÉOCCUPATIONS SANTÉ (SÉCURITÉ ALIMENTAIRE ET NUTRITIONNELLE) ET ORGANOLEPTIQUES (DONT GOÛT)
ORIGINE, COMPOSITION ET FABRICATION	LACUNAIRES	CLAIREMENT IDENTIFIÉE POUR LES COMPOSANTS DU PRODUIT : TRAÇABILITÉ ET TRANSPARENCE INFORMATIONNELLE, RSE
PATRIMOINE ET CULTURE	ABSENTS	RÉFÉRENCE HISTORIQUE ET SOCIALE

Ce nouveau contexte de consommation est favorable à des matières premières issues de ressources renouvelables, à faible impact environnemental, créatrices d'emplois et génératrices de co-produits valorisables (énergie, gestion écologique des déchets, biomatériaux), ce qui – sous certaines conditions – est le cas des microalgues.

En résumé, les microalgues constituent une source de matière première très abondante et diversifiée débouchant sur de nombreuses applications. Sous réserve de modèles économiques adaptés et compétitifs par rapport aux autres composants de la biomasse, elles peuvent apporter une contribution majeure à l'ouverture de nouveaux marchés et au développement durable, notamment en Méditerranée

Les microalgues en Méditerranée

Les informations sur la production, la transformation et la commercialisation des microalgues et de leurs dérivés sont rares et fragmentaires. On dispose de quelques statistiques sur les principales espèces d'algues (spiruline, chlorelle et dunaliella), mais elles sont très incomplètes et peu fiables. Quant aux produits tirés des microalgues, c'est l'absence complète de données. Cette situation concerne l'ensemble des pays méditerranéens et particulièrement les pays du Sud.

Production aquacole en Méditerranée

La production aquacole¹³ s'est élevée en 2013 dans ces 25 pays à environ 2 millions de tonnes, soit un triplement par rapport à 1990. L'aquaculture

13 – Tous produits (mammifères, poissons, mollusques, crustacés, algues). La production marine des pays méditerranéens concerne en partie l'Atlantique du fait des façades océaniques de l'Espagne, de la France, du Maroc et du Portugal.

représente environ 40% des tonnages prélevés. Les produits des eaux intérieures sont majoritaires (2/3 du total) et ont connu une croissance exponentielle dans les PSEM (multiplication par 15 en 23 ans) et une légère diminution dans les pays européens (- 10%).

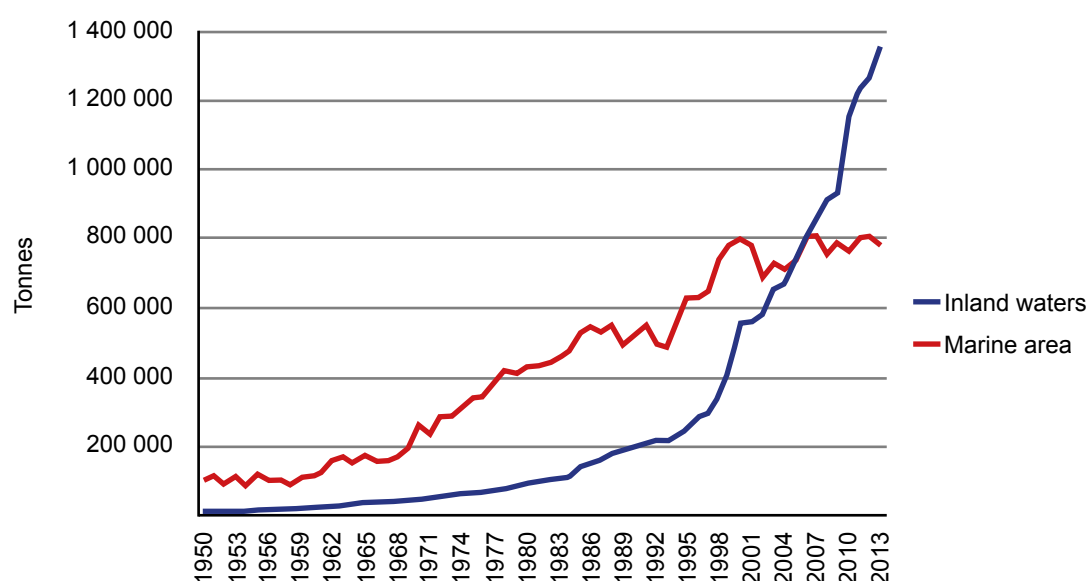
La mer Méditerranée s'étend sur 2,5 millions de km², avec une longueur maximum de 1 600 km du Nord au Sud, une largeur d'est en ouest de 3 800 km et un volume de 3,7 millions de km³. C'est une mer profonde, en moyenne 1 500 m. Son littoral est très découpé et représente 46 000 km de côtes (dont 40% autour des îles). Les produits de la mer ont augmenté de 50%, avec la aussi une progression très forte dans les PSEM (multipliés par 45) et modérée dans les pays européens (+ 30%). Alors que les PSEM produisent 12 fois plus de produits d'eau douce que l'Europe, cette dernière reste 5 fois plus importante que les PSEM pour la pêche maritime. La production d'algues dans les 25 pays méditerranéens est marginale au regard de la production mondiale¹⁴.

TABEAU 18 : PRODUCTION AQUACOLE DES PAYS MÉDITERRANÉENS

DOMAINES	RÉGIONS	2013 (t)		VARIATION 1990-2013 (X)
EAUX INTÉRIEURES	EUROPE	104 373	8%	0,9
	PSEM	1 249 352	92%	14,8
	MÉDITERRANÉE	1 353 725	100%	6,8
AIRES MARINES	EUROPE	659 658	84%	1,3
	PSEM	126 231	16%	44,9
	MÉDITERRANÉE	785 889	100%	1,5

FAO - Fisheries and Aquaculture Information and Statistics Branch - 01/03/2016

GRAPHIQUE 7 : PRODUCTIONS AQUACOLES, PAYS MÉDITERRANÉENS, 1950-2013



Source : Fao - Fisheries and Aquaculture Information and Statistics Branch - 01/03/2016

14 - Les seules statistiques internationales concernant la production d'algues sont celles de la Fao qui compile des données transmises par les Etats. Ces données sont incomplètes et peu fiables.

La recherche sur les microalgues dans le cadre de l'UE

L'UE a tenté de corriger ce déficit d'information et d'impulser une dynamique de développement en finançant un important programme « MedAlgae » qui a mobilisé autant de ressources à lui seul que 8 autres projets dans le cadre de sa politique de voisinage tournée vers le monde méditerranéen (cf. Annexe 15).

ENCADRÉ N° 2 : LE PROGRAMME DE RECHERCHE EUROPÉEN MEDALGAE

Ce programme relève de la politique de voisinage de l'Union européenne (IPVE/ENPI). Il s'est déroulé de 2011 à 2014, avec un budget de 2 M€, dont 90% sur financement européen. Son objectif était de renforcer la coopération entre 6 pays partenaires de l'UE et de son voisinage : Chypre, Grèce, Italie, Malte, Égypte et Liban, rassemblant 12 organisations privées et publiques. Il s'inscrit dans le thème « Énergie et changement climatique » de l'UE. Ses objectifs étaient d'étudier les conditions de production de **biodiesel** à partir de microalgues, d'identifier les opportunités et contraintes de cette production, la valorisation de co-produits (molécules à haute valeur ajoutée) et de créer un réseau de coopération dans ces domaines. Le projet de recherche MedAlgae fournit quelques informations et analyses – très fragmentaires – sur les microalgues dans 6 pays que nous pouvons résumer de la façon suivante :

- L'état des lieux de la recherche sur les microalgues (et d'une manière plus générale et plus présente les énergies biomassiques) a permis de relever une activité importante en Égypte (recherches sur *Jatropha* notamment), en Calabre (culture de microalgues), en Grèce (biodiesel à base de microalgues), au Liban (pellets de microalgues) et à Malte (phytoépuration) (Polocarpou, 2013).

- Il existe déjà une vingtaine d'entreprises actives dans le secteur des microalgues dans les pays partenaires du projet MedAlgae, avec :

- des unités de production de microalgues expérimentales et de grande taille en Grèce, Italie, Malte ;
- des unités de production de biodiesel à Chypre, en Égypte, Grèce, Italie et Malte, avec un cadre légal ;
- des unités de production de co-produits (molécules d'intérêt pour l'alimentation humaine et animale, la pharmacie, les cosmétiques, la chimie) en Grèce, Italie et Malte.

Le programme MedAlgae a permis l'installation de 6 pilotes de production (1 par pays partenaire) en procédé raceway et PBR et de créer un centre de R&D et formation à l'université d'Alexandrie (ReMed Bio, centre régional méditerranéen de bioproduction).

72 entreprises de production de microalgues et dérivés ont pu être répertoriées dans 9 pays méditerranéens : 50 dans 5 pays européens (Espagne, 15, France, 21, Grèce, 1, Italie, 6 et Portugal, 7), et 22 dans 5 PSEM (Israël, 10, Maroc, 4, Tunisie, 3 et Turquie, 5). Une présence est certaine en Égypte et probable dans d'autres pays tels que le Liban et la Jordanie. La plupart de ces entreprises élèvent des spirulines (cf. en Annexe 16, liste des entreprises).

La situation des microalgues dans quelques PSEM : recherches en cours et positionnement de quelques entreprises

Nous présentons ci-dessous une synthèse d'entretiens menés avec des experts du secteur des algues de certains PSEM, en particulier du Maghreb (Cf. Annexes 1 et 2). Les informations sont loin d'être exhaustives et demandent à être validées et approfondies à partir d'une enquête de terrain.

Les microalgues en Algérie

Par « sa superficie et sa biodiversité, l'Algérie représente un immense gisement, sinon un réservoir important pour la recherche et la production de nouvelles sources alimentaires et énergétiques. Ces dernières peuvent atténuer un tant soit peu le déséquilibre alimentaire des populations vivants dans les régions enclavées et isolées [du] pays » (Chader et al, 2001).

Plusieurs organismes d'enseignement supérieur et de recherche travaillent en Algérie sur les microalgues, parmi lesquels :

- Le CDER (Centre de développement des énergies renouvelables), qui aurait deux projets en cours : l'un portant sur l'inventaire, la caractérisation et la valorisation énergétique de quelques ressources bioénergétiques, dont les algues ; le second consacré au développement des photobioréacteurs pour la culture des microalgues¹⁵ ;
- Le CNDPA (Centre national de développement de la pêche et de l'aquaculture), qui travaille sur l'isolement, la purification et la valorisation de micro-algues à partir de prélèvements d'eaux saumâtres du nord du Sahara, depuis 2012 ;
- L'Université d'Oran et notamment le LRSE (Laboratoire du réseau de surveillance environnementale) qui s'intéresse au recensement et à la caractérisation d'algues marines ;
- L'Université de Mascara (Département de biologie), qui mène des recherches sur les propriétés antibactériennes et antifongiques de certains extraits d'algues marines, etc.¹⁶

Ces recherches sont encore embryonnaires, car dotées de peu de moyens. Un article datant de 2009 suggère un positionnement précurseur et prédominant de la recherche algérienne sur la production de biocarburants à partir de micro-algues autochtones ; la découverte de la *chlorella sorokiniana* pour la production d'hydrogène ayant constitué une découverte majeure du CDER¹⁷.

15 – <http://www.cder.dz/spip.php?rubrique358>

16 – Sources : entretiens de Kelly Robin d'Ipemed avec des enseignants-chercheurs de ces institutions, le 17/03/2016, le 21/03/2016 et le 01/04/2016.

17 – « Une micro-algue algérienne pour produire de l'hydrogène : ils l'ont fait ! », Liberté, 23-03-2009, disponible sur : <http://www.liberte-algerie.com/actualite/une-micro-algue-algerienne-pour-produire-de-lhydrogene-ils-lont-fait-62652> [dernière consultation le 10 mai 2016]

Quelques producteurs de micro-algues ont pu être identifiés. Une action de promotion de la culture de spiruline (qualifiée de « sang vert ») est menée dans le Hoggar par l'association Spirulina Sahara, créée par Abdelkader Hiri¹⁸ et combine production locale, stages d'initiation à destination de jeunes ou de mères de famille et des sessions d'information autour de l'alimentation. Une entreprise algéro-espagnole PBA (Partisano Biotech Algérie), société mixte créée à parts égales entre deux industriels algériens, Hasnaoui Brahim et Dennouni Sid Ahmed d'une part, et Gomis Cristian, chercheur et entrepreneur espagnol, a en projet la production d'artémia salina, élément indispensable au développement de l'aquaculture nationale¹⁹. Cette initiative aurait connu un premier échec en 2010, suite à « *son implantation dans la région de Marhoum, suscitant une vive polémique sur l'opportunité de ce projet budgétivore ayant englouti plusieurs milliards de centimes sans résultats probants, avant d'être transféré en 2012 à Tabia.* » ; ses conditions de succès étant conditionnées à une meilleure utilisation des potentialités aquacoles locales²⁰.

Les microalgues au Maroc

On retrouve des dynamiques similaires au Maroc, même si la création de la Fondation MASCIr²¹ (Moroccan foundation for Advanced Science, Innovation and Research), en 2007, a permis de davantage valoriser les « ressources vertes », dans une démarche orientée « marché ».

La Fondation, qui dispose de la première collection de micro-algues (« algothèque ») au Maroc, s'est d'abord concentrée sur la production de biocarburants de 3^{ème} génération. Ce premier projet, actuellement en phase de test sur pilote, dans le Sud du pays a ouvert la voie à d'autres applications, en particulier sur la recherche de biofertilisants, en partenariat avec Éléphant Vert (via sa filiale Éléphant Vert Maroc).

Un autre projet est mené avec l'OCP (Office chérifien des phosphates) et porte sur une installation de dépollution de phosphates et de valorisation par des microalgues. On peut également signaler un projet, en partenariat avec une entreprise étrangère, qui concerne la fabrication de cosmétiques, ciblée sur des ingrédients issus de microalgues riches en antioxydants, anti-inflammatoires, anti-acnés, et molécules de régénération de la peau²².

Les projets cités ci-dessus ont la particulièrement d'être adaptés aux besoins nationaux et surtout aux besoins industriels, grâce notamment à ces « contrats-clients ». Ils permettent à la fois d'orienter la R&D en fonction du marché, mais aussi de sensibiliser les industriels aux développements induits par la recherche sur les micro-algues. Ils offrent ainsi des perspectives prometteuses pour la production de biomolécules à haute valeur ajoutée pour des marchés porteurs (cosmétique, IAA, etc.) au Maroc.

Le marché de la spiruline, lui, semble déjà mature et constitue une activité de niches, étant donné la présence de producteurs dans le pays dont voici quelques exemples :

18 – <http://www.les-sahariens.com/abdelkader-hiri-a-tamanrasset-les-gens-appellent-la-spiruline-le-sang-vert/>

19 – <http://www.pba-dz.com/#biomasse>

20 – « Cap sur la production de micro-algues et d'alevins Sidi Bel Abbès », Mammeri Abdelkrim, 3 août 2013, El Watan

21 – www.mascir.com

22 – Source : Entretien de Kelly Robin, Ipemed, avec la Fondation MASCIr, 24/03/2016.

- **Spiruline Vitalgue**²³, créée par trois associés français et basée à Marrakech, qui exporte 60% de sa production, grâce au respect des normes sanitaires européennes, contrôlées par l'Etablissement autonome de contrôle et de coordination des exportations (EACCE)²⁴ ;
- **Atlas Spiruline**²⁵, née d'un partenariat avec l'association française TAMOUNTE, basée à Avignon et Spiruline Vitalgue. Lancé en 2010, ce projet collectif souhaitait redynamiser le pôle agricole en place dans le village de Zaouit Sidi Ahmed, à 20 km de Ouarzazate, en créant de nouveaux emplois locaux. Aujourd'hui, une partie des bassins de culture sont alimentées par des roues à aubes activées par de petits panneaux solaires²⁶.
- **Domaine Spiruline**²⁷, entreprise créée par le Dr Yasser Medkour et localisée dans la forêt de Ben Abid. Il s'agirait de « la troisième ferme dans le monde à produire une microalgue spiruline certifiée 100% bio par Ecocert et 100% Organic par Nop (USDA)²⁸ » ;
- **Vitalina**, implantée à Agadir depuis 2008²⁹ ;

Les microalgues en Tunisie

Le cas de la Tunisie est représentatif de la situation dans les PSEM, à l'exception d'Israël où le niveau technologique et les produits sont similaires à celui des pays de l'UE.

Les recherches sur les microalgues en Tunisie remontent à une quinzaine d'années. Elles relèvent de l'INSTM (Institut national des sciences et technologies de la mer) et de l'ISPB (Institut supérieur de la pêche de Bizerte). Une vingtaine de mémoires et de thèses sont disponibles sur le site de la bibliothèque de ressources scientifiques de l'IRESA (Institution de la recherche et de l'enseignement supérieur agricoles).

Il existerait en Tunisie une dizaine d'entreprises de production de spiruline, dont 2 déjà présentes sur le marché local et un peu à l'exportation : Bioalgues, Eden Life, et une en incubation dans le Biotechnopole de Sidi Tabet, Algoil/Vitalight Lab. Bioalgues et Eden Life élaborent des ingrédients à haute valeur ajoutée destinés à la nutrition humaine (complémentation) et à la cosmétique, ce qui limite les débouchés locaux du fait de prix élevés. Les entreprises tunisiennes ambitionnent de développer leurs exportations vers l'UE, en concurrence des produits de masse chinois, dont la qualité serait médiocre.

La Tunisie dispose de conditions naturelles favorables pour la production de microalgues, quasi similaires aux autres pays du Maghreb : énergie solaire, géothermie, lagunes, avec un bon niveau technique des opérateurs. La Tunisie constitue également un réservoir de biodiversité microalgal intéressant par ses espèces soumises à des stress thermiques et de salinité élevés et ayant en conséquence une productivité stimulée et sélective en molécules d'intérêt³⁰.

23 – <http://www.spirulinevitalgue.com/accueil/bienvenue.html>

24 – D'après « La spiruline, aliment majeur du XXI^{ème} siècle, produite au Maroc... », Patrick Marescaux, Medias24, 18 août 2015

25 – <http://www.atlaspiruline.com/>

26 – <http://cdurable.info/Spiruline-Bio-Maroc-Atlaspiruline-Asso-Tamounte.html> ; <http://spiruline.stjoavignon.net/spiruline/Projet.html>

27 – <http://www.domainespiruline.com>

28 – <http://www.domainespiruline.com/news9e43.html?id=25>

29 – <http://www.fellah-trade.com/fr/info-filiere/actualites-maroc/article?id=7431>

30 – Source : 3e Journée Internationale d'information sur les phototrophes aquatiques et la production des microalgues. Etat des lieux et perspectives, Mahdia, Tunisie - 15 Mars 2016 (Ben Ouada, 2016).

Les microalgues en Turquie

L'université Ege à Izmir (55 000 étudiants) a été pionnière en Turquie dans la recherche sur les microalgues. Elle a créé EGEE-MAC, première collection de microalgues dans le pays et a été à l'origine, à travers son *Technopark*, de plusieurs *starts-up* du secteur, dont EGERT, n°1 des produits dérivés de la spiruline, présente dans la grande distribution.

D'après les informations préliminaires obtenues, les autres entreprises de taille significative présentes sur le marché turc sont :

- Mikroalg Gıda Tarım Sanayi AŞ³¹, créée en 2009 et basée à Izmir, qui élabore des engrais agricoles à partir de micro-algues. Mikroalg est actuellement engagée dans deux projets financés par l'Union Européenne et coordonne deux projets de recherche du TÜBİTAK, Conseil de la Recherche Scientifique et Technologique turc.
- Vitatis Biotechnology³² qui produit des acides gras riches en oméga 3 ;
- Akuvatur³³, créée en 1990 qui fournit des aliments pour élevages aquacoles³⁴.

Il ressort de, ces données préliminaires, de forts potentiels pour le déploiement d'une filière microalgue dans le cadre de partenariats Nord-Sud ou Sud-Sud. Malgré des développements récents dans les pays cités, des projets de coopération sont déjà en place et ont pu avoir un rôle moteur : c'est le cas de projets de recherche transfrontaliers³⁵, de projets de recherche appliquée impliquant l'ensemble des acteurs de la filière, mais aussi des cas de « coproduction » entre acteurs des deux rives³⁶.

31 – <https://mikroalg.com/>

32 – <http://vitatis.com.tr/>

33 – <http://www.akuvatur.com/>

34 – Source : Entretien de Kelly Robin, Ipemed, avec Zeliha Demirel du département de Bio-engineering de l'université Ege, 29/03/2016.

35 – Voir à ce propos la collaboration entre chercheurs marocains, algériens et espagnols in Sahnouni F. et al, 2014

36 – IPAMED promeut au travers de ce concept de « coproduction » un nouveau modèle de coopération économique « gagnant – gagnant » basé sur le partage de la valeur ajoutée et le transfert des technologies entre le Nord et le Sud de la Méditerranée, permettant ainsi la montée en gamme des économies des pays méditerranéens. Lors de son Forum annuel à Sousse en décembre 2014, IPAMED a lancé, en partenariat avec BpiFrance, l'Observatoire de la coproduction en Méditerranée qui vise à analyser qualitativement les stratégies des investisseurs méditerranéens. Ses travaux sont librement consultables sur <http://www.ipemed.coop/>.

PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT DES MICROALGUES

Différents exercices de prospective sur le secteur des microalgues ont été conduits depuis le début des années 2000. Nous présenterons ici succinctement celui consacré à un horizon lointain (2100), intéressant pour l'orientation des recherches fondamentales et celui consacré à la France (2030), mené à l'aide d'une modélisation mathématique, avant d'esquisser un scénario pour les pays méditerranéens.

Un exercice de futurologie : prospective mondiale 2100

Le CPE (Centre de prospective et d'évaluation) du ministère de la Recherche, le GRET (groupe de recherche et d'échanges technologiques), le Cirad (Centre international de recherche agronomique pour le développement) et l'Orstom (devenu depuis l'IRD (Institut de recherche pour le développement)) ont réalisé en 1988-89 un séminaire « Prospective des déséquilibres mondiaux », suivi de « réunions de créativité » qui ont donné lieu à la publication d'un imposant ouvrage intitulé « 2100, récit du prochain siècle » (Gaudin, 1990). Dans cet ouvrage, il est indiqué que « *certaines algues offrent des alternatives intéressantes pour régler des problèmes de malnutrition ou d'alimentation du bétail. Les conditions de marché décident de l'essor de multiples produits dont la technologie est au point* » (Ibid p. 212).

L'association prospective 2100³⁷ qui a pris le relai de cet ouvrage a organisé en juin 2012 une conférence sur l'avenir des microalgues. Claude Gudin et Olivier Bernard qui ont tous deux contribué à cette réflexion sur le futur lointain aboutissent à la même conclusion : l'impératif d'une vision collaborative et polysémique pour résoudre les questions très complexes qui conditionnent l'avenir des microalgues.

Ces chercheurs dressent alors un « Catalogue du futur à entrées multiples » :

TABEAU 19 : ORIENTATION À MOYEN ET LONG TERME DE LA R&D SUR LES MICROALGUES

ENTRÉE	CONTENU
PRODUITS ET MARCHÉS	ACIDES GRAS POLYINSATURÉS, CAROTÉNOÏDES ET ANTIOXYDANTS, POLYSACCHARIDES (DÉRIVÉS DE L'AMIDON), PHYCOBILIPROTÉINES (PIGMENTS MARQUEURS), HYDROCARBURES
EXTRÊMOPHILES	ESPÈCES RÉSISTANTES À DES CONDITIONS EXTRÊMES DE TEMPÉRATURE, pH ET SALINITÉ
MODES DE CULTURE	HÉTÉROTROPHIE ET MIXOTROPHIE, PHOTOTROPHIE ET MIXOTROPHIE, IMMOBILISATION, EN PRODUCTION CONTINUE PLUTÔT QUE DISCONTINUE
MODES DE RÉCOLTE	CENTRIFUGATION, FILTRATION, DÉCANTATION, FLOTTATION
CARACTÈRE DES ESPÈCES	TAILLE, MORPHOLOGIE, MOBILITÉ

Source : Gudin et Bernard, 2013, p. 55

37 – <https://2100.org/asso/>

On notera que les applications « Food » et « Feed » mentionnées dans l'ouvrage 2100 sont absentes de ce tableau. Ceci dénote les avancées scientifiques et technologiques sur les molécules à haute valeur ajoutée (applications santé et cosmétique) et les carburants et les difficultés à concurrencer les végétaux classiques à haute productivité en alimentation humaine ou animale.

À propos des algocarburants, un autre chercheur, Jean-Paul Cadoret, directeur général de Greensea et ancien directeur du laboratoire de physiologie et biotechnologie des algues à l'Ifremer de Nantes³⁸ explique : « *(ils) sont le Graal des chercheurs, mais leur maîtrise doit lever deux verrous, l'identification génétique des meilleures espèces d'algues, et l'invention d'une technique de séchage peu énergivore. Surtout, ils ne s'imposeront que lorsque le pétrole sera plus cher ou qu'il n'y aura plus d'or noir* ». (Cadoret in Sergent, 2013)

Les préconisations des scientifiques sont les suivantes en ce qui concerne l'orientation des recherches futures sur les microalgues (Gudin et Bernard, 2013) :

- **Dans le domaine de la génétique**, plutôt privilégier l'identification de nouvelles souches en puisant dans l'immense biodiversité et réserver la fabrication d'OGM à des cas bien délimités du biomédical, en évitant la dispersion dans la nature.
- **Au niveau des procédés**, privilégier la culture continue en chemostat ou turbidostat pour sélectionner les espèces intéressantes et éliminer les prédateurs ; réduire les grosses quantités d'eau à manipuler en pratiquant la mixotrophie en fermenteur ; réserver la production en PBR tubulaires à la production d'antioxydants ; pratiquer l'immobilisation qui permet la culture des espèces fragiles à l'agitation, en percolation continue, ce qui implique la recherche de nouveaux supports transparents ou translucides.
- Finalement, il s'agira de **focaliser et synchroniser les efforts de recherche**, au plan national et international sur les microalgues (alors que la crise des marchés de 2007-2008 a déchainé la concurrence entre laboratoires), condition première d'un développement du secteur.

« *C'est en combinant ces différents choix possibles (produits, technologies, caractère des espèces) qu'on peut s'approcher des conditions les plus adaptées, à partir du moment où le produit visé avec un vrai marché derrière est retenu. Ceci montre à quel point une approche multidisciplinaire ouverte est indispensable à ce type de biotechnologie* » (Gudin in Gudin et Bernard, 2013). « *Les compétences des uns et des autres doivent s'associer pour relever les défis qui nous permettront d'exploiter ce matériau "nouveau"* » (Bernard, Ibid).

Ce point de vue est confirmé par l'examen des projets de R&D sur les microalgues conduits en France depuis le milieu des années 2000. On recense 27 projets mobilisant environ 300 M. € sur une dizaine d'années (somme à la fois importante s'agissant d'un secteur émergent, mais dérisoire par rapport à la dépense nationale de R&D qui avoisinait 50 milliards € en 2012). Ces projets de R&D sur les microalgues sont tous pluridisciplinaires et associent dans la majorité des cas laboratoires publics de recherche et entreprises. Ils concernent 4 grands domaines : les biocarburants (9 projets), les technologies de culture des microalgues (9), les molécules d'intérêt en nutrition et santé, incluant la cosmétique (7), les biomatériaux (1). Les sources de financements sont variées : principalement, Investissements d'avenir et Fonds unique interministériel (pôles de compétitivité), pour les 2/3 des montants identifiés, suivi de l'Union européenne (environ 10%), des Régions et de l'Agence nationale de la recherche (ANR) (Kerlero et Bernard, 2015). On trouvera dans l'Annexe 17 la liste et le descriptif de ces projets.

Concernant, les technologies et les sites de production futurs des microalgues, des changements importants sont à venir, avec, selon certains experts, un remplacement progressif de l'autotrophie par l'hétérotrophie (qui présente l'avantage de générer des co-produits) et une combinaison des deux (mixotrophie), ce qui suppose une sélection de microalgues adaptées (Tableau 20).

TABEAU 20 : ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DES MICROALGUES

TECHNOLOGIE		
PHOTOAUTOTROPHIQUE	HÉTÉROTROPHIQUE	MIXOTROPHIQUE
SOURCE DE CARBONE		
CO ₂	CARBONE BIOLOGIQUE	CO ₂ ET CARBONE BIOLOGIQUE
PART DE LA PRODUCTION TOTALE DE MICROALGUES EN 2014 (t MS/AN)		
80%	20%	OPTION PROCHE
PART DE LA PRODUCTION TOTALE DE MICROALGUES EN 2020 (t MS/AN)		
5%	70%	25%
SITES DE PRODUCTION		
Océans	FERMENTEURS	BASSINS
ÉTANGS	LABORATOIRES	PBRs
BASSINS		LABORATOIRES
PBRs		
LABORATOIRES		

Source : Verdelho Vieira, 2015, Algae Europe, EABA, Lisbon, 1-3 december

D'autres experts estiment que l'évolution sera moins marquée, avec la répartition suivante des technologies à l'horizon 2020 :

- Photoautotrophie : 50% ;
- Hétérotrophie : 45% ;
- Mixotrophie : 5%.

D'une manière générale, les milieux d'affaires semblent optimistes sur les perspectives de marché du secteur microalgal : « *The Next Big Superfood Could Be Green and Slimy* » (Baehr, 2014). Cependant, le cas des biocarburants issus de microalgues, porté aux nues par les porteurs de start-up au milieu des années 2000 et un temps suivi par les bailleurs de fonds de la recherche publique et les capitaux-risqueurs selon un effet de mode et une logique de plus-value bien connus, doit inciter à la prudence. En effet, une stratégie de développement durable doit se fonder sur une vision à long terme et en conséquence non spéculative. Une réorientation semble s'être opérée vers les marchés de l'alimentation fonctionnelle, mais elle laisse de côté la question du modèle économique en restant dans une optique trop conventionnelle, alors qu'une transition vers une bioéconomie circulaire territorialisée est attendue.

Prospective Europe et France 2030

Un exercice de prospective du secteur microalgal a été réalisé par l'Inria pour la France à l'horizon 2030 à l'aide d'un modèle multicouche identifiant 4 scénarios, en fonction du type d'algues et de leur technique de culture, de leur orientation productive principale (n'excluant pas d'autres co-produits), des données climatiques, de l'usage des sols et de leurs pentes, de la disponibilité en CO₂ capté et de la présence de stations d'épuration :

- Scénario 1 (production de biocarburants basée sur des intrants industriels), avec 2 sous-scénarios A (culture en raceway) et B (culture en photobioréacteur) ;
- Scénario 2 (production de biens à moyenne et haute valeur ajoutée), avec les 2 sous-scénarios A et B, comme précédemment.

Les tonnages annuels obtenus dans les scénarios résultent des productivités surfaciques d'une part, et des surfaces potentiellement utilisables d'autre part.

Les productivités surfaciques moyennes sont de 14,4 g/m.²/jour pour les raceways et de 25,3 g/m.²/jour pour les photobioréacteurs, soit des rendements de conversion solaire compris entre 1,5 % et 3 %. Ces moyennes cachent de fortes disparités saisonnières et géographiques, les zones les plus productives étant les DOM-COM (de 75% supérieures à la moyenne nationale) et les départements du pourtour méditerranéen (+ 25 %). Cependant, les problèmes de contaminations par des prédateurs ou des virus, non intégrés à la modélisation, peuvent induire des pertes de production de l'ordre de 30 % à 50 %. Ce facteur externe, encore mal maîtrisé est un réel frein au développement de la filière microalgues (Kerlero et Bernard, Ademe, 2015).

Environ 0,27% des terres françaises (150 000 ha) sont techniquement utilisables pour la production de biocarburants en raceway (pente inférieure à 2%, source concentrée de CO₂ et station d'épuration à proximité). Pour une production en PBR, la surface allouable à la culture des algues est estimée à 0,94% du territoire (plus de 500 000 ha), avec des contraintes sur l'utilisation du sol identiques, mais une pente maximale à 5% et aucune limite sur les sources de CO₂ et de nutriments (Ibid).

Les conflits d'usage des sols peuvent limiter le potentiel physique de production. Cette contrainte pourrait cependant être levée par une intégration de la production de microalgues couplée à celle d'énergie par méthanisation dans les exploitations agricoles. Par ailleurs, de nombreuses friches agricoles et industrielles pourraient être mobilisées, notamment dans les régions éloignées des grands centres urbains où se pose un redoutable problème de déprise économique.

TABLEAU 21 : POTENTIEL ANNUEL DE PRODUCTION EN BIOMASSE ALGALE AUTOTROPHE À L'HORIZON 2030 EN FRANCE

SCÉNARIO	S 1A (BASSINS)	S 1B (PHOTOBIORÉACTEUR)
PRODUCTION DE MICROALGUES (M. t ms)	7,1	18,3
BIODIESEL (PART CONSOMMATION TOTALE)	9%	PEU COMPÉTITIF
OU BIOÉTHANOL (PART CONSOMMATION ESSENCE)	20%	PEU COMPÉTITIF
BIOGAZ CO-PRODUIT BIODIESEL (PART CONSOMMATION GAZ NATUREL)	0,3%	PEU COMPÉTITIF

Source : Kerlero de Rosbo G., Bernard O., 2014, 2015, adaptation de l'auteur

Si les perspectives pour les carburants atteignent des ordres de grandeur significatifs (de 10 à 20% de la demande totale de carburants à l'horizon 2030 en France), il n'en va pas de même pour le biogaz, sauf si l'on raisonne sur la base d'un changement de mode d'organisation de la production, en privilégiant la décentralisation énergétique par rapport au modèle actuel des macro-installations industrielles, ce qui est parfaitement envisageable pour la sphère agroalimentaire. La principale contrainte de développement de la production de biocarburants algaux est la nutrition azotée, d'où la nécessité de coupler les unités avec les stations d'épuration, avec couplage des procédés autotrophiques et hétérotrophiques.

Un rapport du Sénat confirme cette analyse, tout en soulignant le potentiel énergétique des microalgues : « Quant aux biocarburants de troisième génération (G3), ils tirent parti de la biomasse algale, c'est-à-dire de microalgues lipidiques ou d'autres algues, riches en cellulose, dont la productivité serait intéressante en raison de leur croissance rapide. La capacité d'un passage au stade industriel n'est pas démontrée pour le moment. Le bilan énergétique et le coût de cette production constituent des freins à son développement. » (Le Déault et al., 2016).

Concernant, les produits à moyenne et haute valeur ajoutée, à l'exception de l'alimentation animale, les perspectives de marché sont nettement moins ouvertes, à moins d'une accélération du changement du comportement des consommateurs telle qu'évoquée ci-dessus.

TABEAU 22 : POTENTIELS DE PRODUCTION ET DE MARCHÉ EN EUROPE POUR LES PRODUITS À MOYENNE ET HAUTE VALEUR AJOUTÉE ISSUS DES MICROALGUES À L'HORIZON 2030

PRODUIT	POTENTIEL PHYSIQUE FRANCE (Kt/AN)		POTENTIEL MARCHÉ		
	HB	HH	TOTAL MARCHÉ CONVENTIONNEL UE (Kt/AN)	PART MICROALGUES	PART MICROALGUES FRANCE
ALGUES ENTIÈRES POUR L'ALIMENTATION ANIMALE ET HUMAINE	15 000	47 500	180 000	2%	0,3%
HUILES POUR POISSON	2 900	6 900	850	85%	15%
OMÉGA 3	570	1 380	100	10%	3%
PIGMENTS	1 020	2 460	20	0,2%	0,1%
BIOPLASTIQUES	910	5 700	560	6%	4%
TOTAL	20 400	63 940			

Source : Kerlero de Rosbo G., Bernard O., 2014, 2015, adaptation de l'auteur

On constate, dans le tableau ci-dessus que le marché de l'alimentation animale est considérable en Europe, avec 180 M.t à l'horizon 2030, ce qui offre aux produits issus des microalgues (protéines et micronutriments) d'importantes perspectives de développement. Sur les autres marchés (santé et biomatériaux notamment), les potentiels en termes de volume sont moindres. Ces marchés sont néanmoins plus accessibles à moyen terme, alors que de forts volumes ne pourront être déployés que dans le couplage dépollution-production d'algoénergies.

En tout état de cause, le potentiel économiquement viable (toutes choses égales par ailleurs, en particulier le prix des carburants fossiles) reste notablement

inférieur au potentiel physique de production. Il faudrait ainsi doubler annuellement sur 2012-2030 la capacité de production française de microalgues pour atteindre le scénario bas de production potentielle (S1A en raceway et intrants industriels), ce qui paraît hautement improbable. Une croissance plus réaliste – et encore très optimiste – de 50% par an des tonnages de microalgues ne conduirait qu'à une utilisation de 1% du potentiel physique. Dans ce contexte, les modèles de co-valorisation restent les plus attractifs (Kerlero de Rosbo et Bernard, 2014).

Des considérations environnementales et sociales accompagnées d'un cadre institutionnel stimulant (système de taxation des externalités négatives et de subvention des externalités positives) pourraient cependant changer la donne sectorielle en bioéconomie.

Éléments de prospective pour les pays méditerranéens

Les variables-clés de la prospective pour les pays méditerranéens impactant le secteur des microalgues ont été décrites dans la 1^{re} partie. Elles relèvent de 3 champs à fortes contraintes :

- La démographie et les ressources humaines ;
- Le climat et les ressources naturelles (Annexe 18) ;
- L'agriculture et l'alimentation.

Ces variables sont à relier à des risques majeurs en termes de sécurité alimentaire et de maîtrise environnementale.

Comme indiqué plus haut, le secteur des microalgues souffre d'un fort déficit informationnel à la fois sur les marchés et sur les acteurs impliqués. Cette situation générale est aggravée dans les PSEM. Il est donc impossible, dans le cadre de ce rapport, de se livrer à un exercice de prospective pour la Méditerranée, incluant les PSEM, tel qu'il a pu être conduit par exemple au plan national en France (Kerlero et Bernard, 2014) ou dans la région PACA (Lerat et al., 2014).

Néanmoins, plusieurs atouts peuvent être mis en avant pour la production microalgale dans les pays méditerranéens, selon l'avis convergent de plusieurs experts (Annexe 19) :

- La présence d'espaces naturels propices (mer, lagunes, terres en friche ou en parcours pastoral) ;
- Le fort ensoleillement, pourvoyeur en énergie gratuite et renouvelable ;
- L'existence d'eaux géothermiques issues des aquifères ;
- Un énorme marché de *bioremediation* ;
- Un secteur aquacole important, en particulier de production de mollusques, avec des problèmes de contamination pouvant être résolus par certaines microalgues (Annexe 20) ;
- Un potentiel d'exportation vers l'Europe de produits à haute valeur ajoutée pour la nutrition ou la cosmétique.

Une analyse SWOT à caractère générique (cf. tableau 23) montre que des opportunités existent en termes de marchés potentiels dans les principaux secteurs des bioressources : agriculture, agro-industries alimentaires et non alimentaires, industries pharmaceutique et cosmétique, énergies renouvelables, bâtiment et infrastructures, gestion des déchets, du fait de la recherche, par les producteurs d'intrants et de composants d'origine naturelle (carbone organique en substitution au carbone fossile).

Les contraintes tiennent aux capacités des facteurs de production de biomasse (principalement terre et eau) pour lesquels se manifestent des conflits d'usage, aux intensités concurrentielles entre produits dérivés du carbone organique et du carbone fossile, au cadre institutionnel (réglementation) et aux barrières à l'entrée (investissements matériels et propriété intellectuelle).

Les **atouts des microalgues** au sein des bioressources viennent des qualités remarquables de leurs produits dans toutes leurs nombreuses applications (alimentation, santé, énergie, matériaux, remédiation), de leur exceptionnelle productivité surfacique (rendements potentiels à l'hectare près de 10 fois supérieur à celui des végétaux cultivés) et donc à une occupation limitée des sols), de leur multifonctionnalité (co-produits) créatrice de valeur.

Les **contraintes des microalgues** proviennent de la nécessité de disposer d'eau en quantité suffisante, ce qui impose – en climat aride et semi aride – une bonne gestion des ressources. Les contraintes sont aussi d'ordre économique, en raison d'une faible compétitivité par rapport aux produits de l'agriculture et de l'industrie conventionnelle, et d'une compétition avec d'autres bioressources. Comme dans tout secteur émergent, des problèmes de choix technologiques se posent, mais devraient être résolus par des programmes d'expérimentation.

TABLEAU 23 : ANALYSE SWOT DES MICROALGUES PAR SECTEUR

DOMAINES	ENSEMBLE DU SECTEUR		MICROALGUES	
	OPPORTUNITÉS	CONTRAINTES	ATOUTS	FAIBLESSE
AGRICULTURE	BESOINS DE MATIÈRES PREMIÈRES POUR DES USAGES ALIMENTAIRES ET NON-ALIMENTAIRES	CONFLITS D'USAGE DES SOLS ET DE L'EAU	PRESSION SOCIÉTALE POUR DES SUBSTITUTS AUX INTRANTS AGROCHIMIQUES	MAITRISE TECHNICO-ÉCONOMIQUE
ALIMENTATION HUMAINE	CROISSANCE QUANTITATIVE (DÉMOGRAPHIE) ET QUALITÉ TOTALE	NUTRITIONNELLE, SOCIALE ET ENVIRONNEMENTAL, RÉGLEMENTATION (NOVEL FOODS)	NATURALITÉ, HAUTE DENSITÉ NUTRITIONNELLE, BIOÉCONOMIE CIRCULAIRE, SURFACE RÉDUITE, TECHNOLOGIE DURABLE	ARTIFICIALISATION DES ALIMENTS (COMPLÉMENTATION OU SUBSTITUTION PARTIELLE), COÛT ÉLEVÉ, DENSITÉ EN EMPLOIS
ALIMENTATION ANIMALE	CROISSANCE QUANTITATIVE, ÉPUISEMENT DES MATIÈRES PREMIÈRES CONVENTIONNELLES (FARINES ANIMALES ET DE POISSON)	NUTRITIONNELLE, SOCIALE ET ENVIRONNEMENTALE	INGRÉDIENTS NATURELS, TENEUR EN NUTRIMENTS DONT PROTÉINES, BIOÉCONOMIE CIRCULAIRE, SURFACE RÉDUITE	COÛT ÉLEVÉ, CONTENU EN EMPLOIS
SANTÉ	CRISE DES MOLÉCULES DE SYNTHÈSE	AMM (AUTORISATION DE MISE EN MARCHÉ)	ENGOUEMENT DES CONSOMMATEURS POUR LA PHYTOPHARMACIE ET CERTAINES BIOTECHNOLOGIES	INVESTISSEMENT R&D ET DÉLAIS
COSMÉTIQUE	BIEN DE GRANDE CONSOMMATION (PAYS ÉMERGENTS)	INVESTISSEMENTS MARKETING	SUBSTITUTION DE COMPOSANTS DE SYNTHÈSE PAR DES PRODUITS NATURELS	COÛT ÉLEVÉ
CARBURANTS	TRANSITION ÉNERGÉTIQUE	COMPÉTITIVITÉ	POTENTIEL BIOMASSIQUE ET DOUBLE FIN, SURFACE RÉDUITE	COÛT ÉLEVÉ
GESTION DES DÉCHETS ET MATÉRIAUX BIOSOURCÉS	ÉNORMES BESOINS	RÉGLEMENTATION	RECYCLAGE GAZ INDUSTRIELS ET STEP + CO-PRODUITS	MAITRISE TECHNOLOGIQUE PARTIELLE
FACTEURS TRANSVERSAUX	PRESSIONS DE LA SOCIÉTÉ CIVILE EN FAVEUR DU DÉVELOPPEMENT DURABLE	RÉGLEMENTATION ET BARRIÈRES À L'ENTRÉE (PRIX ET BREVETS), RISQUE DE SATURATION DES MARCHÉS	SUBSTITUTION C FOSSILE PAR C BIOLOGIQUE ET ANIMAL PAR VÉGÉTAL À HAUTE PRODUCTIVITÉ SURFACIQUE	COÛT ET LISSAGE DE LA PRODUCTION RISQUES DE TOXICITÉ OU DE COMPÉTITION POUVANT COMPROMETTRE LA PRODUCTION « UTILE »

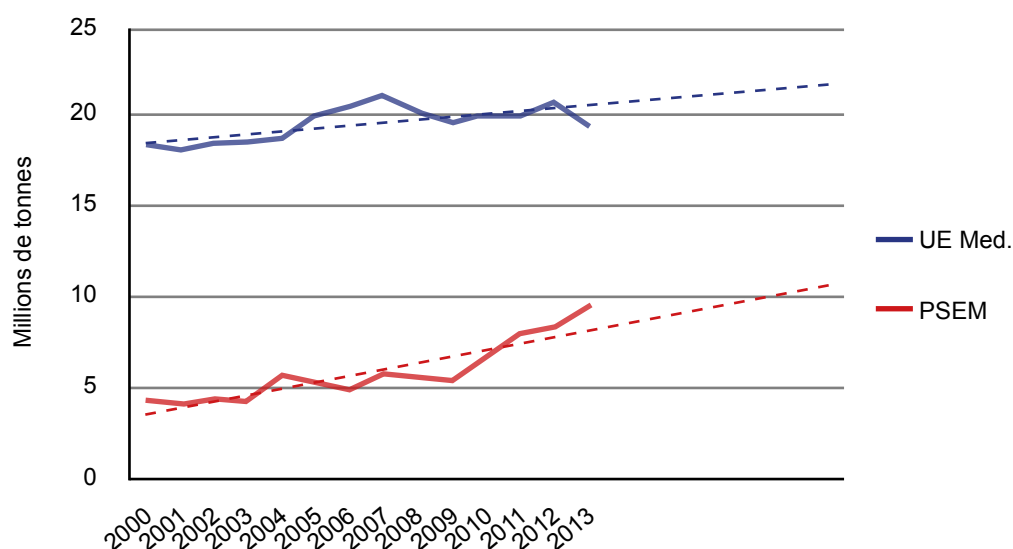
Quels modèles stratégiques pour les microalgues en Méditerranée ?

Ce diagnostic est confirmé par une étude technico-économique menée en France dans la région PACA (Lerat Y., Sassi J.-F., Attia G., 2014). Cette étude comporte outre une présentation des technologies envisageables, un recensement du potentiel des surfaces mobilisables pour la culture des microalgues à l'aide du modèle de Skarka (Skarka, 2012), une évaluation SWOT des forces et faiblesses régionales et une estimation des marchés : agriculture, alimentation humaine et animale, santé, cosmétique, chimie et lutte contre les pollutions. Elle préconise le développement de la filière microalgues en PACA, en priorisant le modèle artisanal des spiruliniers³⁹ dans un schéma agri-algal, avec une labellisation bio, en raison de son impact sur le développement territorial en zone rurale. Un potentiel existe par ailleurs en environnement d'industrie lourde (Etang de Berre, zone de Fos-sur-Mer, projet Vasco II de remédiation des gaz industriels, avec production théorique de microalgues estimée à 440 000 t ms/an) et sur le canal de la Durance (PBR flottants). Le schéma stratégique élaboré pour la région PACA constitue un modèle intéressant pour l'ensemble des régions méditerranéennes.

Dans ce contexte, la bioéconomie circulaire, et en particulier la valorisation des microalgues, apporte des solutions innovantes et pertinentes.

Les microalgues pourraient constituer à moyen terme, sous réserve de politiques agricoles adaptées, un moyen de réduction de la facture des importations d'aliments pour animaux, par substitution du soja en provenance des Amériques par des graines oléagineuses cultivables en zone méditerranéenne (colza et tournesol) et enrichissement protéique à base de microalgues. Les importations d'aliments pour animaux des pays méditerranéens sont passées de 23 à 29 millions de t entre 2003 et 2013, avec une stagnation au Nord et un doublement au Sud, entraînant une dépense en devise de 15 milliards USD en 2013 dont près de 11 milliards pour l'UE-Med (doublement) et plus de 4 milliards pour les PSEM (x 4,5).

GRAPHIQUE 8 : IMPORTATIONS D'ALIMENTS POUR ANIMAUX, 2000-2020



Source : Faostat, 22/03/2016

39 - La région PACA héberge 30% des producteurs français de spiruline.

Par contre, le rôle des microalgues dans la lutte contre l'insécurité alimentaire restera limité en raison d'une faible compétitivité par rapport aux sources végétales classiques de protéines (soja et autres légumineuses) et du poids des céréales dans l'alimentation méditerranéenne, végétaux qui ne peuvent être substitués par les microalgues. Les autres marchés (à l'exception des biocarburants pour les raisons qui viennent d'être invoquées) apparaissent comme porteurs : gestion des déchets, molécules à haute valeur ajoutée pour la nutrition humaine et animale, la santé et les cosmétiques.

Selon les estimations du centre de recherche allemand KIT, les pays méditerranéens de l'Union européenne représentent 85% du potentiel de production de microalgues (soit près de 42 millions de tonnes), grâce à un rendement théorique surfacique 2 à 3 fois plus élevé que dans les autres pays. L'Espagne arrive largement en tête du fait de disponibilités en terres (hors zones agricoles, urbaines, industrielles, forestières et protégées) et d'une productivité élevée (près de 130 tonnes de matière sèche par ha et par an).

TABEAU 24 : POTENTIEL DE PRODUCTION DE BIOMASSE ALGALE DE L'UNION EUROPÉENNE

PAYS	SURFACES DISPONIBLES			POTENTIEL	
	TERRES UTILI-SABLES (km ²)	TERRES UTILI-SABLES À FAIBLE PENTE (km ²)	TERRES UTILI-SABLES À FAIBLE PENTE, HORS ZONES PROTÉGÉES (km ²)	RENDEMENT MOYEN EN t/ha/an	PRODUCTION EN Kt/an
ESPAGNE	11 284	3 182	2 679	126	33 867
SUÈDE	10 524	3 568	2 263	22	3 092
ITALIE	8 583	373	255	102	2 438
PORTUGAL	1 240	288	185	109	2 016
ROYAUME-UNI	4 002	747	386	35	1 352
FRANCE	8 408	322	145	88	1 268
GRÈCE	1 991	158	127	104	1 203
CHYPRE	141	84	75	149	1 109
IRLANDE	340	116	99	60	581
ALLEMAGNE	495	201	97	60	581
UE-27	54 926	10 136	6 655	78	49 171
UE-MÉDITERRANÉENNE	31 647	4 407	3 466	121	41 901
	58%	43%	52%		85%

Source : Skarka, 2012

On observe que le potentiel productif de matière microalgale est particulièrement élevé dans les pays méditerranéens (85% de l'UE) (cf. également Annexe 18). Le risque est donc une saturation rapide du marché, avec une concurrence par les coûts, moins élevés au sud qu'au nord de la Méditerranée (plus de soleil, main-d'œuvre moins chère). D'où la nécessité d'anticiper et de réguler dans le cadre d'une approche stratégique partenariale (filieres de co-production).

En Méditerranée, que ce soit au Nord, dans les régions européennes riveraines ou dans les pays du Sud et de l'Est, des facteurs naturels et socio-économiques font qu'un modèle unique de développement ne doit pas être privilégié en ce qui concerne le secteur des microalgues.

Dans la périphérie des mégalopoles telles qu'Alger, Barcelone, Casablanca, Gènes, Marseille ou Tunis, où sont présentes de grandes usines et où la croissance économique a été mimétique par rapport à celle observée dans les pays à haut revenu, avec un décalage de quelques décennies, il sera possible de bénéficier des technologies mises au point à grands frais dans les pays occidentaux ou au Japon et en Chine. On peut ici imaginer, à proximité des installations industrielles polluantes et des stations de traitement des eaux usées, des unités de bioremediation à base de microalgues.

Concernant ces méga-structures qui relèvent de grandes firmes, les investissements immatériels (R&D, formation) et matériels (construction des installations de production), le financement doit provenir des entreprises et des marchés financiers classiques. Le schéma classique des IDE (investissements directs étrangers) dans le cadre de Joint-Ventures avec les conglomérats industriels nationaux devrait pouvoir s'appliquer. Il serait facilité par un accord euro-méditerranéen sur l'investissement et bien sûr par l'instauration d'un climat propice aux affaires.

Par contre, pour les **zones rurales** éloignées des centres urbains importants, presque toujours situés sur le littoral, et victimes de la « fracture territoriale » en grande partie à l'origine des révolutions arabes, des solutions originales doivent être trouvées qui appellent un soutien des États et de la communauté internationale, notamment de l'Europe.

Dans ces régions, il s'agit de mettre en place un développement rural durable intégré. La principale ressource dans ces espaces étant l'agriculture et ses filières, il faut résolument se situer dans le cadre de la « bioéconomie circulaire territorialisée » déjà évoquée.

Plus précisément, le modèle économique devra se fonder sur d'une part des entreprises à taille humaine ancrées territorialement, d'autre part sur leur mise en réseau assurant une triple proximité.

Les entreprises rurales à taille humaines sont tout d'abord les exploitations agricoles familiales qui constituent encore aujourd'hui l'essentiel de l'agriculture dans le monde et font vivre directement ou indirectement (à travers leurs achats en amont et leurs ventes en aval) plus du quart de la population en Méditerranée du Sud et de l'Est et 5% sur la rive nord. Liés par leurs intrants ou extrants à l'agriculture, un grand nombre de TPE artisanales et de PME interviennent, sur un territoire donné, pour la production, la transformation et la commercialisation des produits agricoles. Plus récemment, il s'est ajouté à cette activité de production de biens (principalement les aliments), celle de services tels que le tourisme vert (gîtes et tables d'hôtes). Demain, à ces activités viendront s'ajouter des co-produits écosystémiques (rémunération pour la protection de l'environnement et des paysages, la gestion des déchets), énergétiques et non alimentaires issus des biorafineries (matériaux).

Une **bioéconomie circulaire territorialisée** est nécessairement fondée sur une triple proximité : en premier lieu une proximité dans l'écosphère, par diversification des productions agricoles, en « reconnectant » les filières végétales, animales et forestières, selon les préceptes de l'agroécologie leur conférant une résilience au changement climatique. Dans ce contexte, la nouvelle entreprise agricole est multifonctionnelle (production de matières premières, d'énergie, de services écosystémiques et d'activités de loisirs). La seconde proximité concerne le rapprochement entre agriculture et industries alimentaires ou non-alimentaires.

Un rapprochement qui se fera en approvisionnant en priorité les unités de transformation avec des matières premières agricoles de la région où elles sont implantées, et en mobilisant des biotechnologies innovantes et durables. La troisième proximité se fait à travers une réorientation du sourcing alimentaire et non-alimentaire vers une offre locale plus abondante et variée, de qualité plus aisément vérifiable, avec une information fiable et complète, notamment sur l'origine des composants des produits. L'évolution à noter ici est le déclin des filières longues, prédatrices et opaques du modèle agroindustriel globalisé.

La proximité implique la mise en réseau des acteurs (agriculteurs, artisans, industriels et commerçants) afin de faciliter la mutualisation des ressources humaines, technologiques et matérielles telles que les intrants. Cette mutualisation a pour objectif d'améliorer la performance économique d'acteurs de taille réduite en abaissant leurs coûts de revient, mais aussi en leur permettant de s'intégrer et de se coordonner dans une stratégie territoriale généralement soutenue par une marque ombrelle.

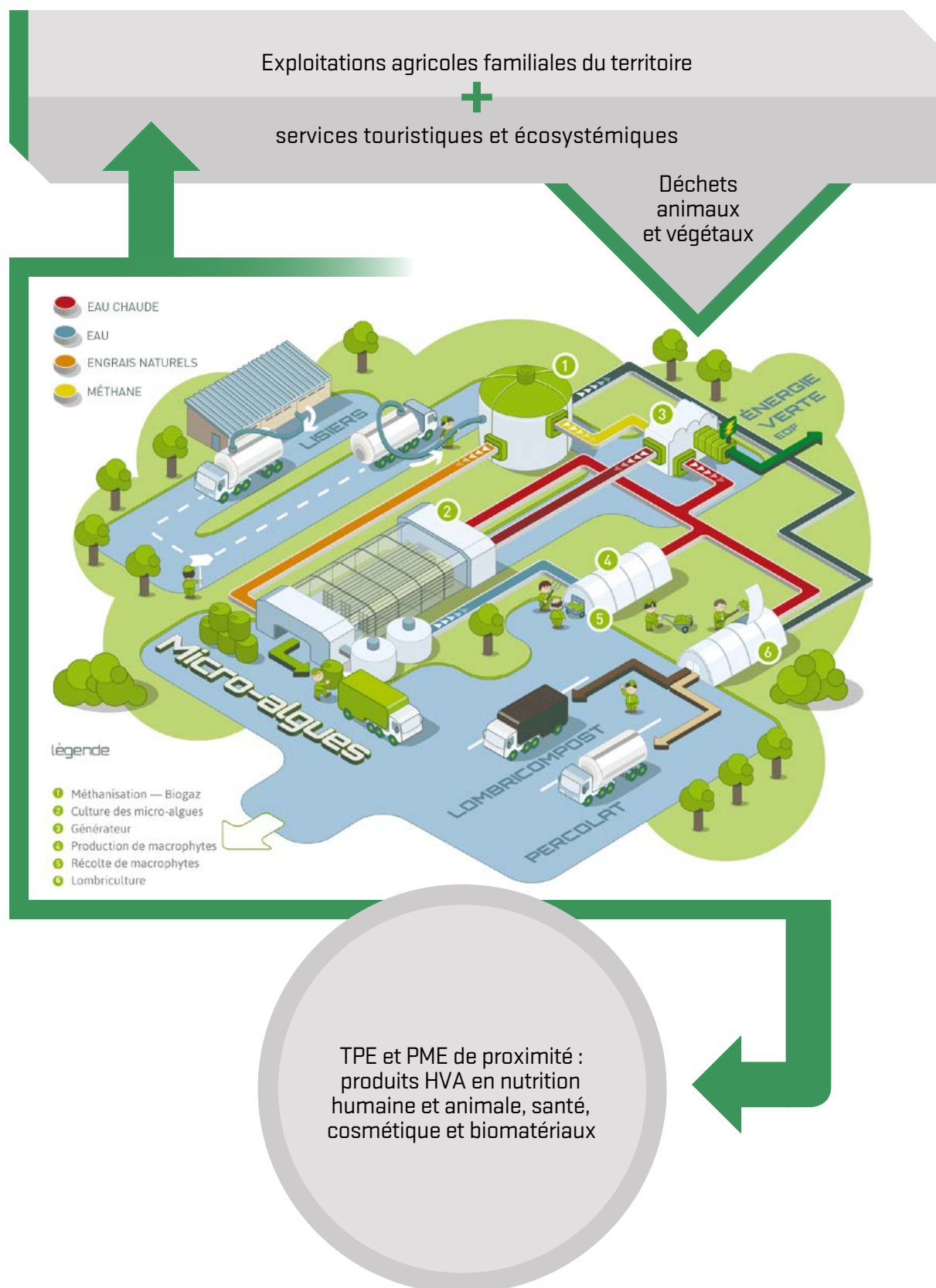
Le développement rural durable intégré sera structuré et stimulé par des entreprises agricoles, artisanales, industrielles et commerciales tirant leurs ressources de la bioéconomie et leur efficacité d'un réseau d'échange facilité par des capteurs d'informations (agriculture de précision, traçabilité et logistique), les connexions Internet et une plateforme commune de stockage et partage des données produites par les acteurs du réseau. La synergie entre les biotechnologies - au sein desquelles les microalgues devraient occuper une place de premier plan - et les technologies de la communication seront les outils de ces entreprises rurales post-modernes. Un tel scénario est cohérent avec la vision du prospectiviste de l'université Wharton aux États-Unis, Jeremy Rifkin, qui imagine une 3e révolution industrielle s'appuyant sur les énergies renouvelables (dont la biomasse), Internet et une large décentralisation des activités productives (Rifkin, 2011).

Un exemple intéressant de ces entreprises du 3e type est donné par le projet LDC Algae de René-Jean Guillard localisé à Plouguenast dans les Côtes-d'Armor en France (cf. figure 3). LDC Algae est une ferme de culture de microalgues utilisant un procédé de fermentation (méthaniseur) permettant de gérer et de valoriser l'abondante production de lisier des porcheries du territoire en générant de l'électricité et de la matière première recherchée par des entreprises agroalimentaires et cosmétiques locales pour des fabriquer des produits biosourcés venant en substitution d'ingrédients issus de la chimie de synthèse. La ferme LDC Algae devrait créer 40 emplois, pour un investissement de 30 M. €. On voit qu'elle génère des activités économiques de proximité en amont et en aval de sa production, en mobilisant un tissu d'exploitations agricoles et de PME, illustrant bien ainsi le concept de « bioéconomie circulaire territorialisée ».

Les statuts de l'économie sociale et solidaire et particulièrement ceux des coopératives sont bien adaptés à la création de fermes microalgales puisque leurs intrants proviendront d'agriculteurs du voisinage. La gouvernance est ici homothétique des objectifs du développement durable : sociétés de personnes et non pas de capitaux, adhérents fournisseurs, transformateurs et clients, solidarité économique et sociale, exclusivité territoriale.

40 – Ce montant d'investissement dont on ne connaît pas la méthode de calcul semble, selon certains des experts consultés, largement surestimé. En tout état de cause, seule des modèles low cost – qui existent – sont envisageables dans les contextes des zones rurales périphériques évoquées ici.

FIGURE 4 : LES MICROALGUES, FONDEMENT D'UNE BIOÉCONOMIE CIRCULAIRE TERRITORIALISÉE



CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS⁴¹

Le secteur des microalgues dispose d'une **potentialité importante** dans le contexte de la transition d'une économie basée sur les ressources fossiles et l'industrie de masse globalisée vers une « bioéconomie circulaire et territorialisée » répondant à une demande croissante de la société civile.

En effet, les algues, et en particulier le plancton microalgal riche de sa diversité, de son fonctionnement physiologique et situé dans les mers, les lagunes et les eaux douces, représentent la moitié du gisement mondial en biomasse, avec un effet « puits de carbone » correspondant. Or les ressources renouvelables et leur valorisation à travers des processus de bioraffinerie envisagés dans un contexte de durabilité (externalités positives environnementales et sociales) sont appelées à un grand avenir, d'autant plus qu'elles peuvent contribuer à la résilience au changement climatique.

Les microalgues présentent de **nombreux avantages**. En premier lieu, du fait de leur physiologie : croissance en mode photosynthétique utilisant l'énergie solaire et le CO₂ atmosphérique ou provenant de fumées industrielles en mode hétérotrophique, et émettant de l'oxygène ; nutriments (azote et phosphore non organiques) issus de déchets de toutes sortes, dont les eaux usées. Autre avantage, les métabolites produits aux applications multiples en santé : prévention de certaines maladies comme la DMLA ou Alzheimer et correction de carences en micronutriments et protéines ; en cosmétique (composants naturels) ; en nutrition animale et humaine (colorants, texturants, arômes, acides gras insaturés et acides aminés essentiels) ; en chimie du végétal (concept de bioraffinerie) et industries de fermentation, voire en biocarburants (notamment pour les avions, les autres véhicules s'orientant plutôt vers l'électricité ou l'hydrogène).

Un autre atout des microalgues se situe au niveau de leurs conditions de production par rapport aux autres sources biomassiques : elles ont une productivité par unité de surface très supérieure grâce à leur multiplication très rapide (production en continu sur 7 mois en région septentrionale et 10 mois en zone méditerranéenne, soit 5 à 10 fois plus qu'en production agricole conventionnelle) et le facteur 3D. De plus, les installations de production peuvent se faire sur des sols de qualité non agricole, en bassin ou en lagunes saumâtres ou alcalines, évitant ainsi des conflits d'usage de la terre et de l'eau et donc des tensions sur les marchés de produits alimentaires qui sont très volatiles. Troisièmement, le niveau de pollution des sites productifs est faible et maîtrisable, grâce à la facilité de recyclage des intrants fertilisants. Enfin, le potentiel de capture et réutilisation du CO₂ atmosphérique (en valorisant le carbone) est très supérieur à celui des cultures et de la forêt.

Les contraintes qui ralentissent ou fragilisent le développement du secteur des microalgues partout dans le monde tiennent d'une part à la multiplicité des sources de biomasse valorisables (forêts, agriculture et élevage, industries agroalimentaires, déchets urbains) créant une concurrence parfois asymétrique, et d'autre part aux modèles technologiques (extensifs/intensifs) et d'affaires (capitaux et coûts) majoritairement en phase de test et donc encore non maîtrisés.

41 – Tous nos remerciements à Olivier Bernard (Inria), Christian Briand (BpiFrance), Afaf Kord (université d'Oran), Jean-Paul Sassy (CEA), Imane Wahby (Fondation Mascir) qui ont bien voulu relire ce chapitre conclusif et suggérer des améliorations au texte initial.

Les applications des microalgues sont multiples et ouvrent de nouveaux marchés.

En agriculture (fertilisants et produits de traitement phyto et zoo-sanitaires « SDN »/simulateurs de défenses naturelles biosourcés et phytohormones en substitution aux molécules de synthèse), le marché est en croissance rapide en accompagnement du développement des productions « bio » dans le monde entier et dans un contexte global de demande de réduction des intrants chimiques (Zéro Phyto, etc). D'autre part le secteur artisanal agri-algal combinant production agricole et de microalgues est un modèle correspondant bien aux critères du développement durable (cf. infra la préconisation en faveur d'une bioéconomie circulaire territorialisée).

Pour les molécules à haute valeur ajoutée (santé, cosmétique, alimentation), le marché semble proche de son décollage du fait de la pression des consommateurs en faveur des compléments alimentaires à allégations santé et des produits naturels à connotation « bio » ; et **pour le recyclage des déchets industriels et organiques**, en raison d'un bilan économique proche de l'équilibre sous réserve d'incitations réglementaires, en dépit de lourds investissements.

Pour les autres applications (protéines pour l'alimentation animale de complément, notamment en aquaculture) le marché est réceptif sous réserve des aspects sanitaires, réglementaires et des volumes demandés. Quant aux biocarburants, l'horizon de développement apparaît plus lointain (10 à 30 ans). Les produits visés (alimentation et énergie) font l'objet d'une production de masse et/ou de marchés spéculatifs actuellement déprimés (céréales, oléoprotéagineux, pétrole) qui peuvent limiter leur expansion.

Dans ce contexte, on comprend que plusieurs grands programmes de R&D et de nombreuses start-up aient vu le jour depuis une quinzaine d'années dans les pays à hauts revenus et émergents, principalement en Europe, Amérique du Nord et Asie de l'Est.

L'analyse SWOT conduit à considérer qu'en Europe et en France en particulier, mais aussi dans l'ensemble des pays méditerranéens, face aux faiblesses du secteur des microalgues et aux défis à relever, les efforts à consentir restent considérables en termes de R&D (et donc en budget consacré à l'innovation) et d'investissements matériels (unités de production) et immatériels (formation et communication).

La Méditerranée et particulièrement les PSEM, se trouvent confrontés à de redoutables défis relevant de problématiques :

- sociales (créer 66 millions d'emplois entre 2015 et 2030 et 71 millions entre 2030 et 2050, soit plus de 5 millions par an);
- alimentaires (nourrir 125 millions de bouches supplémentaires d'ici à 2050) en assurant une nourriture de qualité en quantité suffisante, malgré une raréfaction des ressources en eau et un changement climatique;
- environnementales (réduire des pollutions multiples terrestres et marines et assurer qualité de l'air, de l'eau et des espaces).

Compte tenu de la rareté des ressources en biomasse, d'un ensoleillement exceptionnel et de l'importance des surfaces maritimes et lagunaires, les microalgues pourraient constituer une opportunité dans cette région, mais ne répondraient qu'indirectement et marginalement au défi de la sécurité alimentaire. En effet, la sécurité alimentaire durable suppose une auto-production de qualité, en quantité suffisante (principe de souveraineté alimentaire). Or les microalgues ne peuvent prétendre à une production alimentaire abondante, car elles ne sont pas compétitives par rapport aux sources de protéines végétales telles que les légumineuses indigènes et la domination du soja. Le même raisonnement concerne les biocarburants algaux. Par contre, les microalgues conviennent pour des situations de graves carences alimentaires ponctuelles en produits nutritionnels d'urgence. Dans toutes leurs autres applications, les microalgues sont pertinentes dans le bassin méditerranéen : dépollution, agriculture, ingrédients pour l'alimentation humaine et animale, alicaments.

Il importe d'imaginer **un modèle économique adapté** aux contraintes géographiques méditerranéennes qui présentent une configuration dichotomique en fonction du milieu : d'un côté des mégapoles côtières insérées dans un espace industriel et des infrastructures denses, de l'autre un espace rural souvent enclavé et sous-équipé.

Dans le premier cas, les technologies occidentales, japonaises ou chinoises ou celles qui émergent localement devraient convenir et seront mobilisées par les grandes firmes des énergies conventionnelles par autofinancement et recours au marché financier. Un marché prometteur de dépollution et de co-produits sera stimulé par les accords de la Cop 21.

Dans le second cas, il s'agit de promouvoir un développement rural durable intégré. Un nouveau modèle économique est à inventer. Il sera fondé sur le concept de « **bioéconomie circulaire territorialisée** » et son socle sera l'agriculture familiale mise en réseau avec son amont et son aval en s'appuyant sur des capteurs et des plateformes de mutualisation de connaissances, d'intrants et de canaux logistiques. Les microalgues élevées sur la base de procédés robustes pourront jouer un rôle important de gestion de déchets et de source de co-produits énergétiques et alimentaires à haute valeur ajoutée. Par exemple, des fermes microalgales – souvent dans une forme coopérative - trouveront leurs intrants dans la méthanisation et le compostage de lisiers animaux ou de végétaux non comestibles en s'approvisionnant auprès des exploitations agricoles du territoire et susciteront en tant que fournisseurs de biomasse des activités nouvelles ou complémentaires dans les PME agroalimentaires, cosmétiques et chimiques de leur proximité.

Recommandations stratégiques

Le développement de filières microalgales dans les pays méditerranéens suppose la définition de stratégies nationales coordonnées au-delà des frontières au niveau régional euro-méditerranéen et des dispositifs adaptés aux besoins locaux dans la chaîne des savoirs (R&D, formation), les entreprises et le secteur public. Une grande attention doit être accordée à la structure de la chaîne de valeur en termes de dimension des acteurs et de répartition des coûts et des marges (recherche d'un équilibre dans les pouvoirs de marché).

En amont (R&D)

- Objectif : *création d'un **consortium de laboratoires dans les pays méditerranéens** qui pourrait se faire à l'initiative du « Pôle Mer Méditerranée » de Toulon, par rapprochement avec des partenaires scientifiques en Espagne, Grèce, Italie, Portugal et dans les PSEM.*
- Supports proposés : L'European Research Network ER-Net ARIMNet (Agricultural Research in the Mediterranean Network), piloté en France par l'ANR et financé par l'UE pourrait jouer un rôle dans cette opération, à travers le montage d'un réseau spécifique ER-Net Microalgae Med. Autre option possible, le dispositif H2020 « Blue-Growth » qui comprend un volet MED.
- Actions :
 - ◊ Identifier et caractériser les espèces microalgales, les procédés, les technologies et les business model d'intérêt pour la zone méditerranéenne ;
 - ◊ Procéder à des scale up (projets pilotes ; projets de démonstration) permettant de trier les espèces et de retenir les plus intéressantes du point de vue économique, social et environnemental ;
 - ◊ Créer une banque de souches (dont éventuellement des souches OGM pour les applications à visées industrielles) ou mettre en réseau les banques de souches existantes ;
 - ◊ Développer des techniques de gestion de l'eau en climat aride et semi-aride ;
 - ◊ Monter une banque de données sur les brevets.

Au niveau des entreprises

- Objectif : *lancement d'un observatoire et d'une plateforme collaborative sur les entreprises microalgales en Méditerranée et montage d'un **cluster de bioéconomie microalgale circulaire territorialisé dans un pays méditerranéen**, couplé à un centre de formation et à un réseau d'organismes de R&D.*
- Support proposé : ANIMA

- Actions :
 - ◊ Susciter des créations d'entreprises en lien avec les universités et la recherche (incubateurs), en privilégiant le développement rural par des groupements d'exploitations agricoles familiales multifonctionnelles (matières premières animales et végétales, valorisation par des co-produits issus des microalgues, notamment énergétiques, services éco-systémiques et touristiques) ;
 - ◊ Formation de personnel qualifié et vulgarisation/formation pour les opérateurs d'installations en zones rurales ;
 - ◊ Mise en réseau et mutualisation de moyens ;
 - ◊ *Learning by doing* et effets d'entraînement sur les acteurs potentiels à partir du pilote et de l'observatoire.

Au niveau du secteur public

- Objectif : *formulation de **plans stratégiques nationaux** « microalgues et bioéconomie circulaire territorialisée ».*
- Support proposé : Agences nationales de développement
- Actions :
 - ◊ Fixer un cap pour le secteur microalgal ;
 - ◊ Simplification administrative pour la création d'entreprises et leur management ;
 - ◊ Ajuster la réglementation pour permettre une mise en marché avec un droit à l'expérimentation, un allègement de certaines procédures dans le respect de la traçabilité et de la sécurité des hommes, des animaux, et de l'environnement,
 - ◊ Incitations à l'investissement ;
 - ◊ Fiscalité stimulante ;
 - ◊ Faciliter l'installation de pilotes industriels permettant des tests de marchés ;
 - ◊ Programme national de R&D, de formation et de veille technologique et économique.

Au niveau de la coopération euro-méditerranéenne

- Objectif : *Élaborer un **Plan stratégique euro-méditerranéen** « microalgues et bioéconomie circulaire territorialisée »*
- Support proposé : IPEMED et UE (Volet spécifique de l'instrument européen de la politique de voisinage (IEPV), programmes INTERREG V et WestMed), avec mise en place de filières de co-production (spiruline dans un premier temps).
- Actions :
 - ◊ Programme régional de coopération scientifique et technique ;
 - ◊ Incitation au montage de filières de co-production euro-méditerranéenne selon les préconisations d'IPEMED.

Parmi les multiples ressources de la biomasse mobilisables, les microalgues constituent une voie très prometteuse, sans pouvoir toutefois prétendre à elles seules constituer la solution à toutes les questions posées par un développement durable en raison de la dimension des enjeux et de la concurrence avec d'autres possibilités de *biosourcing*, alors que les ressources financières sont contraintes. Il appartient en conséquence aux acteurs de la filière microalgale de s'organiser pour atteindre une taille critique par stratégie coopérative pour convaincre les décideurs politiques et économiques des atouts du secteur.

BIBLIOGRAPHIE

Agria Lorraine, 2015, *Dossier microalgues*, 34, Vanapa-Lorraine, Vandoeuvre-Lès-Nancy : pp. 2-3

Assemblée générale des Nations Unies, 2015, *Transformer notre monde : le Programme de développement durable à l'horizon 2030*, 70^e session, ONU, New York : 39 p.

Baehr L., 2014, The Next Big Superfood Could Be Green And Slimy, *Business Insider Europe*, Jul. 22, London : 4 p.

Bécognée M., 2014, LDC Algae, La ferme du futur des microalgues en Côtes-d'Armor, *Ouest France*, 21 janvier

Bekaye M. coord., 2012, Le secteur des énergies renouvelables en Afrique du Nord : situation actuelle et perspectives, Uneca, Nations Unies, Rabat : 109 p

Benemann J.R., 2014, *Roadman to Commercialization of Algal Bioproducts – From specialities to Commodities*, European Algae Biomass Symposium, may 6-7th, Sevilla: 79 slides

Ben Ouada H., 2016, *3^e Journée Internationale d'Information sur les Phototrophes Aquatiques et Biotechnologie : Production des microalgues. Etat des lieux et perspectives*, Mahdia, Tunisie - 15 Mars 2016, ATIS (Association Tunisienne pour l'Information Scientifique)

Boucher L, Vermeire JJ, 2015, *Analyse de la faisabilité d'un couplage de production de biogaz et de spiruline*, ADEME, 85 pp <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/couplagemethaspirulineademe.pdf>

Bougaran G., Saint-Jean B., 2014, Microalgues : de petits végétaux aux grandes promesses, *Biofutur*, 360, Paris : 28-31

Bourlion N., 2015, *Forest and water : Overview in the Mediterranean*, UNEP-MAP-Plan Bleu III European Forest Week, Silva 2015, Engelberg : 19 slides

Buono, S., Langellotti, A. L., Martello, A., Rinna, F., & Fogliano, V., 2014, Functional ingredients from microalgae. *Food & function*, 5(8), 1669-1685.

Chader S., Touzi A., 2001, Biomasse Algale : Source Energétique et Alimentaire, *Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse* : 47-50

Courteau R., 2011, *La pollution de la Méditerranée : état et perspectives à l'horizon 2030*, OPECST, Assemblée nationale, n° 3589, Sénat, n° 652, Paris : 188 p.

Cummerwie E., 2015, *La Méditerranée et la sécurité alimentaire : le rôle des microalgues*, Présentation ppt, Bonn : 25 diapos

De Reviers B., 2011, *Biologie et phylogénie des algues*, t.1, Belin, Paris : 352 p.

Delrue F., P. Setier, C. Sahut, L. Cournac, A. Roubaud, G. Peltier, and A.K. Froment, 2012, An economic, sustainability, and energetic model of biodiesel production from microalgae., *Bioresource technology*, vol. 111, pp. 191–200, May 2012.

ENEA Consulting, 2011 *Le potentiel des microalgues*, Bioenergy International, Ed., Paris

Fernandez-Sevilla J.M., 2014, *Conceptual scheme of an integrated, microalgae-based, continuous two-step process for H₂ production in closed photobioreactors*, EMBS, Almeria: 157-165

FranceAgriMer, 2012, *L'observatoire national des ressources en biomasse, Evaluation des ressources disponibles en France*, Les études de FranceAgriMer, Paris : 92 p .
Actualisation 2015 : <http://www.franceagrimer.fr/content/download/15926/119849/file/2015-Publication-ONRB-VF.pdf>

Ghobara, Mohamed M., Vandana Vinayak, David Roy Smith, Benoît Schoefs, Ille, C. Gebeshuber, Richard Gordon, 2015, *Diatom Frustules as Photo-regulators of Diatom Photobiology*, Conference: National symposium on Horizons of light in molecules, materials and daily life, December 18-19, Sagar, India

Gouveia L., Reis A., Moura P., Oliveira C., Girio F., 2015, Microalgae for biofuels : the Portuguese experience, National Laboratory of Energy and Geology (LPEG), *Watch Letter*, 32, Ciheam, Paris : 10 p.

Guallar-Morillo C., Chapelle A., Bacher C., 2015, *Effet des changements environnementaux sur les communautés phytoplanctoniques et évaluation des risques d'efflorescences d'algues toxiques*, Rapport intermédiaire projet AELB PhytoRisk, Ifremer ODE/DYNECO/Pelagos, Nantes : 56 p.

Gudin C., 2013, *Histoire naturelle des microalgues*, Odile Jacob, Paris : 189 p.

Gudin C., Bernard O., 2013, *La culture de l'invisible & le rêve porté par les microalgues*, Les Editions Ovadia, Nice : 107 p.

Guiry, M.D. & Guiry, G.M. 2016. *AlgaeBase. World-wide electronic publication*, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; searched on 17 February 2016.
<http://www.algaebase.org>

Hallegatte S., Somot S., Nassopoulos H., 2008, *Région méditerranéenne et changement climatique : une nécessaire anticipation*, Ipemed, Col. « Construire la Méditerranée », Paris : 63 p.

Hubert B. (coord.), 2014, *Le bassin méditerranéen à l'horizon 2030, quels défis à relever pour la mer Méditerranée ? Atelier de réflexion prospective, MERMED, Agropolis, Montpellier : 236 p.*

Kerlero de Rosbo G., Bernard O., 2014, 2015, *Ressources algales pour l'énergie et la chimie en France à l'horizon 2030*, ENEA Consulting, INRIA, ADEME, Paris : 122 p. + Annexes 49 p.

Le Déaut J.-Y., Courteau R., Sido B., 2016, *De la biomasse à la bioéconomie : Une stratégie pour la France*, Rapport au nom de l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, N° 3489, Assemblée Nationale, N° 380, Sénat, Paris : 194 p.

Le Mouël C., A. Forslund, P. Marty, S. Manceron, E. Marajo-Petitzon, M.-A. Caillaud et B. Schmitt, 2015. *Le système agricole et alimentaire de la région Afrique du Nord – Moyen-Orient à l'horizon 2050 : projections de tendance et analyse de sensibilité*. Rapport final de l'étude réalisée pour le compte de Pluriagri, Paris et Rennes : INRA-DEPE & INRA-SAE2, 133 p.

Lerat Y., Sassi J.-F., Attia G., 2014, *Action microalgues en région Provence-Alpes-Côte d'Azur*, Pôle Mer Méditerranée, Trimatec, Marseille

Loriot B., Rastoin J.L., Ben Zid R., Ayadi N., Champetier Y., 2013, *Formulation du Programme d'actions pilotes de l'initiative européenne ENPARD* (European neighborhood program for agricultural and rural development) pour la Tunisie, Délégation de l'UE, Tunis, Ciheam-Iam, Montpellier : 268 p

Luo, T., R. Young, and P. Reig. 2015. *Aqueduct projected water stress rankings. Technical note*. Washington, DC: World Resources Institute, August 2015. Available online at <http://www.wri.org/publication/aqueduct-projected-water-stress-country-rankings>

Milano M., 2013, *Eau et changements climatiques en Méditerranée : Quelles stratégies pour une meilleure gestion des ressources en eau ?* Plan Bleu, Séminaire SHF, prospective et tensions sur l'eau en 2050, Paris : 38 diapos

Milano M., Ruelland D., Fernandez S. et al., 2012, Facing climatic and anthropogenic changes in the Mediterranean region : What will be the medium term impact on water stress ? *C.R. Geoscience*, 344 : 432-440

Mimouni V., Ulmann L., Pasquet V., Mathieu M., Picot L., Bougaran G., Cadoret J.-P., Morant-Manceau A., Schoefs B., 2012, The Potential of Microalgae for the Production of Bioactive Molecules of Pharmaceutical Interest, *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 13, 2733-2750

Muller-Feuga A., 2013, *Microalgae for Aquaculture : The Current Global Situation and Future Trends*, in Handbook of Microalgae Culture, Second Edition, Amos Richmond and Qiang Hu, John Wiley & Sons Ltd, Blackwell Publishing Ltd, London: 613-625

Maniatis K., 2010, *Biofuels from algae: Results of the 2010 FP7 Call*

Musset L., coord., 2015, *Biomasse algale pour l'énergie*, FIST SA, CNRS INIST, Tech2Market 693 pages
<http://allianceenergie.fr/Biomasse-algale-pour-lenergie.aspx>

OCDE, 2009, *La bioéconomie à l'horizon 2030. Quel programme d'action ?*, 2009, OCDE, Paris : 367 p.

Padilla M., 2012, *La diète méditerranéenne, parangon mondial, Est-elle durable du champ à l'assiette ?* Colloque du cinquantième anniversaire du CIHEAM, Montpellier : PPT, 22 diapos

Pedroni P., Davison J., Beckert H., Bergman P., Benemann J., 2001, A Proposal to Establish an International Network on Biofixation of CO₂ and Greenhouse Gas Abatement with Microalgae, *Journal of Energy & Environmental Research*, 1(1), USDE: 136-150

Person J. (coord.), 2011, *Livre Turquoise : Algues, filières du futur*, Actes du colloque Algues, Adebitech, Romainville, 17-19 novembre 2010, 182 p.

Piante C., Ody D., 2015, *Blue Growth in the Mediterranean Sea: the Challenge of Good Environmental Status*, MedTrends Project Report, WWF-France, Paris: 192 p.

Polycarpou P. (coord.), 2013, *Production of Biodiesel from Algae in Selected mediterranean Countries*, Med-Algae, Summary Report, Partner Experience, WP1, DI.9: Summary report of partner experience, EU ENPI Project n° I-B/2.2/099, Athens : 48 p.

Polycarpou P. (coord.), 2013, *Production of Biodiesel from Algae in Selected mediterranean Countries*, Med-Algae, Summary Report, Partner Experience, WP1, DI.8: State of the Art – International Report, EU ENPI Project n° I-B/2.2/099, Athens : 80 p.

Priyadarshani I. and Rath B., 2012, Commercial and industrial applications of micro algae – A review, *J. Algal Biomass Utiln.* 2012, 3 (4): 89–100

Proux V. (dir.), 2015, *Biotechnologies : Les promesses du vivant*, Editions fyp, Supbiotech, Paris : 254 p.

Rastoin J.L., Gherzi G., 2010, *Le système alimentaire mondial : concepts et méthodes, analyses et dynamiques*, éd. Quae, Paris : 565 p.

Rastoin J.L., Bourgeois L., Cheriet F., Mohavedi N., 2012, *Pour une politique agricole et agroalimentaire euro-méditerranéenne*, Ipemed, Col. « Construire la Méditerranée », Paris : 86 p. <http://www.ipemed.coop/fr/publications-r17/collection-construire-la-mediterranee-c49/pour-une-politique-agricole-et-agroalimentaire-euro-mediterraneeenne-a1494.html>

Rifkin J., 2011, *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, The Economy, and The World*, Palgrave Mac Milan: 270 p.

Sahnouni F. et al, 2014, Caractérisation moléculaire et valorisation de cinq souches marocaines de *Dunaliella salina* cultivées en saumure, *Bulletin de l'Institut National des Sciences de la Mer*, INSTM Salammbô. Numéro Spécial (18) : Actes du IX^{ème} Congrès Maghrébin des Sciences de la Mer Sousse : 95-100

Saleh D., Hanna L., Abdelkader O., Mouneimne Y., Bouhadir K., Saoud I., Tzovenis I., Abou Jawdah Y., 2014, *Potential Biodiesel Production from Four Green Microalgae Cultures Collected off the Lebanese Coast*, 2nd Renewable Energy for Developing Countries – REDEC 2014, November, 26-27, Beirut : 230-236

Sergent D., 2013, Les algues, eldorado de demain, *La Croix*

SESAME, 2015, *Sécurité alimentaire et changement climatique en Méditerranée et Afrique de l'Ouest. Quel agenda d'action pour la COP 21 ?*, 3e séminaire, Paris, 23 février, CGAAER, CGDA, AFD, ministère des Affaires étrangères, Fondation Farm, Synthèse : 6 p.

Sialve B., Steyer J.-P., 2013, Les microalgues, promesses et défis, *Innovations Agronomiques* 26 (2013), Paris : 25-39

Skarka J., 2012, Microalgae Biomass Potential in Europe. Land Availability as a Key Issue *Technology Assessment – Theory and Practice, (TATuP)*, 1 (21), Kit, Karlsruhe: 72-79

Spolaore, Pauline and Joannis-Cassan, Claire and Duran, Elie and Isambert, Arsène ; 2006, Commercial Applications of Microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 101 (n° 6). pp. 201-211.

Steyer J.-Ph., 2014, *Integration of algal production system with water-treatment plants and CO2-emitting industries*, EMBS, Almeria : 122-135

Titica M., 2012, *Valorisation des microorganismes photosynthétiques : de la capture biologique de CO2 à la production de vecteurs énergétiques*, Diaporama GEPEA, Université de Nantes : 51 p.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2014, *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*, CD-ROM Edition. <http://esa.un.org/unpd/wpp/Download/Standard/Population/>

Van Iersel S., Flammini A., 2010, *Algae based biofuels, applications and co-products*, Working paper, 44, GBEP, FAO, Roma

Verdelho Vieira V., 2014, *Beyond Biofuels from Microalgae: Food, Feed and Fiber*, EMBS, Almeria: p.106

Verdelho Vieira V., 2014, Microalgae for Fuels and Beyond: the leading trends in 2013, *ISAP Newsletter*, (2-2014), Calipatria, CA: 6-17

Verdelho Vieira V., 2015, *Microalgues Production Business in Europe 2015*, Algae Europe, EABA, Lisbon, 1-3 december

LISTE DES TABLEAUX, GRAPHIQUES, FIGURES ET ENCADRÉS

Tableau 1 – Population des pays riverains de la Méditerranée.....	10
Tableau 2 – PIB et croissance économique contrastés	12
Tableau 3 – Commerce extérieur de marchandises déficitaire, 2014	13
Tableau 4 – Exposition des pays méditerranéens au stress hydrique en 2030.....	14
Tableau 5 – Impact potentiel du changement climatique sur le rendement en blé	15
Tableau 6 – Terres et eaux intérieures en Méditerranée	16
Tableau 7 – Bilan des opportunités et des menaces pour un développement durable de pays méditerranéens.....	18
Tableau 8 – Composition des microalgues.....	23
Tableau 9 – Valorisation des microalgues.....	24
Tableau 10 – Microalgues, de la recherche aux produits	25
Tableau 11 – La filière microalgue : de multiples sentiers technologiques.....	26
Tableau 12 – Procédés technologiques de cultures des microalgues.....	27
Tableau 13 – Typologie des formats d'utilisation des microalgues en agriculture	28
Tableau 14 – Productions aquacoles mondiales, 2013	34
Tableau 15 – L'univers concurrentiel des microalgues en alimentation, 2014.....	35
Tableau 16 – Horizons des marchés des produits issus des microalgues (monde, 2015)	35
Tableau 17 – Le nouveau paradigme de la consommation.....	36
Tableau 18 – Production aquacole des pays méditerranéens.....	37
Tableau 19 – Orientation à moyen et long terme de la R&D sur les microalgues	43
Tableau 20 – Évolution des technologies de production des microalgues	45
Tableau 21 – Potentiel annuel de production en biomasse algale autotrophe à l'horizon 2030 en France	46
Tableau 22 – Potentiels de production et de marché en Europe pour les produits à moyenne et haute valeur ajoutée issus des microalgues à l'horizon 2030.....	47
Tableau 23 – Analyse SWOT des microalgues par secteur	50
Tableau 24 – Potentiel de production de biomasse algale de l'Union européenne.....	52
Graphique 1 – Population des pays méditerranéens 1950-2050	11
Graphique 2 – Surfaces agricoles et forestières des pays méditerranéens, 1990-2013-2030.....	14
Graphique 3 – Commerce extérieur agricole et agroalimentaire.....	17
Graphique 4 – Productivité en huile des microalgues et de diverses plantes terrestres en m ³ /ha/an	25
Graphique 5 – Production mondiale de spiruline (t)	31
Graphique 6 – Produits de la mer et des eaux terrestres (dont algues)	34
Graphique 7 – Production aquacole, pays méditerranéens, 1950-2013.....	37
Graphique 8 – Importations d'aliments pour animaux, 2000-2020.....	51
Figure 1 – Schéma technologique combinant PBR et bassins de production de microalgues	28
Figure 2 – Schéma technologique combinant biofilms et bassins de production de microalgues.....	29
Figure 3 – Productivités comparées des différents systèmes de culture des microalgues	30
Figure 4 – Les microalgues, fondement d'une bioéconomie circulaire territorialisée	55
Encadré n° 1 – Classification des algues : complexe et évolutive.....	21
Encadré n° 2 – Le programme de recherche européen MedAlgae.....	38

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 – Liste des entretiens avec les experts	69
ANNEXE 2 – Questionnaire d'enquête.....	71
ANNEXE 3 – Projections de la population totale méditerranéenne et mondiale 2015 – 2050	72
ANNEXE 4 – Projections de la population totale par pays méditerranéen.....	73
ANNEXE 5 – Projections de la population urbaine des pays méditerranéens	74
ANNEXE 6 – Projections de la population rurale des pays méditerranéens.....	75
ANNEXE 7 – Classement des pays méditerranéens selon le niveau de stress hydrique projeté en 2030	76
ANNEXE 8 – Rayonnement solaire en Europe, Afrique et Moyen-Orient.....	77
ANNEXE 9 – Quelques microalgues parmi les plus utilisées	79
ANNEXE 10 – Schéma de fonctionnement d'une microalgue autotrophe, intrants, produits, applications.....	80
ANNEXE 11 – Bilan comparatif des différents procédés de culture des microalgues (1) et (2)	81
ANNEXE 12 – Bioraffinerie environnementale et microalgues.....	82
ANNEXE 13 – Estimation du marché actuel des microalgues autotrophes les plus importantes	83
ANNEXE 14 – Marchés actuels et potentiels des produits dérivés des microalgues	84
ANNEXE 15 – Partenaires du programme de recherche européen MEDALGAE.....	85
ANNEXE 16 – Entreprises du secteur des microalgues dans les pays méditerranéens	86
ANNEXE 17 – Les projets de R&D sur les microalgues en France et dans l'Union européenne.....	88
ANNEXE 18 – Ressources en eau dans les pays Méditerranéens (1990-2000) et horizon 2050	91
ANNEXE 19 – Carte montrant le potentiel biomassique en microalgues de l'Union européenne	92
ANNEXE 20 – Perspectives de l'aquaculture en méditerranée	93

ANNEXE 1 – LISTE DES ENTRETIENS AVEC DES EXPERTS (PAR ORDRE ALPHABÉTIQUE DES ORGANISMES)

ORGANISME	LIEU	ACTIVITÉ	NOM	FONCTION	MESSAGERIE	DATES
ADEME	PARIS	PROSPECTIVE ALGUES	ALICE GUEUDET	DIRECTION ENERGIES ET PRODUCTIONS DURABLES, SERVICE BIORESSOURCES, CHIMIE ET MATÉRIAUX BIOSOURCÉS, EN CHARGE DU SUIVI DE LA MISSION	ALICE.GUEUDET@ADEME.FR	09/02/16
ALGOIL - VITALIGHT	SIDI TABET (TN)	PRODUCTION DE SPIRULINE	ILYES GOUJA	GÉRANT	CONTACT. VITALIGHT@GMAIL.COM	15/03/16
BIOALGUES	EL AIA MAHDIA (TN)	PRODUCTION DE SPIRULINE	YOUSSEF KRICHENE	GÉRANT	BIOALGUES.TUNISIE@YAHOO.FR	15/03/16
BIOCARB SAS	MARTIGUES	PILOTE INDUSTRIEL BIOCARBURANTS	ANTOINE LENOIR	DIRECTEUR	A.LENOIR@BIO-CARB-SAS.COM	15/03/16
CDER	ALGER	CENTRE DE DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES	SAMIRA CHADER		SAMIRA.CHADER@GMAIL.COM	17/03/2016
CEA-3G BIOMASS	CADARACHE	LABO RECHERCHE ET CITÉ DES ÉNERGIES NOUVELLES	JEAN-FRANÇOIS SASSI	DIRECTEUR	JEAN-FRANCOIS.SASSI@CEA.FR	04/04/16
CNDPA	BOU ISMAÏL	RECHERCHE POUR L'ALIMENTATION ANIMALE	AFAF KORD	ATTACHÉE DE RECHERCHE	KORDAF@YAHOO.FR	01/04/2016
ECOLE POLYTECHNIQUE DE NANTES	NANTES	PRODUCTION DE BIODIESEL	AUMAYA TALEB	ENSEIGNANTE – CHERCHEUSE, LABORATOIRE GEPEA	AUMAYA.TALEB@UNIV-NANTES.FR	22/03/2016
EDEN LIFE	KATTANA (TN)	PRODUCTION DE SPIRULINE	HEDJ GAZBAR	GÉRANT	HEDI.GAZBAR@EDENLIFE.TN	15/03/16
EGE UNIVERSITY	IZMIR	LABO RECHERCHE	DR. ZELIHA DEMIREL	DEPARTMENT OF BIOENGINEERING	ZELIH@EGEMACC.COM	29/03/2016
FRANCE AGRI-MER	PARIS	PROSPECTIVE ALGUES	TAREK MHIRI	CHEF DE L'UNITÉ ANALYSES TRANSVERSALES DIRECTION MARCHÉS, ÉTUDES ET PROSPECTIVE, SERVICE EVALUATION, PROSPECTIVE	TAREK.MHIRI@FRANCEAGRI-MER.FR	25/02/16
GREENSEA	MÈZE	MOLÉCULES HVA	JEAN-PAUL CADORET	DIRECTEUR	JEANPAUL.CADORET@GREENSEA.FR	24/03/16
INRIA	SOPHIA-ANTIPOLIS	LABO RECHERCHE	OLIVIER BERNARD	DIRECTEUR	OLIVIER.BERNARD@INRIA.FR	23/03/16
INSTM	MONASTIR (TN)	VALORISATION MICROALGUES	HATEM BEN AOUA	DIRECTEUR DE LABORATOIRE	HBENOUADA@YAHOO.FR	15/03/16
LAFARGE	PARIS	VEILLE STRATÉGIQUE MICRO-ALGUES	FRÉDÉRIQUE FEREY	INGÉNIEUR DE RECHERCHE AU SEIN DU CENTRE DE RECHERCHE DE LAFARGE	FREDERIQUE.FEREY@LAFARGEHOLCIM.COM	05/04/2016
MASCIr	RABAT	FONDATION	DR. IMANE WAHBY	GREEN BIOTECHNOLOGY MANAGER	I.WAHBY@MASCIR.COM	24/03/2016
MICROPHYT	BAILLARGUES	BIOPHOTORÉACTEUR	ARNAUD MULLER-FUEGA	DIRECTEUR SCIENTIFIQUE	ARNAUD.MULLER-FUEGA@WANADOO.FR	28/01/16

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE, CGDD	PARIS	BIOMASSE	ALAIN GRIOT	COORDONNATEUR PIA	ALAIN. GRIOT@ DEVELOPPE- MENT-DU- RABLE.GOUV.FR	15/04/16
PÔLE MER MÉDITERRANÉE	TOULON	PÔLE DE COMPÉTITIVITÉ	ROBERT GANDOLFO	DIRECTEUR	GANDOLFO@ POLEMERMEDI- TERRANEE.COM	18/02/16
SUEZ-LYONNAISE DES EAUX	PARIS	ÉNERGIE ET EAU	HERVÉ LABAQUÈRE	DIRECTEUR DU DÉVELOPPEMENT COMMERCIAL	HERVE. LABAQUERE@ LYONNAISE- DES-EAUX.FR	25/02/16
THAU NAISSAINS SARL	MARSEILLAN	OSTRÉICULTURE	NICOLAS DESROUSSEUX	GÉRANT		27/01/15
UNIVERSITÉ DE MASCARA	MASCARA	IDENTIFICATION DE SUBSTANCES BIOACTIVES	BACHIR RAHO GHALEM	DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE	BACHIR_ RAHO@ YAHOO.FR	21/03/2016
UNIVERSITÉ D'ORAN	ORAN	MICROALGUES MARINES	FATIMA SAHNOUNI	DOCTEUR EN BIOLOGIE, LABORATOIRE RÉSEAU DE SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE	SAHNOUNI_FATIMA @YAHOO.FR	01/04/2016

ANNEXE 2 – QUESTIONNAIRE D'ENQUÊTE
ETAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES DU SECTEUR DES MICROALGUES EN MÉDITERRANÉE

PAYS	INTERLOCUTEUR			DATE		
RUBRIQUE	SITUATION ACTUELLE			PERSPECTIVES À MOYEN TERME DU SOUS-SECTEUR		
	LABORATOIRES DE RECHERCHE	ENTREPRISES	TAILLE DU MARCHÉ	MARCHÉ : + / - / =	ATOUTS	CONTRAINTES
AGRICULTURE						
ALIMENTATION HUMAINE						
ALIMENTATION ANIMALE						
SANTÉ						
COSMÉTIQUE						
CARBURANTS						
MATÉRIAUX BIOSOURCÉS						
GESTION DES DÉCHETS						
AUTRES						

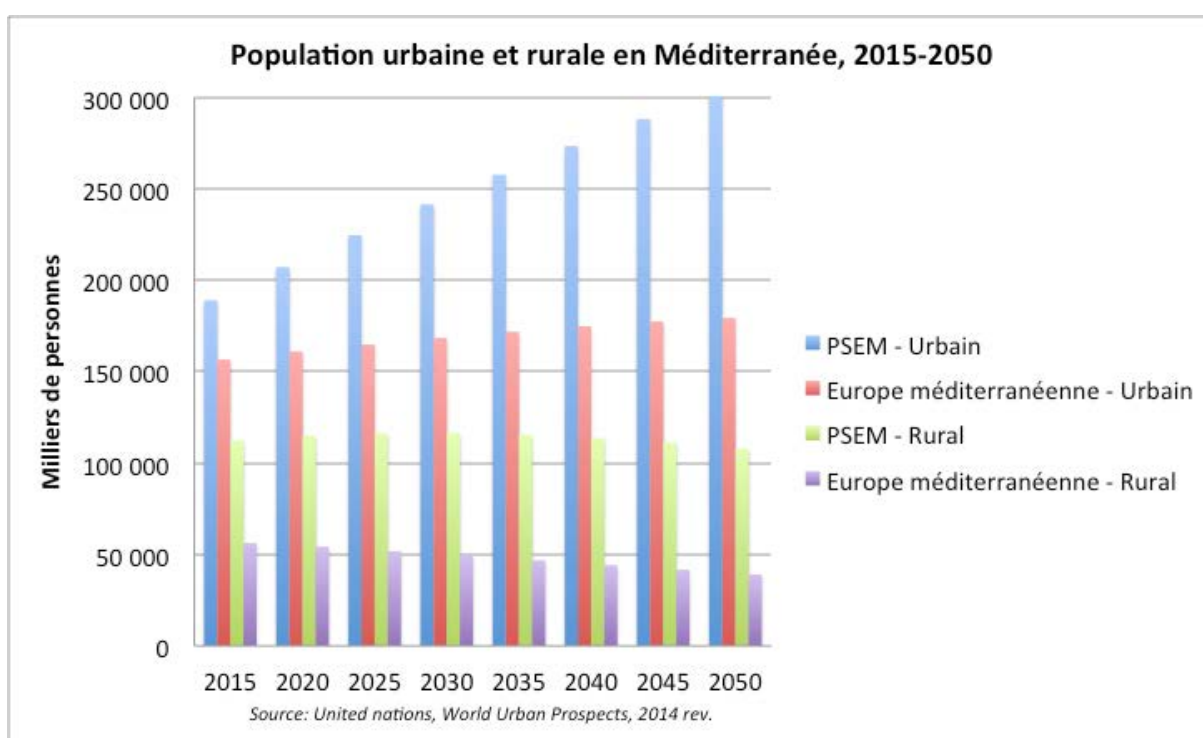
ANNEXE 3 – PROJECTIONS DE LA POPULATION 2015-2050 MÉDITERRANÉE ET MONDE

TOTAL POPULATION AT MID-YEAR, 2015-2050 (THOUSANDS)				
MAJOR AREA, REGION, COUNTRY OR AREA	2015	2050	EVOLUTION 2015-2050	
			MILLIERS	%
SOUTH & EAST MEDITERRANEAN COUNTRIES - URBAN	188 905	301 820	63%	74%
MEDITERRANEAN COUNTRIES OF EUROPE - URBAN	156 532	179 271	74%	82%
SOUTH & EAST MEDITERRANEAN COUNTRIES - RURAL	112 109	107 814	37%	26%
MEDITERRANEAN COUNTRIES OF EUROPE - RURAL	56 235	38 983	26%	18%
SOUTH & EAST MEDITERRANEAN COUNTRIES - TOTAL	301 014	409 634	100%	100%
MEDITERRANEAN COUNTRIES OF EUROPE - TOTAL	212 767	218 254	100%	100%
URBAN	345 438	481 091	67%	77%
RURAL	168 344	146 797	33%	23%
TOTAL MÉDITERRANÉEN	513 781	627 888	100%	100%

Source: United Nations. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, 06/03/2016

POPULATION AT MID-YEAR, 2015-2050 (THOUSANDS)				
MAJOR AREA, REGION, COUNTRY OR AREA	2015	2050	EVOLUTION 2015-2050	
			MILLIERS	%
WORLD URBAN POPULATION	3 957 285	6 338 611	2 381 326	60%
WORLD RURAL POPULATION	3 367 497	3 212 333	- 155 164	-5%
WORLD TOTAL POPULATION	7 324 782	9 550 945	2 226 163	30%

Source: United Nations. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, 06/03/2016



**ANNEXE 4 – PROJECTIONS DE LA POPULATION TOTALE 2015-2050
MÉDITERRANÉE**

TOTAL POPULATION AT MID-YEAR, 2015-2050 (THOUSANDS)				
MAJOR AREA, REGION, COUNTRY OR AREA	2015	2050	EVOLUTION 2015-2050	
			MILLIERS	%
SOUTH & EAST MEDITERRANEAN COUNTRIES	301 014	409 634	108 620	36%
ALGERIA	40 633	54 522	13 889	34%
EGYPT	84 706	121 798	37 092	44%
LIBYA	6 317	8 350	2 033	32%
MOROCCO	33 955	42 884	8 929	26%
TUNISIA	11 235	13 192	1 957	17%
ISRAEL	7 920	11 843	3 924	50%
JORDAN	7 690	11 510	3 821	50%
LEBANON	5 054	5 316	262	5%
STATE OF PALESTINE	4 549	8 906	4 358	96%
SYRIAN ARAB REPUBLIC	22 265	36 706	14 441	65%
TURKEY	76 691	94 606	17 916	23%

Source: United Nations. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, 06/03/2016

TOTAL POPULATION AT MID-YEAR, 2015-2050 (THOUSANDS)				
MAJOR AREA, REGION, COUNTRY OR AREA	2015	2050	EVOLUTION 2015-2050	
			MILLIERS	%
MEDITERRANEAN COUNTRIES OF EUROPE	212 767	218 254	5 487	3%
ALBANIA	3 197	3 094	-103	-3%
BOSNIA AND HERZEGOVINA	3 820	3 332	-488	-13%
CROATIA	4 255	3 606	-649	-15%
CYPRUS	1 165	1 356	191	16%
FRANCE	64 983	73 212	8 229	13%
GIBRALTAR	29	27	-2	-8%
GREECE	11 126	10 668	-458	-4%
ITALY	61 142	60 015	-1 127	-2%
MALTA	431	417	-15	-3%
MONTENEGRO	622	557	-65	-10%
PORTUGAL	10 610	9 843	-767	-7%
SLOVENIA	2 079	2 023	-56	-3%
SPAIN	47 199	48 224	1 025	2%
TFYR MACEDONIA	2 109	1 881	-229	-11%
MEDITERRANEAN	513 781	627 888	114 107	22%
WORLD TOTAL	7 324 782	9 550 945	2 226 163	30%

Source: United Nations. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, 06/03/2016

**ANNEXE 5 – PROJECTIONS DE LA POPULATION URBAINE 2015-2050
MÉDITERRANÉE**

URBAN POPULATION AT MID-YEAR, 2015-2050 (THOUSANDS)				
MAJOR AREA, REGION, COUNTRY OR AREA	2015	2050	EVOLUTION 2015-2050	
			MILLIERS	%
SOUTH & EAST MEDITERRANEAN COUNTRIES	188 905	301 820	112 915	60%
ALGERIA	28 739	44 787	16 048	56%
EGYPT	36 538	68 864	32 326	88%
LIBYA	4 962	7 155	2 193	44%
MOROCCO	20 439	31 721	11 281	55%
TUNISIA	7 510	10 108	2 599	35%
ISRAEL	7 297	11 189	3 892	53%
JORDAN	6 435	10 283	3 848	60%
LEBANON	4 437	4 874	437	10%
STATE OF PALESTINE	3 423	7 408	3 984	116%
SYRIAN ARAB REPUBLIC	12 837	26 245	13 407	104%
TURKEY	56 288	79 189	22 900	41%

Source: United Nations. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, 06/03/2016

URBAN POPULATION AT MID-YEAR, 2015-2050 (THOUSANDS)				
MAJOR AREA, REGION, COUNTRY OR AREA	2015	2050	EVOLUTION 2015-2050	
			MILLIERS	%
MEDITERRANEAN COUNTRIES OF EUROPE	156 532	179 271	22 738	15%
ALBANIA	1 835	2 345	510	28%
BOSNIA AND HERZEGOVINA	1 519	1 839	320	21%
CROATIA	2 509	2 606	97	4%
CYPRUS	779	977	198	25%
FRANCE	51 674	63 174	11 500	22%
GIBRALTAR	29	27	-2	-8%
GREECE	8 679	9 158	479	6%
ITALY	42 166	46 640	4 474	11%
MALTA	411	405	-7	-2%
MONTENEGRO	398	403	5	1%
PORTUGAL	6 734	7 564	830	12%
SLOVENIA	1 032	1 225	193	19%
SPAIN	37 561	41 601	4 040	11%
TFYR MACEDONIA	1 204	1 306	101	8%
MEDITERRANEAN	345 438	481 091	135 654	39%
WORLD TOTAL	3 957 285	6 338 611	2 381 326	60%

Source: United Nations. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, 06/03/2016

**ANNEXE 6 – PROJECTIONS DE LA POPULATION RURALE 2015-2050
MÉDITERRANÉE**

RURAL POPULATION AT MID-YEAR, 2015-2050 (THOUSANDS)				
MAJOR AREA, REGION, COUNTRY OR AREA	2015	2050	EVOLUTION 2015-2050	
			MILLIERS	%
SOUTH & EAST MEDITERRANEAN COUNTRIES	112 109	107 814	-4 295	-4%
ALGERIA	11 895	9 736	-2 159	-18%
EGYPT	48 168	52 934	4 766	10%
LIBYA	1 355	1 195	-160	-12%
MOROCCO	13 516	11 163	-2 352	-17%
TUNISIA	3 725	3 084	-642	-17%
ISRAEL	622	655	32	5%
JORDAN	1 255	1 228	-27	-2%
LEBANON	617	442	-175	-28%
STATE OF PALESTINE	1 126	1 499	373	33%
SYRIAN ARAB REPUBLIC	9 428	10 461	1 033	11%
TURKEY	20 402	15 418	-4 984	-24%

Source: United Nations. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, 06/03/2016

RURAL POPULATION AT MID-YEAR, 2015-2050 (THOUSANDS)				
MAJOR AREA, REGION, COUNTRY OR AREA	2015	2050	EVOLUTION 2015-2050	
			MILLIERS	%
MEDITERRANEAN COUNTRIES OF EUROPE	56 235	38 983	-17 252	-31%
ALBANIA	1 362	749	-613	-45%
BOSNIA AND HERZEGOVINA	2 301	1 492	-808	-35%
CROATIA	1 746	1 000	-746	-43%
CYPRUS	385	379	-6	-2%
FRANCE	13 308	10 037	-3 271	-25%
GIBRALTAR	0	0		
GREECE	2 447	1 510	-937	-38%
ITALY	18 976	13 375	-5 601	-30%
MALTA	20	12	-8	-41%
MONTENEGRO	224	154	-70	-31%
PORTUGAL	3 876	2 279	-1 597	-41%
SLOVENIA	1 047	798	-249	-24%
SPAIN	9 638	6 624	-3 015	-31%
TFYR MACEDONIA	905	575	-330	-36%
MEDITERRANEAN	168 344	146 797	-21 547	-13%
WORLD TOTAL	3 367 497	3 212 333	-155 164	-5%

Source: United Nations. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, 06/03/2016

ANNEXE 7 – CLASSEMENT DES PAYS MÉDITERRANÉENS SELON LE NIVEAU DE STRESS HYDRIQUE PROJETÉ EN 2030 (SCÉNARIO MOYEN DE HAUSSE DES TEMPÉRATURES)

WRI Aqueduct Projected Water Stress Country Rankings

By Tianyi Luo, Robert Young, and Paul Reig

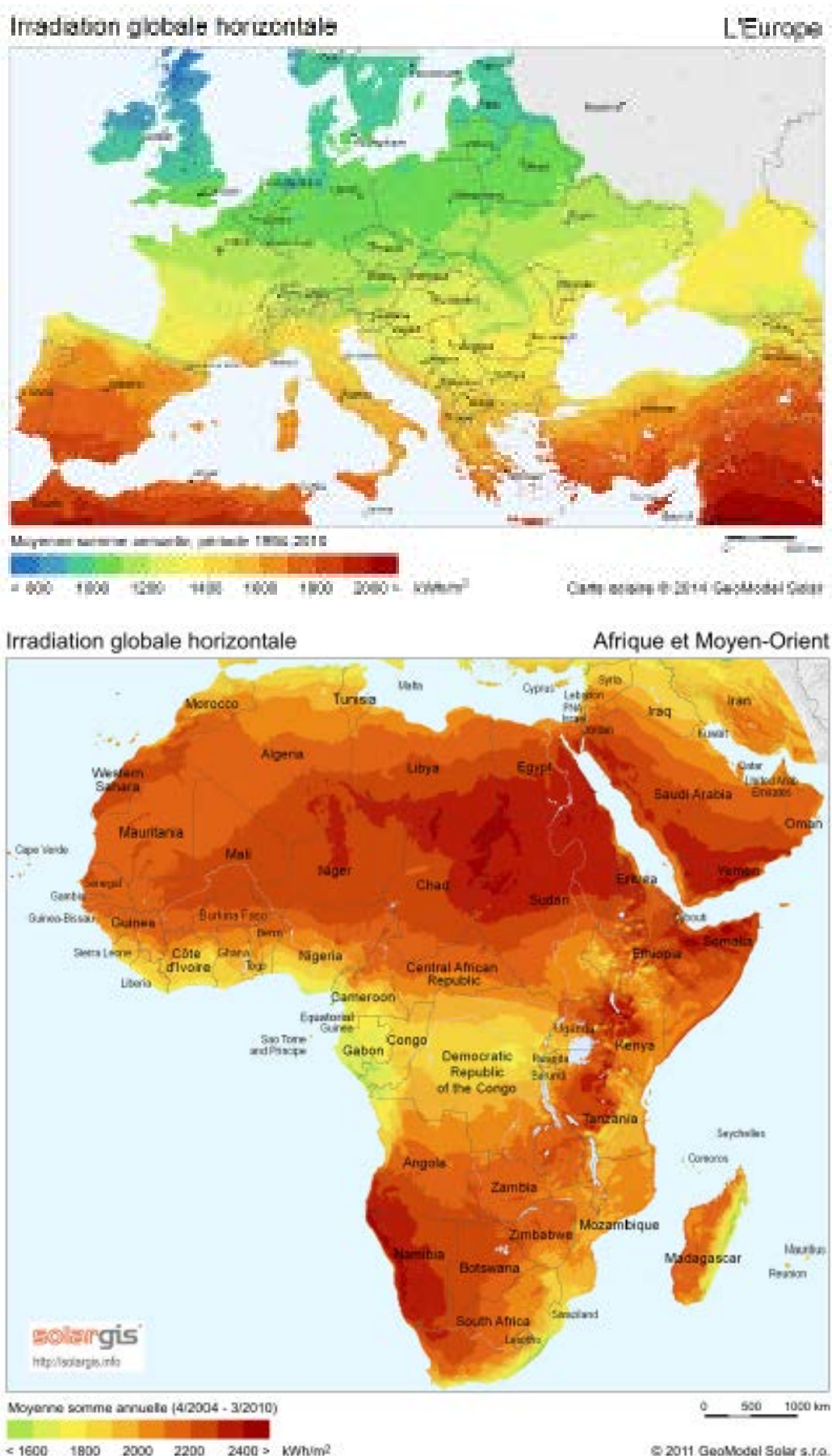
RANKING	NAME	ALL SECTORS	INDUSTRIAL	DOMESTIC	AGRICULTURE
1	BAHRAIN	5,00	5,00	5,00	5,00
8	ISRAEL	4,99	4,99	4,99	5,00
9	PALESTINE	4,95	4,93	4,94	4,99
12	LEBANON	4,89	4,89	4,89	4,88
15	JORDAN	4,84	4,85	4,83	4,83
16	LIBYA	4,74	4,52	4,52	4,78
18	MOROCCO	4,50	4,34	4,32	4,52
21	MACEDONIA	4,37	4,36	4,23	4,46
22	SYRIA	4,37	4,71	4,65	4,31
27	GREECE	4,11	4,01	4,01	4,12
28	TURKEY	4,10	4,43	4,36	3,95
31	SPAIN	3,93	3,53	3,53	4,09
35	ALGERIA	3,76	3,88	3,84	3,68
36	TUNISIA	3,74	4,15	4,11	3,67
39	ITALY	3,60	3,52	3,53	3,72
40	MONACO	3,51	3,51	3,51	3,51
55	ALBANIA	2,93	2,96	3,02	2,84
72	FRANCE	2,15	2,23	2,22	1,77
89	EGYPT	1,48	2,10	2,31	1,22
96	MONTENEGRO	1,03	0,97	1,05	1,44
119	SLOVENIA	0,58	0,58	0,57	0,59
125	CROATIA	0,51	0,51	0,53	0,23
128	BOSNIA AND HERZEGOVINA	0,46	0,48	0,47	0,01
158	SOUTH SUDAN	0,00	0,00	0,00	0,00

Source : Luo et al., 2015, WRI

Water stress measures total annual water withdrawals (municipal, industrial, and agricultural) expressed as a percentage of the total annual available blue water. Higher values indicate more competition among users.

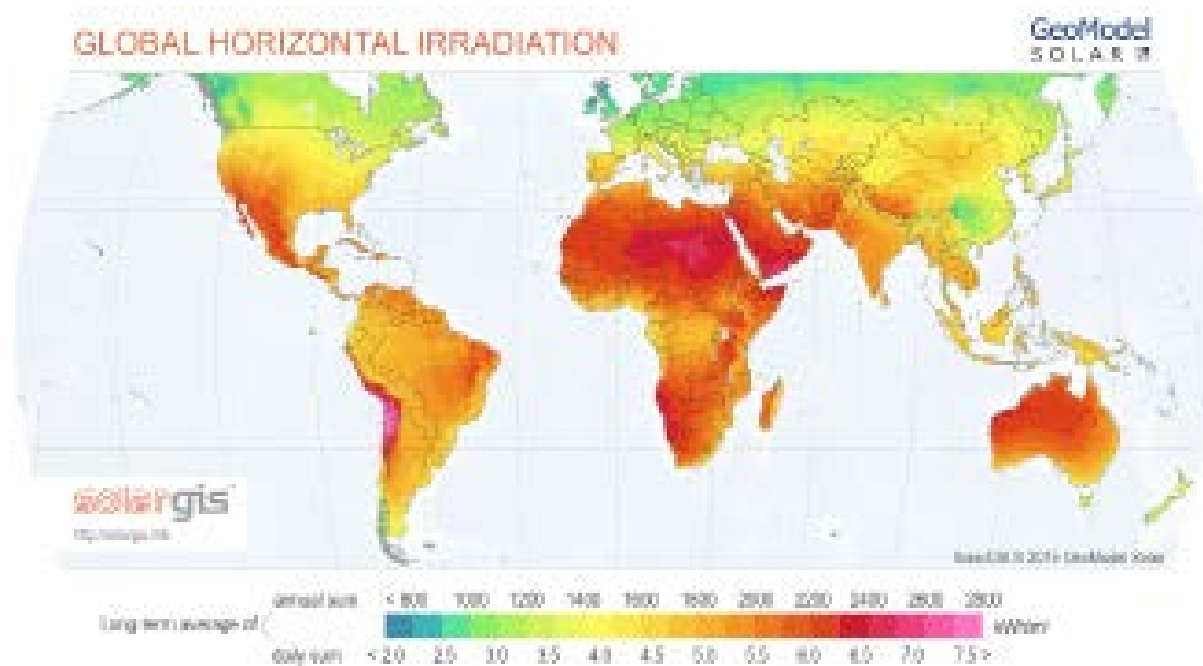
SCORE	VALUE
[0-1]	Low (<10%)
[1-2]	Low to Medium (10-20%)
[2-3]	Medium to High (20-40%)
[3-4]	High (40-80%)
[4-5]	Extremely High (>80%)

ANNEXE 8 – RAYONNEMENT SOLAIRE EN EUROPE, AFRIQUE ET MOYEN-ORIENT



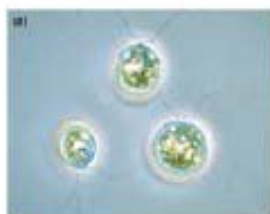
Source : <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI>, 03/03/2016

ANNEXE 8 (SUITE) – RAYONNEMENT SOLAIRE DANS LE MONDE



Source : <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI>, 03/03/2016

ANNEXE 9 – QUELQUES MICROALGUES PARMI LES PLUS UTILISÉES



Haematococcus pluvialis
20 μm $\times$ 15 μm



Dunaliella salina
10 μm $\times$ 8 μm



Skeletonema costatum
10 μm



Arthrospira platensis (spiruline)
D : 6-11 μm ; L : 200-500 μm



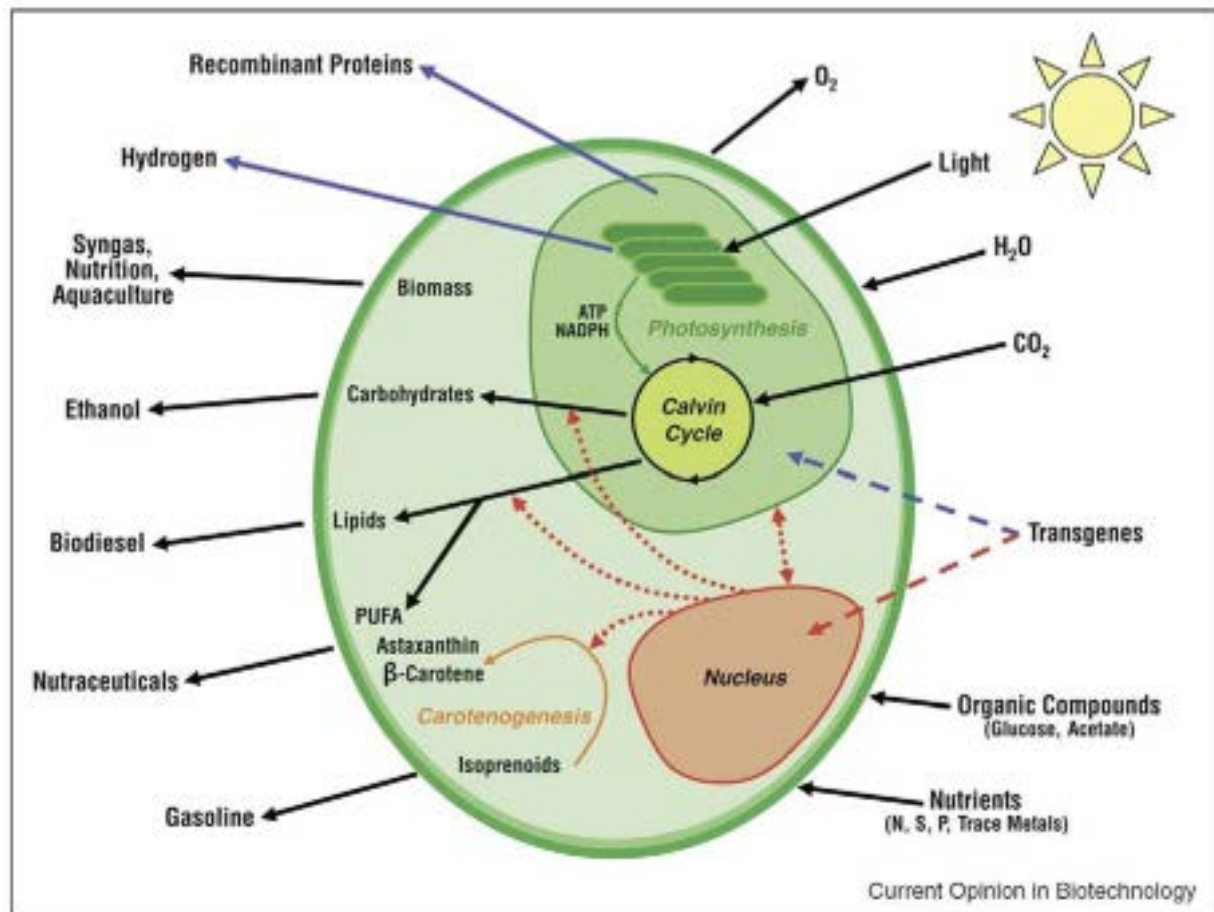
Chlamydomonas reinhardtii
7-10 μm



Haslea ostrearia
35-120 μm

Source : Titica, 2012

ANNEXE 10 – SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT D'UNE MICROALGUE AUTOTROPHE, INTRANTS, PRODUITS, APPLICATIONS



Source : Titica, 2012, d'après Rosenberg et al., 2008 Current, Opinion in Biotechnology

ANNEXE II – BILAN COMPARATIF DES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE CULTURE DES MICROALGUES

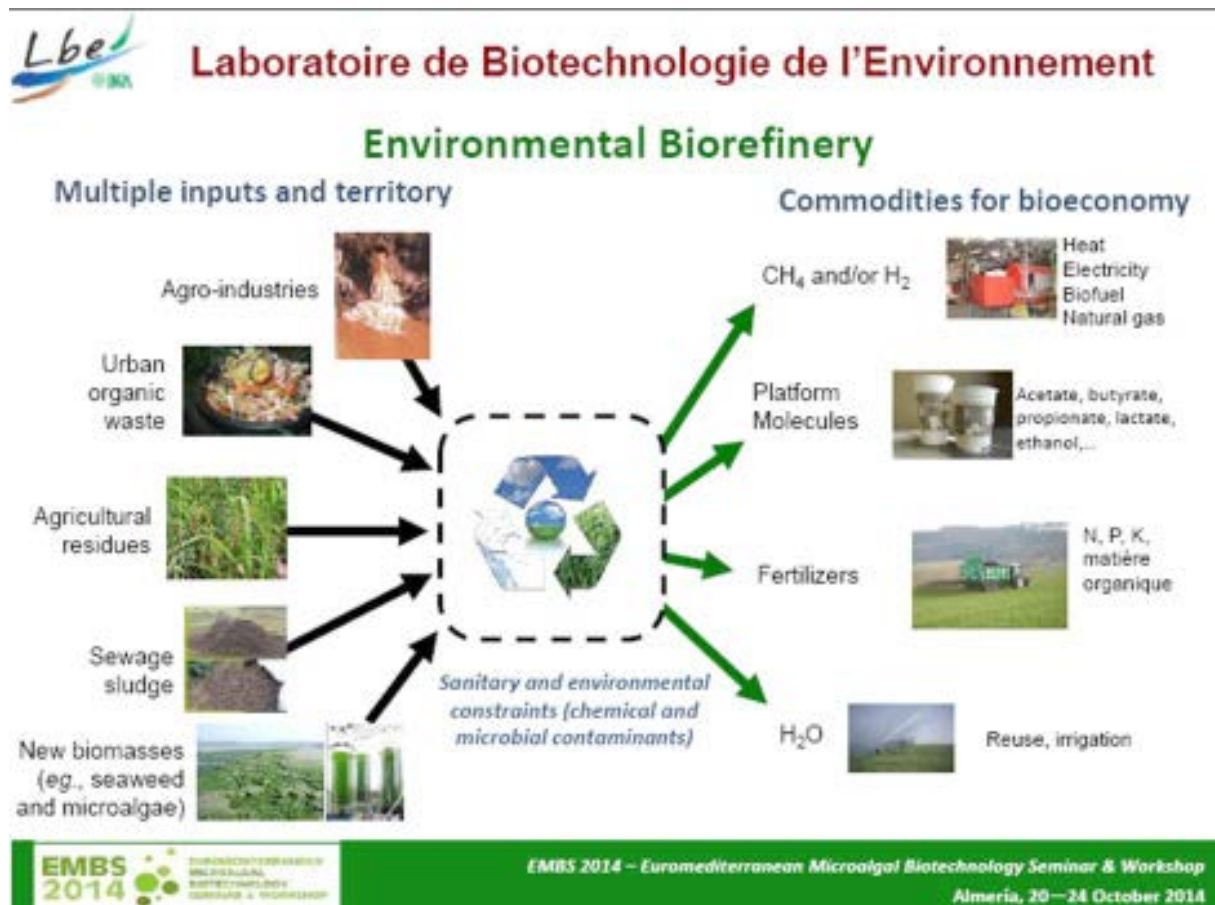
	BASSINS OUVERTS	PHOTOBIOREACTEURS	FERMENTEURS
PRINCIPAUX AVANTAGES	PLUS SIMPLE, FACILE À CONSTRUIRE ET OPÉRER PLUS FAIBLES CAPEX* (~100 k\$/HA) & OPEX** PLUS MATURE QUE LES PBR MONTÉE EN ÉCHELLE PLUS SIMPLE (MULTIPLICATION DES UNITÉS)	PLUS HAUTE PRODUCTIVITÉ VOLUMIQUE (PLUS FORTES DENSITÉS, MOINDRE CONTAMINATION) MEILLEUR CONTRÔLE DES CONDITIONS OPÉRATOIRES MEILLEURE SÉLECTIVITÉ DE L'ESPÈCE ET DU PRODUIT FINAL	PRODUCTIVITÉ BIEN SUPÉRIEURE (X10 PAR RAPPORT AUX PBR, DUE AUX CONCENTRATIONS IMPORTANTES ATTEIGNABLES) PAS DE CONTRAINTES GÉOGRAPHIQUES HAUTEMENT INDUSTRIALISABLE, MATURE
PRINCIPALES CONTRAINTES	PLUS FAIBLE PRODUCTIVITÉ (RISQUE DE CONTAMINATION, PLUS FAIBLE DENSITÉ, AGITATION MOINDRE, PLUS FORTE PHOTOINHIBITION) MOINDRE CONTRÔLE ET MOINDRE FIABILITÉ DE PRODUCTION DÉPENDANCE AU CLIMAT (ENSOLEILLEMENT, TEMPÉRATURE) PERTES EN EAU ET CO₂ PAR ÉVAPORATION PLUS FORTE EMPREINTE AU SOL	CAPEX ~10 FOIS SUPÉRIEUR AUX OPEN PONDS (~1 M\$/HA) MAINTENANCE (ENCRASSEMENT) ET DÉCONTAMINATION BEAUCOUP PLUS DIFFICILE ACCUMULATION D'OXYGÈNE ET INHIBITION DE LA PHOTOSYNTÈSE OPEX SUPÉRIEURS (ÉNERGIE D'AGITATION, DE COMPENSATION DES PERTES DE CHARGE, RÉGULATION THERMIQUE, MAINTENANCE, ETC.) MONTÉE EN ÉCHELLE PLUS DIFFICILE	CAPEX ÉLEVÉS COMPÉTITION AVEC D'AUTRES MICROORGANISMES SUR LES PRODUITS (BACTÉRIES, CHAMPIGNONS) OPEX ÉLEVÉS DÙS AU BESOIN EN SOURCE DE CARBONE EXTERNE ET STÉRILISÉE BILAN ÉNERGÉTIQUE GLOBALEMENT INEFFECTUEUX, À MOINS D'UTILISER DES DÉCHETS COMME SOURCE DE CARBONE ET/OU ÉNERGIE ÉMISSIONS DE CO₂
PRINCIPALES PISTES POUR DÉPASSER LES CONTRAINTES	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	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	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

*CAPEX : Capital Expenditure (coût de l'investissement)

**OPEX : Operational expenditure (coût de fonctionnement)

Source : Kerlero de Rosbo G., Bernard O., 2014, 2015, Ressources algales pour l'énergie et la chimie en France à l'horizon 2030, ENEA Consulting, INRIA, ADEME, Paris : p. 33, adaptation de l'auteur

ANNEXE 12 – BIORAFFINERIE ENVIRONNEMENTALE ET MICROALGUES



Source : Steyer, 2014

ANNEXE 13 – ESTIMATION DU MARCHÉ ACTUEL DES MICROALGUES AUTOTROPHES LES PLUS IMPORTANTES

ESPÈCE	PRIX MOYEN (€/kg)	PRODUCTION ANNUELLE (t/AN)	CA (M.€)
SPIRULINA	5 - 50	5 900 à 7 000	120 à 160
	36 (NUTRITION HUMAINE)		
	11 €/MG (PHYCOBILIPROTÉINES, MARQUEURS FLUORESCENTS)		
CHLORELLA	12 - 40	4 000 à 7 000	100 à 130
	36 (NUTRITION HUMAINE)		
	50€/L (AQUACULTURE)		
DUNALIELLA	60 - 100	1 000 à 1 600	70 à 110
	215-2150 (BÊTA-CAROTÈNE)		
HAEMATOCOCCUS	150 - 340	280 à 350	80 à 100
	50 €/L (AQUACULTURE)		
	7 150 (ASTAXANTHINE, ANTIOXYDANT)		
TOTAL	227 - 530	11 180 à 15 950	370 à 500

Source : Verdelho Vieira, 2014

ANNEXE 14 – MARCHÉS ACTUELS ET POTENTIELS DES PRODUITS DÉRIVÉS DES MICROALGUES

CATÉGORIE	PRODUITS	TAILLE (USD)	PRIX DE VENTE (USD/kg MS)	STADE DU MARCHÉ	POTENTIEL D'ÉVOLUTION
BIOMASSE	ALIMENTATION HUMAINE	1,1 MILLIARD	10-80	MATURE	CROISSANCE MODÉRÉE
	COMPLÉMENT NUTRITION HUMAINE		25-52	MATURE	CROISSANCE MODÉRÉE
	AQUACULTURE		50-150	MATURE	CROISSANCE RAPIDE
	COMPLÉMENT ALIMENTAIRE POUR ANIMAUX		10-130		CROISSANCE RAPIDE
PIGMENTS	BÉTA-CAROTÈNE	> 25 M.	300-3 000	SATURÉ, BARRIÈRES À L'ENTRÉE	FAIBLE POTENTIEL
	ASRAXANTHINE	> 250 M.	2 500-10 000	NON COMPÉTITIF / MOLÉCULE DE SYNTHÈSE (BASF)	CROISSANCE (HAUT DE GAMME «NATUREL»)
	FUCOXANTHINE	NICHE	3 000	VERROUILLÉ (BREVETS)	CROISSANCE (HAUT DE GAMME «NATUREL»)
AGPI (ACIDES GRAS POLYINSATURÉS)	EXTRAITS	10 M.	30-80	EN DVLPT	CROISSANCE (SUBSTITUT OMÉGA3 DE SOURCE HALIEUTIQUE = 1,5 Mds USD)
	EPA (OMÉGA3)	300 M.			
	DHA (OMÉGA3)	250 M.			
BIOCARBURANTS	LIQUIDES	NS	0,6 USD/L (PÉTROLE À 100 USD/BARIL)	INEXISTANT	TRÈS GROS VOLUMES POTENTIELS
	GAZEUX	FAIBLE		MARGINAL	GROS VOLUMES POTENTIELS

Source : Kerlero et Bernard, Ademe, 2015, d'après Van Iesel et Flammini

ANNEXE 15



Partenaires du programme de recherche européen MEDALGAE
 Production of biodiesel from algae in selected Mediterranean countries
www.med-algae.eu

MED-ALGAE COORDINATOR

AGRICULTURAL RESEARCH INSTITUTE, CYPRUS

Dr Polycarpou Polycarpou p.polycarpou@arinet.gov.cy

Tel. +35722403117

Niels Thygesen thygesen.niels@gmail.com

Tel.+4523302564

Cyprus Energy Agency

Anthl Charalambous

Cyprus

anthl.charalambous@cea.org.cy

Malta Intelligent Energy Management Agency

Jesmond Xuereb

Malta

director@miema.org

Fondazzjoni Temi Zammit

Lawrence Attard

Malta

lawrence.attard@ftz.org.mt

Studio Sardo

Vincenzo Scuderi

Italy

scuderi@gmx.it

National & Kapodistrian University of Athens

Athina Oikonomou Amilli

Greece

aamilli@biol.uoa.gr

National Research Centre

Guzine Ihim El Oiwani

Egypt

geldiwani@yahoo.com

The Lebanese Association for Energy Saving & for Environment

Adel Mourtada

Lebanon

adel.mourtada@yahoo.fr

Faculty of Science, Alexandria University

Mohamed Ismaël Ibrahim

Egypt

mibrah@gma.it.com

American University of Beirut

Youssef Abou Jaoude

Lebanon

abujawyf@aub.edu.lb

National Technical University Of Athens

Emmanuel Koukios

Greece

koukios@chemeng.ntua.gr

Universita' Mediterranea di Reggio Calabria

Oemetrios Zema

Italy

dzema@unirc.it

ANNEXE 16 – ENTREPRISES DU SECTEUR DES MICROALGUES (EURO-MÉDITERRANÉE)

UE MÉDITERRANÉENNE (5 PAYS : 50)	
ESPAGNE (15)	
ALGAENERGY SA	WWW.ALGAENERGY.ES
ALGALIMENTO	WWW.ALGALIMENTO.COM
ALGASOL RENEWABLES	WWW.ALGASOLRENEWABLES.COM
ALGATEK	WWW.ALGATEK.ES
AQUALGAE	WWW.AQUALGAE.COM
AQUALIA	WWW.AQUALIA.ES
ASN LEADER, SL	WWW.ASN-ESPIRULINA.COM
BIONOVA, SL	WWW.UNINOVA.ORG
FITOPLANCTON MARINO, SL	WWW.EASYALGAE.COM
GREENALTECH	WWW.GREENALTECH.COM
MONZON BIOTECH	WWW.MZNBIOTECH.COM
NEO ALGAE	WWW.NEOALGAE.ES
PHYCOELEMENTA, SL	WWW.PHYCOELEMENTA.ES
PHYCOGENETICS, SL	WWW.PHYCOGENETICS.COM
SEAWEED CANARIAS	WWW.ALGACAN.COM
FRANCE (21)	
ALGANACT	WWW.ALGANACT.COM
ALGOSOURCE TECHNOLOGIES	WWW.ALGOSOURCE.FR
ALGOSUD	WWW.ALGOSUD.COM
BIOALGOSTRAL	WWW.BIOALGOSTRAL.COM
CLOS SAINTE AURORE	WWW.SPIRULINECSA.COM/FR
COLDEP	WWW.COLDEP.COM
COMPAGNIE DES SALINS DU MIDI	WWW.SALINS.COM
DOMAINE DE TRAVERSE	WWW.DOMAINE-TRAVERSE.COM
ENNESYS	WWW.ENNESYS.COM
FERMENTALG	WWW.FERMENTALG.FR
GREENSEA SAS(GREENTECH)	WWW.GREENSEA.FR
INNOVALG SARL	WWW.BLUECLUSTER.FR/ENTREPRISE/DETAIL/AQF8AA00026N
LA SPIRALE VERTE	WWW.LASPIRALEVERTE.COM
MICROPHYT	WWW.MICROPHYT.FR
PHYCO-BIOTECH	WWW.PHYCO-BIOTECH.COM
PHYCOSOURCE	WWW.PHYCOSOURCE.COM
ROQUETTE	WWW.ROQUETTE.COM/MICROALGAE
SPIRULINE DE PROVENCE	WWW.SPIRULINEDEPROVENCE.FR
SPIRULINE DE SAVOIE	WWW.ETOILE-VERTE.COM
SPIRULINE DES ÎLES D'OR	WWW.SPIRULINE-DES-ILES-DOR.COM
TERAMER / ISUA BIOTECHNOLOGY	WWW.TERAMER.EU

GRÈCE (1)	
SPIRULINA ALGAE A.C.	WWW.SPIRULINA.GR
ITALIE (6)	
ALGAINENERGY	WWW.ALGAINENERGY.COM
ALGAMUNDI	WWW.ALGAMUNDI.COM
ARCHIMED RICERCHÉ, S.R.L.	WWW.ARCHIMEDERICERCHÉ.COM
EXENIA GROUP	WWW.EXENIAGROUP.IT
FOTOSINTETICA & MICROBIOLOGICA, S.R.L.	WWW.FEMONLINE.IT
MICROLIFE, S.R.L.	WWW.MICRO-LIFE.IT
PORTUGAL (7)	
A4F – ALGAE FOR FUTURE, S.A.	WWW.A4F.PT
ALGAFARM (SECIL / A4F / ALLMA)	WWW.ALLMA.COM
ALGICEL - BIOTECNOLOGIA E INVESTIGAÇÃO, LDA	WWW.ALGICEL.PT
BLUEMATER, S.A	WWW.BLUEMATER.COM
BUGGYPOWER (PORTUGAL)	WWW.BUGGYPOWER.EU
NECTON S.A.	WWW.NECTON.PT
VALORSABIO, LTDA	WWW.VALORSABIO.PT
PAYS DU SUD ET DE L'EST DE LA MÉDITERRANÉE (4 PAYS : 22)	
ISRAËL (10)	
ALGAEART TECHNOLOGIES, LTD	WWW.ALGAEART.BIZ
ALGALO INDUSTRIES, LTD	WWW.ALGALO.COM
ALGATECHNOLOGIES, LTD	WWW.ALGATECH.COM
AQUANOS	WWW.AQUANOS.NET
FRUTAROM INDUSTRIES, LTD	WWW.ALGUARD.FRUTAROM.COM
GALILEE ALGAE	
NBT – NATURE BETA TECHNOLOGIES	WWW.NIKKEN-MIHO.COM/INDEX_TOPIC.PHP?DID=26&DIDPATH=/26
QUALITAS HEALTH (VALICOR RENEWABLES)	WWW.QUALITAS-HEALTH.COM
TRANSALGAE, LTD	WWW.TRANSALGAE.COM
UNIVERVE BIOFUEL, LTD	WWW.UNIVERVE-BIOFUEL.COM
MAROC (3)	
ATLAS SPIRULINE	WWW.ATLASPIRULINE.COM/
DOMAINE SPIRULINE	WWW.DOMAINESPIRULINE.COM
SPIRULINE VITALGUE	WWW.SPIRULINEVITALGUE.COM
TUNISIE (3)	
ALGOIL	WWW.ECOPARK.TN/INDEX.PHP?P=20&T=PEPINIERE
BIOALGUE	WWW.BIOALGUE.COM
EDEN LIFE	WWW.EDENLIFE.TN
TURQUIE (5)	
AKUATUR COMPAY	WWW.AKUVATUR.COM
EGERT AŞ	WWW.EGERT.COM.TR/
MIKROALG GIDA TARIM SANAYI AŞ.	WWW.MIKROALG.COM/
VITATIS BIOCHECNOLOGY	WWW.VITATIS.COM.TR/

ANNEXE 17 – LES PROJETS DE R&D SUR LES MICROALGUES EN FRANCE ET DANS L'UNION EUROPÉENNE

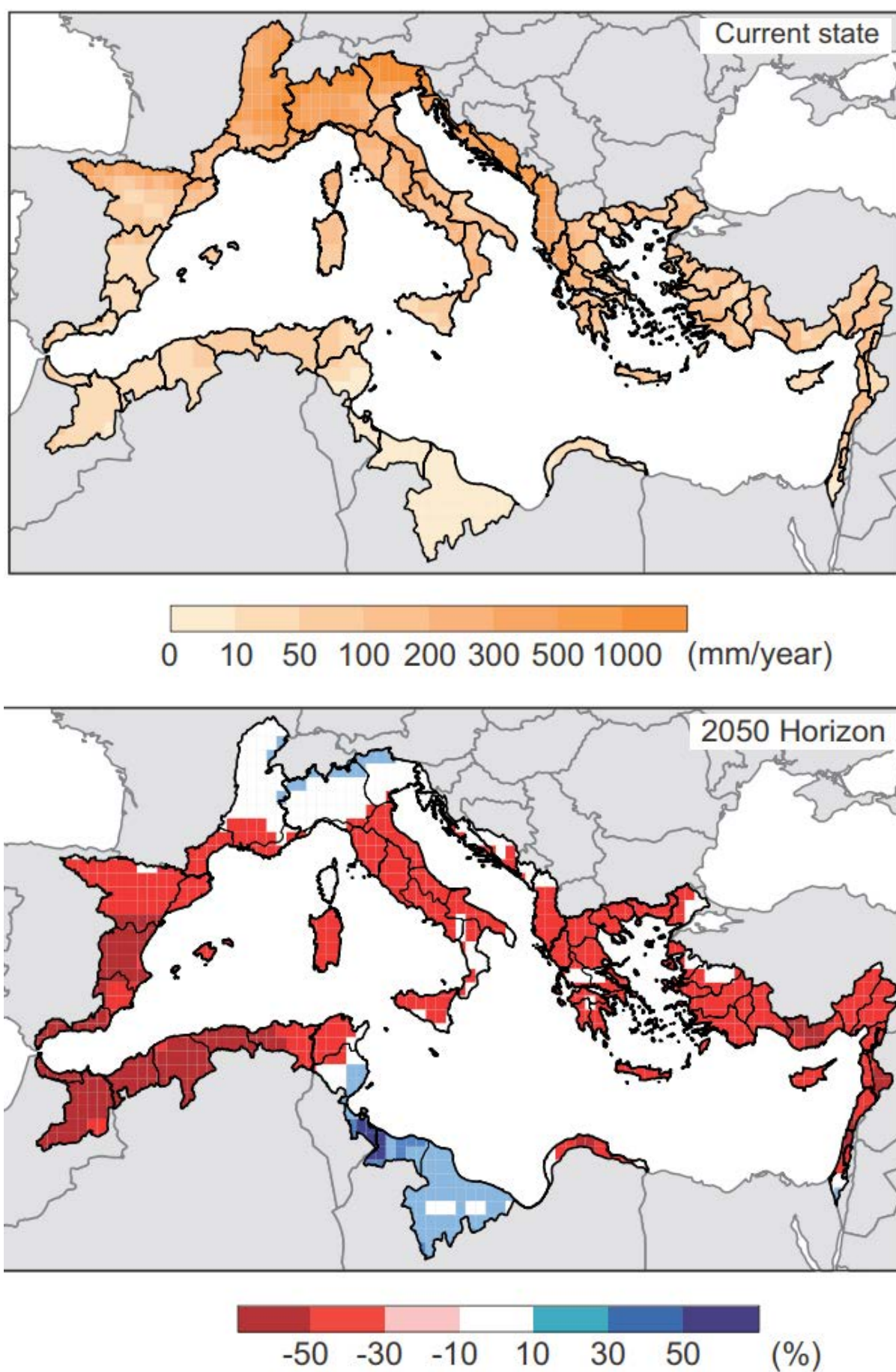
PROJET	PARTENAIRES IMPLIQUÉS	OBJECTIF	FIN	BUDGET (M€)	SUBVENTION
PRODUCTION DE BIOCARBURANTS ALGAUX					
ALGOMICS	CEA CADARACHE, GEPEA, IBPC, METASys, EDyP, GENOSCOPE	RECHERCHE SUR LE MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE DE CHLAMYDOMONAS REINHARDTII	2012	1,8	ANR
DEFI- ALG (ST NAZAIRE)	GEPEA-NANTES, UNIVERSITÉ DE CLER- MONT-FERRAND	BIOCARBURANT 3G	2014	24,2	COLLECTIVITÉS (7,7 M€)
DIESALG	UNIVERSITÉ DE NANTES (GEPEA), CEA, ALPHA BIOTECH	BIODIESEL			ANR
SHAMASH	INRIA, ALPHA BIOTECH, GEPEA, CNRS, IFREMER, CEA, CIRAD- UM 2, PSA & EADS	BIODIESEL		2,8	ANR (0,8 M€)
GREENLINE	8 PARTENAIRES DONT FERMENTALG	BIODIESEL		19,8	
LIPALG	CNRS, UNIVERSITÉ DE NANTES (GEPEA), LB3M (CEA OF CADARACHE), UNIVERSITÉ DE BREST, CEMCA	BIODIESEL ET BIOKÉROSÈNE	2012	0,1	ANR
SYMBIOSE	NASKEO, IFREMER, INRA	BIOFUEL, BIOGAZ	2011	2,5	ANR
JET'ALG	TOULOUSE AEROSPACE VALLEY, PEGASE, ASTeCH PARIS ET XYLOFUTUR	BIOFUEL, JETFUEL		4,8	
ALBIUS	BIOALGOSTRAL, EADS, PSA, IGV GmbH, CYROI, IFREMER, UNIVERSITÉS DE LA RÉUNION, DE TOULOUSE	BIOFUEL, JETFUEL		60,0	INVESTISSEMENTS D'AVENIR

TECHNOLOGIES DE CULTURE DE MICROALGUES					
ENALGAE	19 PARTENAIRES EUROPÉENS	CRÉATION D'UN RÉSEAU DE 9 PILOTES DE PRODUCTION DE MICROALGUES, MULTIPRODUITS	2015	15,0	INTERREG UE
CALCIA	CIMENTS CALCIA, GEPEA, ALGOSOURCE TECHNOLOGIES	CULTURE DE MICROALGUES ALIMENTÉES PAR LE GAZ D'UNE CIMENTERIE	2013	0,5	
ALGO RAFFINERIE	GEPEA, LGCB, INPT-LCA, ALGO SOURCE	DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME INTÉGRÉ DE RAFFINERIE MICROALGUES		0,7	ANR
BIOSOLIS	GEPEA, LGCB, PROMES, EKI INNOVATION, SIBYLUX, SAINT-GOBAIN	DÉVELOPPEMENT DE PHOTOBIOREACTEURS SOLAIRES	2010	1,8	ANR
SALINALGUE	COMPAGNIE DU VENT (GDF-SUEZ) ET 11 PARTENAIRES DONT AIR LIQUIDE, INRIA, INRA, CEA, NASKEO	PRODUCTION DE DUNALIELLA SALINA SUR 10 HA PUIS 6000 HA, MULTIPRODUITS	2014	7,0	FUI
SUPRABIO	UNE VINGTAINES DE PARTENAIRES EUROPÉENS DONT ALGO SOURCE TECHNOLOGIES	PRODUCTION DE MICROALGUES PAR RECYCLAGE DES EFFLUENTS D'UNE BIORAFFINERIE INTÉGRÉE, MOLÉCULES À HVA	2014	18,9	FP 7
ECOPLAK	ESETA, ARMINES, EARL TRANSON, CH. AGRI. LOIRET	DÉVELOPPEMENT PBR À PLAQUES	2012		CENTRE FRANCILIEN DE L'INNOVATION
SYMBIO 2	SÉCHÉ ENVIRONNEMENT, GEPEA, X-TU ARCHITECTS,	PRODUCTION INTÉGRÉE AU BÂTI AU SEIN DE « BIOFAÇADES »	2017	4,9	RÉGIONS ÎLE-DE-FRANCE, PAYS DE LA LOIRE, MAIRIE DE PARIS
LA DÉFENSE, URBAN LAB	ENNESYS	PRODUCTION INTÉGRÉE AU BÂTI EN MILIEU URBAIN. EAU ÉPURÉE, CHALEUR			

PRODUCTION DE MOLÉCULES D'INTÉRÊT NUTRITION-SANTÉ					
ALGOHUB	ROQUETTE FRÈRES ET 14 PARTENAIRES FRANÇAIS DONT INSTITUT PASTEUR	MOLÉCULES À HVA / SANTÉ-NUTRITION	2015		ANR
ASSÉRAC	ALPHA BIOTECH	MOLÉCULES À HVA / SANTÉ-NUTRITION			
LA RÉUNION	BIOALGOSTRAL, IGV GMBH	MOLÉCULES À HVA / SANTÉ-NUTRITION			OSEO AFD - RÉGION RÉUNION
PROTEALG	JV ENTRE SOFI-PROTÉOL 70% ET FERMENTALG 30%	MOLÉCULES À HVA / SANTÉ-NUTRITION			
BORDEAUX	FERMENTALG	MULTIPRODUITS			
EIMA	FERMENTALG	MULTIPRODUITS	2015	6,4	DONT OSEO
GREENSTARS	INRIA INRA, UPMC, UM2 ET 8 INDUSTRIELS DONT VEOLIA, LAFARGE, PSA, FERMENTALG	MULTIPRODUITS		120,0	INVESTISSEMENTS D'AVENIR
BAMMBO	UNIVERSITÉ DE LIMERICK (IRL), 9 PARTENAIRES SCIENTIFIQUES ET 2 INDUSTRIELS DONT GREENSEA	IDENTIFICATION DE SOUCHES ET TEST SUR DES PILOTES INDUSTRIELS.	2014		UE-FP7
PRODUCTION DE BIOMATÉRIAUX					
ALGOROUTE	ALGOSOURCE TECHNOLOGIES, ALPHABIOTECH, IFSTT, CEISAM, GEPEA	ALTERNATIVE AUX LIANTS BITUMINEUX POUR LES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES	2014	0,3	RÉGION PAYS DE LOIRE
TOTAL			M. €	289,7	ESTIMATION

Source : Kerlero de Rosbo G., Bernard O., 2014, 2015, adaptation de l'auteur

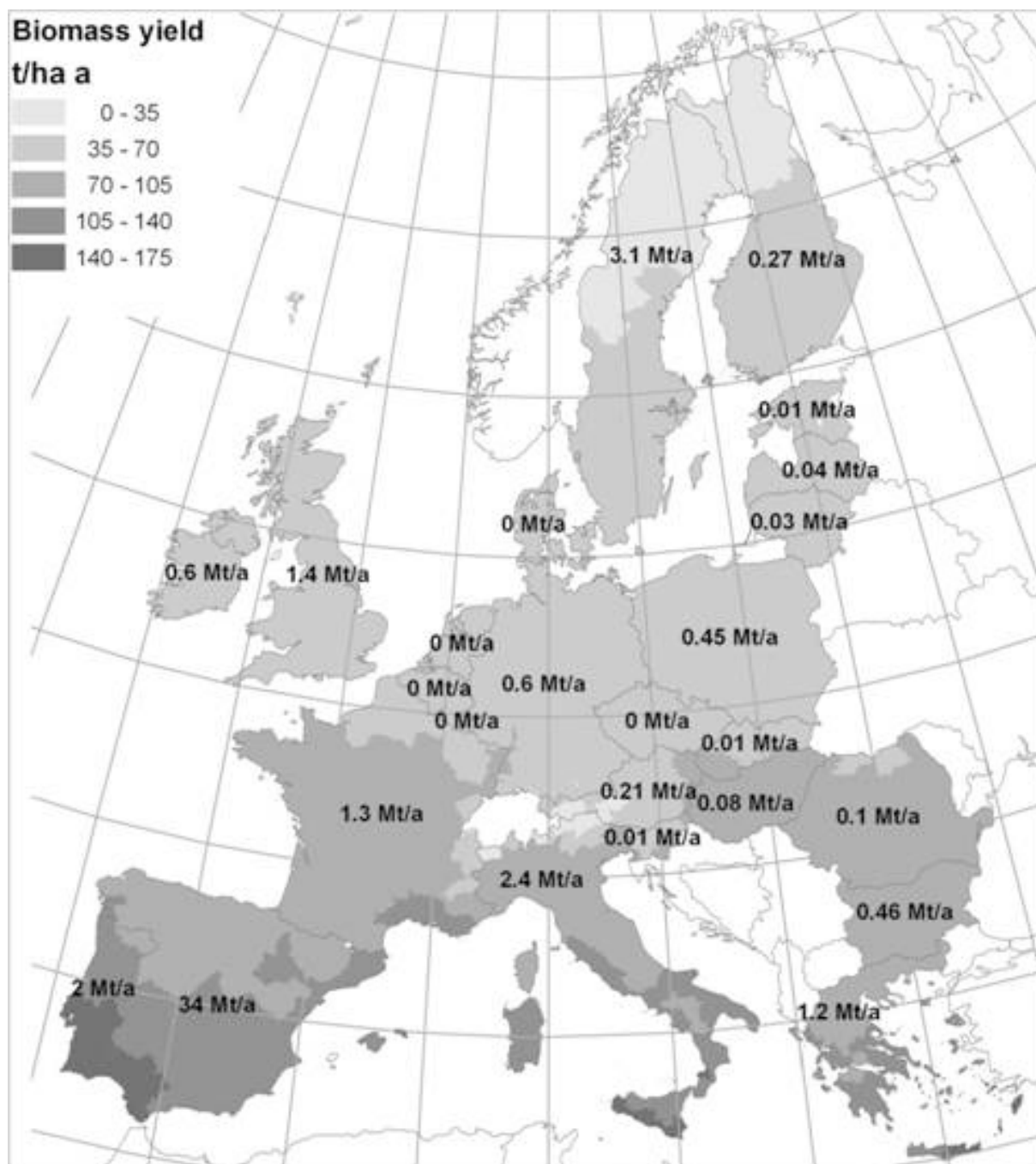
ANNEXE 18 – RESSOURCES EN EAU DANS LES PAYS MÉDITERRANÉENS (1990-2000) ET HORIZON 2050



Source : Milano et al., 2012

ANNEXE 19 – CARTE MONTRANT LE POTENTIEL BIOMASSIQUE EN MICROALGUES DE L'UNION EUROPÉENNE

MAP SHOWING THE MICROALGAE BIOMASS RESOURCE POTENTIAL (FOR EACH EU-27 COUNTRY IN MT A⁻¹ AND THE MEAN BIOMASS YIELD IN T HA⁻¹ A⁻¹)



Source : Skarka, 2012

ANNEXE 20 – PERSPECTIVES DE L'AQUACULTURE EN MÉDITERRANÉE

« Dans la région méditerranéenne, l'aquaculture pratiquée en eaux marines et saumâtres n'a cessé de prendre de l'ampleur au cours des dernières décennies. Pas moins de 67 espèces différentes de poissons, mollusques et crustacés sont élevées en mer Méditerranée et en mer Noire. L'aquaculture pèse dorénavant pour plus de 50 % de la production halieutique en région méditerranéenne. Sur le total, les 2/3 de la production aquacole proviennent de la pisciculture (dont l'élevage du thon rouge), tandis que la conchyliculture (élevage de mollusques) en représente un tiers. La production aquacole en eaux marines et saumâtres s'élève à 1,2 million de tonnes par an, soit 3 % de la production mondiale réalisée dans ces milieux, et près de 75 % de la production aquacole totale de la Méditerranée (qui inclut la production en eaux douces).

Si, traditionnellement, l'aquaculture méditerranéenne s'est spécialisée dans la conchyliculture, qui comptait pour 62 % de la production totale en 1992, la part de la pisciculture s'est nettement accrue depuis, passant de 37 % à cette date à 53 % en 2001.

La production aquacole de la région méditerranéenne est concentrée à 95 % dans six pays : Égypte, Grèce, Italie, Espagne, France et Turquie. En plus d'employer directement plus de 120 000 personnes dans les pays de la Méditerranée, la filière assure de nombreux emplois indirects (industrie de la transformation, secteur des transports), estimés à plus de 750 000.

La valeur de la production aquacole méditerranéenne en eaux marines et saumâtres atteint en tout 2,5 milliards d'euros, l'équivalent de 6 % du chiffre d'affaires mondial de l'aquaculture réalisée dans ces milieux, et représente plus de 70 % de la production aquacole totale des pays méditerranéens (qui comptabilise à la fois les espèces d'eau douce, saumâtre et marine et les exploitations des eaux intérieures).

Durant les 40 dernières années, le taux de croissance annuel du secteur aquacole a systématiquement dépassé 8 %, en faisant passer la production de 540 000 tonnes en 1990 à 1 400 000 tonnes à 2010.

Stimulée à la fois par le déclin des stocks halieutiques sauvages et la hausse de la demande de produits de la mer, l'aquaculture en mer Méditerranée devrait continuer à gagner du terrain dans les années qui viennent. L'agenda fixé par l'UE pour la croissance économique et l'emploi l'a en effet inscrite parmi les cinq secteurs prioritaires capables de favoriser la croissance bleue, grâce en particulier à la réforme de la politique Commune de la Pêche et suite à la publication récente des lignes directrices stratégiques [5].

Les projections révèlent que la pisciculture européenne en mer Méditerranée pourrait plus que doubler de taille d'ici 2030, pour atteindre une production totale supérieure à 600 000 tonnes. Si cette hypothèse s'avérait exacte, la filière serait valorisée en tout (directement et indirectement) à quelque 5 milliards d'euros et gagnerait 10 000 nouveaux emplois dans les pays limitrophes de la Méditerranée. »

Source : Piante et Ody, 2015, WWF, 2015



- INSTITUT DE PROSPECTIVE ÉCONOMIQUE DU MONDE MÉDITERRANÉEN -

L'Institut de prospective économique du monde méditerranéen, IPEMED, est une association reconnue d'intérêt général, créée en 2006. Think tank promoteur de la région méditerranéenne, il a pour mission de rapprocher par l'économie, les pays des deux rives de la Méditerranée. Il est indépendant des pouvoirs politiques dont il ne reçoit aucun financement.