

Les micro-algues, énergie propre du XXI^e siècle ?

Thérèse Bouveret

Des États-Unis à la Chine, tous les grands pays développent des projets de culture de micro-algues. Micro-organismes à la croissance fulgurante, elles trouvent déjà leurs débouchés dans la santé, la cosmétique, la « chimie verte ». Dans le secteur de l'énergie, les micro-algues, employées pour la récupération du CO₂, pourraient même contribuer à enrichir la famille des nouveaux biocarburants.

De sa mission de 30 mois entre 2009 et 2012, l'expédition Tara a fait le tour des océans a rapporté 350 000 échantillons de phytoplanctons inconnus. Pour décrypter cette masse de données à l'Institut de génomique d'Évry notamment, il faudra environ 10 ans. Le bateau est reparti de Lorient à la mi-mai achever sa mission, soutenue notamment par le CNRS et le CEA, avec biologistes et océanographes à son bord pour sept mois de circumnavigation de l'Océan Arctique.

La diversité des ces plantes aquatiques, qu'on appelle phytoplancton et qui représente 80% de la biomasse est telle que l'avenir réserve sans doute bien des découvertes. L'avantage des micro-algues qui poussent en eau douce ou salée? Ces organismes unicellulaires de quelques microns de diamètre contiennent de proportions bien plus importantes de lipides que les plantes terrestres et ont une croissance plus rapide. Pour l'heure, alors qu'il existe encore 300 000 espèces à explorer, seule une vingtaine d'entre elles sont exploitées pour trois extraits principaux : les caroténoïdes, les phycobilibiprotéines et les antioxydants. Les diverses collections de micro-algues de par le monde recensent actuellement environ 20 000 espèces. Les molécules à haute valeur ajoutée telles que les colorants (bétacarotène) ou les omégas 3 et 6, destinés à l'alimentation

humaine ou animale, représentent des marchés très importants.

L'intérêt des micro-algues porte également sur leur potentiel énergétique. Elles peuvent apporter un souffle nouveau aux biocarburants. Elles ont l'avantage de ne pas occuper de terres cultivables qui se font rares particulièrement en Asie (Singapour, Corée) et de ne pas entrer en concurrence avec les cultures agroalimentaires, comme c'est le cas au Brésil où la production de bioéthanol à partir de canne à sucre a provoqué des émeutes. Il ne s'agit pas de les prélever dans les océans, mais de les cultiver.

« Ces micro-algues sont des cultures de l'invisible, leur temps de reproduction est plus rapide que le nôtre, de l'ordre de la journée. Il nous a fallu des millénaires pour arriver à 7 milliards d'individus sur la planète. Seules les micro-algues avec leur capacité de reproduction imbattable sont capables de nous fournir l'alimentation nécessaire en utilisant le CO₂ de l'atmosphère qui augmente considérablement. Mais il faut s'y mettre dès maintenant... », s'enthousiasme Claude Guadin, un chercheur qui a étudié les micro-algues au CEA durant 40 ans, en particulier le *Porphyridium Cruentum*, et qui préconise la création en France d'un institut des micro-algues (*Histoire naturelle des algues*, Éditions Odile Jacob, mai 2013).

Les micro-algues et les cyanobactéries sont des organismes photosynthétiques qui utilisent la lumière du soleil comme source d'énergie pour fixer le dioxyde de carbone. Elles accumulent des lipides pouvant atteindre jusqu'à 80% de leur poids sec, principalement sous forme de triglycérides. Ces derniers peuvent ensuite être utilisés pour produire du biodiesel via une réaction appelée transestérification [Cadoret et Bernard, 2008 ; Chisti, 2007]. Un des avantages de l'utilisation des micro-algues pour la production de biodiesel est leur croissance extrêmement rapide puisque certaines espèces peuvent doubler leur biomasse de 1 à 3 fois en 24 heures [Khan *et al.*, 2009].

Pour l'instant deux solutions existent : soit l'on prend des algues natives et l'on procède par mutagenèse dirigée pour travailler leur plasticité. Par exemple, on obtient 30 fois plus de carotène dans les algues par stress lumineux.

Tableau 1		
Système intégré / marché comparé (source : Biorefinery of microalgae (3/8) Is biorefinery needed? Pr René Wijffels, université Wageningen)		
Applications	Prix par kg de biomasse en euros	Volume du marché en euros
Neutraceutiques pour la consommation humaine	100	60 millions
Neutraceutiques pour les poissons et nourriture animale	5,20	3,4 milliards
Chimie verte	1,5	> 50 milliards
Biocarburants	< 0,40	> 1 trillion

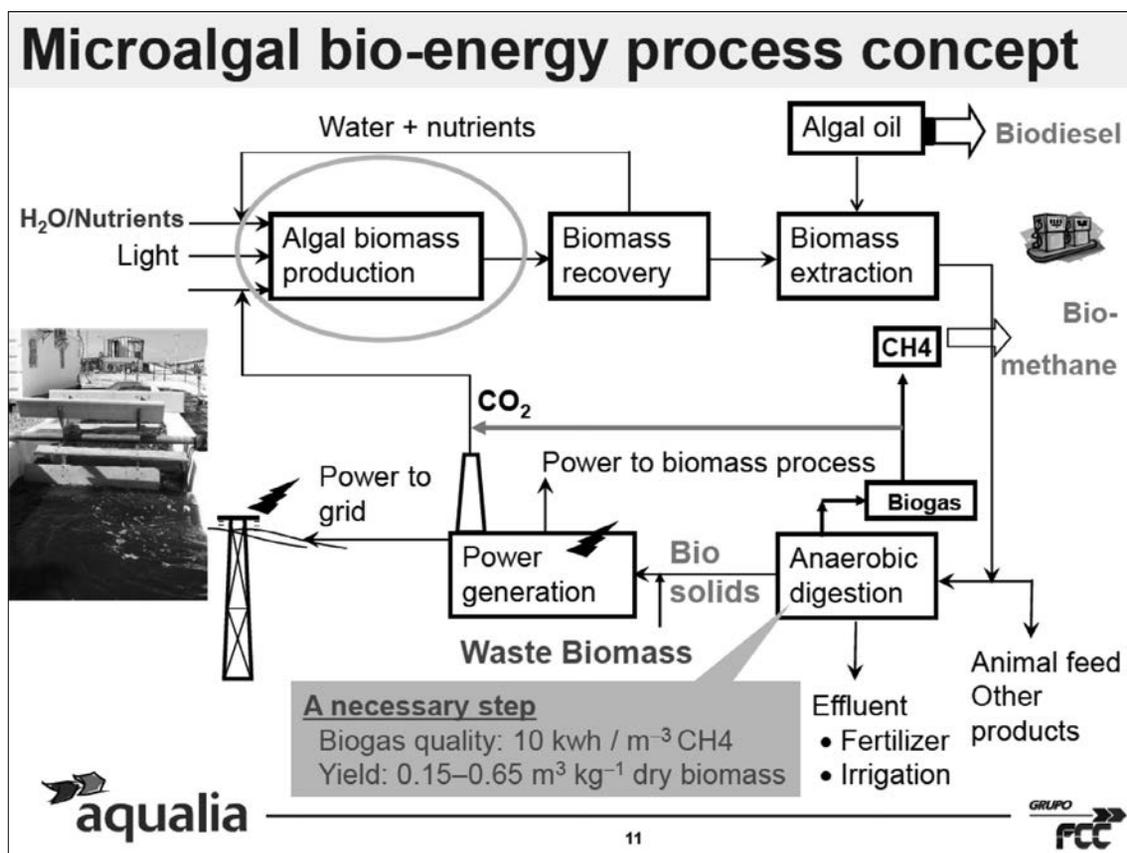


Figure 1. Schéma du processus micro-algues

Soit, en fonction de l'acceptabilité sociale, on utilisera des algues génétiquement modifiées qui produiront directement des biokérosènes.

Partout dans le monde, les chercheurs et industriels conçoivent des systèmes intégrés. Aqualia est porteur du projet FP7 All-Gas pour recycler les nutriments et réutiliser l'eau à travers les biocarburants à base d'algues.

1. Différents modes de culture de micro-algues

A) La voie photosynthétique ou autotrophie

La culture d'algue par autotrophie repose sur la photosynthèse et l'alimentation en CO₂. Les micro-algues peuvent être cultivées en *open pond*, bassins à ciel ouvert avec roues à aubes, ou *raceways* comme c'est le cas en Australie, en Israël ou aux États-Unis. Selon le Dr John Bennemann, conseiller du Future Fuels Consortium, qui a travaillé dans le domaine des micro-algues pendant 30 ans aux États-Unis, 99% des micro-algues dans le monde sont cultivées dans des *raceways*. L'inconvénient pour les pays tempérés, c'est qu'il faut un taux d'ensoleillement et des températures que l'on trouve surtout à la latitude de l'équateur pour obtenir le meilleur rendement. Les Israéliens cultivent en plein air une micro-algue survivante de la mer morte, la *Dunaliella Salina*, très riche en bêta-carotène. Ils l'utilisent pour produire des milliers de tonnes par an de colorant alimentaire E 160a. C'est cette algue que l'on trouve aussi dans les étangs en Camargue et qui donne leur couleur aux flamants roses par transmission dans la chaîne alimentaire.

Dans le cadre du projet Salinalgue qui fait partie du programme Greenstars destiné à produire des biocarburants algaux, la *Dunaliella Salina* est cultivée dans des bassins à ciel ouvert de l'étang de Thau dans une eau salée qui les préserve de la contamination. La proximité de la raffinerie de Fos-sur-Mer permet de fournir les intrants nécessaires à leur culture, tels que le CO₂, les nitrates et les phosphates. Seul inconvénient, le rendement est peu élevé, cette algue extrémophile ayant une croissance lente.

On sait aussi cultiver d'autres espèces de micro-algues moins résistantes dans des photo-bioréacteurs (PBR) fermés pour éviter les problèmes de contamination. En contrôlant la lumière, le PH, la température, l'agitation. Des prototypes de PBR sont mis en place un peu partout en Europe (en Espagne, en Italie, aux Pays-Bas, en Allemagne, en France) et l'on assiste à un véritable boom des recherches pour augmenter leur productivité et leur rentabilité. Ces systèmes tubulaires, qu'ils soient flottants, à la verticale ou à l'horizontale, ont une rentabilité encore insuffisante. Dès qu'il s'agit d'extraction de micro-algues, les exploitations sont très coûteuses en eau, en CO₂, en phosphates et en électricité.

L'ennemi numéro 1, c'est l'eau que l'on doit manipuler en grande quantité, non seulement pour éviter les excès de chaleur, mais aussi pour filtrer les algues (1 kg d'eau pour extraire 1 g d'algue). Au lieu d'utiliser des systèmes mécaniques, on utilise maintenant des systèmes Airlift qui pulsent de l'air pour faire circuler les micro-algues dans les tuyaux.

B) L'hétérotrophie

L'hétérotrophie est une culture par fermentation en cuve dans le noir avec des apports de sucres (carbo-hydrates) et de sous-produits industriels. Grâce aux Japonais, il a été découvert que des cultures de micro-algues peuvent se développer en l'absence de lumière : elles vivent sur leurs réserves de sucres.

«Le développement des micro-algues dans des conditions photosynthétiques très contrôlées ne dépasse guère actuellement une concentration cellulaire de 3 g de matière sèche par litre. Si l'on rajoute un peu de sucre dans les PBR, la concentration va augmenter d'un facteur 10 avec une composition biochimique intermédiaire. La productivité est beaucoup plus élevée dans le cas des systèmes en hétérotrophie. La société Fermentalg à Libourne, par exemple, a réussi à monter à des concentrations de 100 g/l et plus. La qualité chimique de la biomasse n'est plus la même qu'en autotrophie, sans fixation de CO₂ et émission d'oxygène. C'est quand même la voie d'avenir pour de nombreux métabolismes comme les lipides», résume

Claude Gudin. Et de préciser que, de plus en plus, les entreprises se dirigent vers la mixotrophie : celles qui ont des PBR en pleine lumière ajoutent des sucres et celles qui ont des fermenteurs avec des micro-algues ajoutent de la lumière. Son pronostic : dans les cinq ans à venir, toutes vont se tourner vers la mixotrophie.

Selon Claude Gudin, il y a plus de différences entre une même algue selon les différents *process* de cultures (en *batch* discontinus ou en continu) qu'entre des algues différentes. «*J'ai travaillé dès le début de ma carrière avec le Pr Jacques Sênèze et le Pr Jacques Monod qui a inventé le procédé de la culture en continu. À l'époque, il s'agissait de produire des levures sur des normales paraffine et ça marchait. Nous nous sommes heurtés au problème de la concurrence avec le tourteau de soja*», rappelle-t-il.

2. La transition micro-algues est-elle envisageable ?

Différents scénarios s'affrontent à l'heure où il faut réduire la facture énergétique et, dans le même temps, éviter que le réchauffement climatique ne dépasse, d'ici à 2100, les 2°C (au rythme de 0,2 degré par décennie) et surtout éviter qu'il n'atteigne +3-4°C voire +6°C, qui constitue le scénario le plus noir des prévisionnistes. Cette double contrainte laisse envisager plusieurs choix énergétiques.

Ne rêvons pas. Les biocarburants tirés des micro-algues ne seront pas produits en quantité telles qu'elles pourront remplacer le pétrole avant la fin du XXI^e siècle. Car l'une des contraintes majeures est le prix de l'électricité nécessaire pour les produire. Tel était le pronostic de Marc Roquette, le P-DG de Roquette Frères, numéro 2 de l'amidon, dès la fin 2011 suite à la signature d'une *joint venture* avec Solazyme, l'une des plus grosses *start-up* américaines du secteur en novembre 2010.

En réalité, il y a un consensus pour reconnaître que les micro-algues, dans le domaine énergétique, seront surtout utilisées pour produire des biocarburants pour l'aviation. Les

principales compagnies Exxon, Mobil, Total, Shell, ont investi des sommes colossales pour la recherche dans le domaine des micro-algues. Les compagnies aéronautiques sont aussi impliquées du fait qu'elles sont contraintes de réduire leurs émissions carbone. EADS a déjà démontré, par des vols d'essai, qu'il était techniquement possible d'utiliser du bio-kérosène à partir de

micro-algues : notamment sur un Paris-Toulouse d'Air France et sur un autre vol avec la Lufthansa. Après avoir établi la faisabilité, reste à prouver que c'est écologiquement et économiquement possible.

A) Un potentiel énorme pour les carburants des avions

Après son premier vol d'essai à partir d'algo-carburants purs au salon d'Ila (Allemagne) en 2010, EADS affirme sa volonté de développer des biocarburants d'origine algale dont le bilan environnemental est positif. «*Les tests ont prouvé qu'il fallait des modifications et des adaptations mineures des moteurs d'avions pour homologuer le bio-kérosène pour le vol d'essai. La consommation du Diamond D42 nouvelle génération est de 1,5 l/h avec ce biocarburant, soit inférieure à celle du carburant Jet-A1 conventionnel, à performances égales. De plus, la quantité de dioxyde de carbone expulsée durant le vol est équivalente à la quantité nécessaire pour faire pousser les algues. Cela ouvre la voie à des vols à CO₂ neutre. Les émissions de nitrates et de sulfates seront aussi réduites, de 40% pour les nitrates. Quand aux particules de sulfates, elles sont de 10 ppm contre 600 ppm avec le Jet-A1. Cela s'explique car les algo-carburants n'en contiennent pas*».

EADS considère donc les micro-algues comme très prometteuses et multiplie les partenariats avec les gouvernements, les sociétés (en *venture capital*) et les organismes de recherche les plus pointus au monde pour atteindre les objectifs établis pour l'aviation d'ici 2020 par l'ACARE (Advisory Council for Aeronautics Research in Europe) qui fixent la réduction du CO₂ à 50% et pour les nitrates à 80%.

Dans un communiqué de presse, EADS décrit le processus de culture des micro-algues : «*Les algues peuvent être récoltées chaque jour. Il faut des filtres et des centrifugeuses pour retirer 90% de l'eau qui est presque entièrement recyclée. L'huile contenue dans l'algue est extraite par un procédé mécanique et chimique puis raffinée en biocarburant. Pour 100 kg de biomasse algale, il faut 180 kg de CO₂. De ces 100 kg, on va pouvoir extraire 22 litres d'huile d'algue qui, une fois raffinée, donnera 21 litres de biocarburants. Les 80% de la biomasse restante pourront être employés pour d'autres applications: chaleur/énergie, nourriture animale et engrais*». Le *business model* est tracé.

Cependant, c'est une voie de production de bio-kérosène parmi d'autres. À Toulouse, de par sa proximité avec Airbus, le programme Probio3 doté de 8 millions d'euros coordonne seize équipes françaises autour de l'INRA-LISBP (Laboratoire d'ingénierie des systèmes biologiques et procédés) pour développer une nouvelle filière de production des bio-kérosènes pour l'aviation d'ici 2020: la production microbienne de lipides spécifiques par conversion de ressources renouvelables non alimentaires et coproduits industriels. Avec l'IRT aéronautique toulousain, la Toulouse White Biotech et l'IEED Pivert (Troyes) vont étudier le métabolisme lipidique des levures et des bactéries avec des approches en génomique et méta-génomique, ce qui permettra le développement de nouvelles stratégies de biocatalyseurs améliorant la productivité et la composition en lipides.

Le directeur d'IFP Énergies nouvelles, Olivier Appert, ne prévoit pas le développement de projets de production de biocarburants à partir des micro-algues avant 2030, et encore... L'IFP EN a investi dans des prototypes produisant des biocarburants de deuxième génération, notamment dans le pilote du projet Futurol sur le site de Pomacle-Bazancourt (Marne) soutenu par l'Inra, qui vise à mettre au point et à commercialiser un procédé complet de production de bioéthanol de deuxième génération par hydrolyse enzymatique des résidus végétaux ligno-cellulosiques: bois à croissance rapides, paille, etc. Lors de son inauguration fin 2011, Olivier Appert soulignait que les bio-

carburants ne représentaient encore, en 2009, que 3,1% du marché mondial des carburants, contre 57,5% pour l'essence et 36,1% pour le diesel.

Se pose également le problème de la concurrence avec les autres nouvelles sources d'énergie, comme par exemple le gaz de schiste. Dans ces conditions, les investissements nécessaires à promouvoir le passage à la phase de production industrielle des micro-algues pourront être différés.

L'investissement mondial dans la recherche sur la *biomasse* marine dépasse aujourd'hui les 2 milliards de dollars. Dans le domaine des énergies renouvelables, les micro-algues trouveront des applications industrielles pour la production de biodiesels, bio-kérosènes, biogaz ou encore d'hydrogène, mais aussi pour la captation du CO₂ dans les sites industriels ou pour la dépollution des eaux. Des solutions pour l'habitat émergent également pour réaliser des économies d'énergie dans les bâtiments grâce à des systèmes de tuyaux ou de façades intégrant des cultures de micro-algues.

B) Les atouts de la France

Outre ses 5000 km de littoral, la France est le premier pays par le nombre des publications scientifiques et le quatrième pour celui des brevets concernant les micro-algues après les États-Unis, le Japon et la Chine... Chercheurs et industriels français travaillent en étroite collaboration pour se hisser, d'ici à cinq ans, parmi les tout premiers au niveau de la planète. Quant aux pouvoirs publics, ils financent largement la recherche sur la valorisation des micro-algues dans le cadre des investissements d'avenir du Grand emprunt dotés globalement de 35 milliards d'euros sur 10 ans, doublés d'un apport équivalent du secteur privé. Sur les 20 milliards retenus pour la recherche, l'ANR (Agence nationale de la recherche) finance trois appels à projet: le premier sur les démonstrateurs préindustriels en biotechnologies, le deuxième sur les 52 équipements d'excellence (340 millions d'euros) et le troisième sur les sociétés d'accélération de transferts de technologie (SATT).

L'ANR poursuit les recherches menées au cours du programme BIOE (2008-2011) sur les biocarburants de deuxième génération (ligno-cellulosique) et met désormais l'accent sur les biocarburants de troisième génération à partir de micro-algues. Leurs avantages : ils ne concurrencent pas les terres agricoles et ont un meilleur bilan environnemental. À la suite du programme Shamash (2006-2009), différents projets spécifiques sur les micro-algues sont en cours : Symbiose, Algoraffinerie, etc. L'ANR participe également au programme Net BIOME Matières et énergies, lancé en 2011, sur la biodiversité le long des côtes marines avec les Canaries, l'Espagne et le Portugal.

Green Stars veut industrialiser les micro-algues

L'appel d'offre sur les IEED (Institut d'excellence en énergie décarbonée) lancé en octobre 2010 est doté d'1 milliard d'euros sur 10 ans. Le projet Green Stars a été doté de 12 millions d'euros sur 3 ans pour ouvrir la voie à une filière française pour les biocarburants extraits des micro-algues. Porté par GDF-Suez (La Compagnie du Vent), il fédère des acteurs français : l'INRIA (Institut de recherche en informatique et en automatique), Sofia Antipolis, l'INRA-LBE à Narbonne, le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) avec le CNRS, l'Ifremer (Institut de recherche pour l'exploitation de la mer) ainsi que les industriels tels que Veolia, Air Liquide, EADS, PSA ou Veolia Environnement et un réseau de PME. Son campus principal est installé autour de l'étang de Thau, dans l'Hérault. Le laboratoire d'océanographie de Villefranche-sur-Mer (CNRS-Université Pierre et Marie Curie) y participe également. Il est situé à proximité de la raffinerie de Fos-sur-Mer pour récupérer les nutriments nécessaires à la croissance des algues. Deux ans après son démarrage, il semble que les résultats ne soient pas au rendez-vous.

Du côté de l'Atlantique, la plate-forme Défi-µAlg a été labellisée Plate-forme de recherche et de développement et a reçu 3,5 millions d'euros en mars 2013 (Région Pays de la Loire, Carene, CG Loire-Atlantique, Nantes Métropole, CCD). Elle réunit, sous la bannière du GEPEA

(Génie des procédés environnement et agroalimentaire), une unité mixte de recherche 6144 du CNRS qui rassemble une équipe de quarante chercheurs dédiés aux recherches sur les bioprocédés concernant la production de micro-algues depuis 20 ans, l'université de Nantes et différents partenaires, l'Institut Pascal de l'université Blaise Pascal, l'INRIA, Airbus-EADS et le groupe Algosource.

Une convention de partenariat a été signée entre le pôle Atlanpole de Nantes-St Nazaire et le pôle Mer Bretagne. Une manière d'afficher la bannière grand-ouest sur la façade atlantique. La Bretagne a une tradition de récolte et d'exploitation des algues qui remonte au Moyen-âge. Celles-ci étaient alors utilisées comme amendement et ont contribué à la richesse agricole de la région. À partir du XIX^e siècle, l'industrie agro-alimentaire a fait appel aux extraits d'algues dont la France est à présent le deuxième producteur après les États-Unis. Les compétences scientifiques de la région ligérienne sont parmi les plus élevées au monde dans le domaine des micro-algues, avec notamment l'université de Nantes, la deuxième université française, et l'Institut de physiologie et de biotechnologie des algues dirigé par le professeur Jean-Paul Cadoret au sein de l'Ifremer. Ce chercheur de renommée mondiale, qui a développé plusieurs brevets sur les micro-algues, a lancé fin 2010 le Blue Cluster pour valoriser les micro-algues, les micromycètes et les sous-produits de la mer (il réunit 36 labos de recherche et 52 PME). Situé sur l'arc Atlantique, le pôle Mer Bretagne est associé à des clusters en Norvège, au Québec (un accord de partenariat a été conclu à Biomarine en août 2011 avec le CRBM de Rimouski), avec la région de Galway en Irlande et aussi avec un cluster (pôle de compétences) dans le sud de l'Angleterre, à Plymouth, qui ont eux aussi une tradition de culture d'algues. Il développe une alliance stratégique dans le domaine des bio-ressources et biotechnologies marines avec la région ligérienne.

Des initiatives multiples sur la façade atlantique

Enfin, l'Ademe a reçu une enveloppe de 1,35 milliard d'euros pour mettre en place les démonstrateurs pour la chimie verte et

les énergies renouvelables. Dans le cadre du Grenelle de l'environnement, l'industrie chimique française s'est engagée à passer d'une utilisation de 5 à 8% de matières premières d'origine végétale à 15% d'ici à 2017 et à 50% d'ici 2050.

Les pôles Mer Bretagne et Mer Paca défendent les orientations du Grenelle de la mer. Le président du pôle Mer Paca, Robert Gandolfo, chef du projet Salinalgue, témoigne dans le livre *Turquoise sur les micro-algues*, « Algues : les filières du futur », à la suite du colloque organisé par l'association Adebiotech fin 2010. « Depuis leur création, les pôles Trimatec, Mer Paca, Mer Bretagne et Industries et agro-ressources (IAR), auquel s'est joint au printemps 2011 le pôle réunionnais Qualitropic, se sont intéressés à la thématique de production et d'utilisation de la biomasse algale, dont les grandes applications sont en adéquation avec les axes thématiques de ces quatre pôles : énergies renouvelables; bio-raffinerie, génie des procédés; aquaculture et alimentation; matières premières pour la chimie verte et enfin biotechnologies par la production d'actifs ou de molécules à forte valeur ajoutée destinées à la nutrition-santé, la pharmacie ou la cosmétique. Ainsi, les pôles ont labellisé depuis 2005 plusieurs projets de recherche à l'exemple de Shamash ou Symbiose et de nombreux projets industriels, Salinalgue, Eima, Algohub, Eco-kelp, Azostimer, Toplipid... 51 projets y ont été recensés pour plus de 350 millions d'euros de budget ».

Les recherches vont se concentrer sur les organismes génétiquement modifiés (OGM), d'autres vont se pencher sur les métabolites primaires et secondaires issus des micro-algues. La tendance est au développement des bibliothèques d'extraits marins tels que celle de Biodimar avec l'université de Bretagne Ouest. La station biologique de Roscoff possède, elle, une collection de 1900 souches d'algues, l'Institut océanographique de Monaco, qui vient de fêter ses cent ans, environ 900. L'Ifremer de Brest sous la direction de Jean Guézennec s'oriente sur la recherche de micro-organismes

marins vivant dans des conditions extrêmes, notamment dans les Dom-Tom, en Polynésie, aux Antilles et à la Réunion.

Les macro-algues aussi

Parmi les projets retenus dans l'appel d'offres « biotechnologies-bio-ressources », figure celui porté par la station biologique de Roscoff (UPMC-CNRS) sur la valorisation des macro-algues. Un projet piloté par le PRES université européenne de Bretagne (UEB), soutenu par la Région et animé par Philippe Potin, directeur de recherches CNRS à Roscoff. Ce projet doté de 10 M€ sur 10 ans rassemble 18 entreprises et le CEVA (Centre d'étude et de valorisation des algues). Il couronne le travail conduit en amont par Philippe Potin et son équipe sur la biologie et la génomique des algues dans une optique de développement et de valorisation de la biomasse marine et de sa diversité. Autre bio-raffinerie orientée sur le

Les recherches vont se concentrer sur les organismes génétiquement modifiés (OGM)

traitement des algues vertes cette fois, le projet Ulvans porté par la société Olmix situé à Bréhant dans le Morbihan a été labellisé par le pôle Mer Bretagne. Le projet devrait être financé par Oséo à hauteur de 25 millions d'euros. Rappelons que les algues vertes ont défrayé la chronique estivale et que certaines plages ont été

fermées à cause des émanations de gaz qui en échappaient et ont causé la mort de plusieurs sangliers.

Entreprise du nord réputée, le groupe Roquette Frères participe à la création d'une filière européenne spécialisée dans les micro-algues. L'amidonnier est le porteur d'un projet de bio-raffinerie algale, le programme Algohub, qui a été labellisé par deux pôles de compétitivité, le pôle « Nutrition Santé Longévité » de Lille et le pôle « Filière produits aquatiques » et validé par OSEO en 2008. Le montant du financement total s'élève à 28,4 millions d'euros sur 6 ans et 9,7 millions d'euros de subventions et aides remboursables. L'usine allemande de Roquette située à Klötze dispose du plus grand photobioréacteur en Europe (500 km de tubes).

Assurément, la France joue sa carte dans la compétition mondiale qui fait rage actuel-

lement autour des micro-algues pouvant être transformées en biocarburants.

3. Des investissements à l'échelle planétaire

A) Aux États-Unis, un fort engagement des pouvoirs publics

Il y a 15 ans, les États-Unis ont renoncé à produire des carburants à partir de micro-algues. À l'époque, Bill Clinton a arrêté les recherches du National Renewable Energy Laboratory consacrées aux micro-algues, qui avaient débuté dans les années 1970 après le premier choc pétrolier, parce que l'accès aux ressources pétrolières était sécurisé grâce à un accord avec l'Arabie Saoudite. Les temps ont changé quelques guerres plus tard (Irak, Afghanistan, Lybie). Depuis les années 2000, plus de 2 milliards de dollars de fonds privés ont été investis sur ce terrain. La quête de solutions alternatives au pétrole dont le coup renchérit pousse les pouvoirs publics à financer à nouveau des programmes de recherche.

Le président Barack Obama a annoncé, le 23 février 2012 à l'université de Miami, qu'il allait allouer 14 millions de dollars à des programmes de recherche et de développement spécifiques au secteur des micro-algues afin de réduire de 17% les importations de carburants grâce aux algo-carburants. En diminuant ces importations (estimées à 1 milliard de dollars par jour) d'ici 2013, les budgets pourraient être consacrés à l'amélioration des procédés de transformation des algues. Ces subventions sont attribuées dans le cadre du programme « Biomasse » piloté par le DoE (Department of Energy). Selon le *Renewable Fuel Standard 2*, publié par l'agence de protection de l'environnement américaine (EPA), les algues font partie de la catégorie des biocarburants dits « avancés ». En 2012, les estimations de production pour cette catégorie étaient de 8,8 milliards de litres.

Barack Obama s'engage

L'objectif est d'atteindre un volume de production de biocarburant à base d'algue égal ou supérieur à 3,7 milliards de litres par an d'ici 2022. Ce budget vient en complément

des subventions d'un montant de 84 millions de dollars attribué par le DoE à 30 projets en cours de réalisation.

D'autant plus qu'en juillet 2010 déjà, le DoE avait lancé un plan de 23 millions de dollars pour financer trois consortiums. Le Sustainable Algal Biofuels Consortium (Mesa, Arizona), doté de 6 millions de dollars et dirigé par l'université d'État d'Arizona, se concentre sur les tests de convertibilité des carburants à base d'algues pour remplacer les carburants issus du pétrole sous les aspects biochimiques et physico-chimiques. Le Consortium for Algal Biofuels Commercialization (San Diego, Californie) doté de 9 millions de dollars, est mené par l'université de San Diego : il cherche à développer des algues suffisamment robustes pour assurer un cycle de production de biocarburants, ce qui implique des approches de protection des récoltes, de rationalisation d'apports et de recyclage des nutriments et aussi de développement d'outils génétiques. Le SD-CAB (San Diego Center for Algae Biofuels) développe des *raceways* en plein air sur 16 ha. La région de San Diego bénéficie également d'un environnement scientifique de pointe avec la proximité du San Diego Center for Algae Bioresource, du SCRIPPS Research Institute et du SCRIPPS Institute of Oceanography.

Enfin, le Cellana, LLC Consortium (Kailua-Kona, Hawaï) est doté de 9 millions de dollars. Porté par Cellana LLC, il examine la production de carburants à grande échelle et celle de nourriture pour l'aquaculture à partir de micro-algues poussées en mer. Cellana opère sur un site d'un peu moins de 2,5 ha de *raceways* à Hawaï. D'autres universités américaines contribuent aussi à ces recherches : la New Mexico State University et l'University of Central Florida se partagent une subvention de 2,3 millions de dollars attribuée par l'US Air Force pour développer les biocarburants.

En mars 2013, Barack Obama a confirmé ses mesures pour une croissance verte dans un discours à l'Argonne National Lab (près de Chicago) et annoncé qu'il allait encore consacrer 200 millions de dollars à la recherche sur les technologies d'énergie verte. Il avait au préalable consulté les principaux industriels dans le domaine de l'énergie (gaz, essence) et

de la croissance verte dont Sapphire Energy est l'une des plus emblématiques.

Sapphire Energy a reçu 104,5 millions de dollars en 2009 pour la construction de son pilote de 40 ha à ciel ouvert sur le site de Columbus au Nouveau Mexique puis 54,5 millions de dollars complémentaires en 2011 dans le cadre du projet Biomasse par le DoE. En 2012, la *start-up* a annoncé avoir reçu une nouvelle tranche de 144 millions de dollars, portant à 300 millions de dollars l'investissement total de cette ferme algale de 120 ha qui sera achevée en 2014. Bill Gates a investi 100 millions de dollars dans le projet. L'objectif est de produire des volumes de biodiesels à partir d'algues supérieurs à 3,7 milliards de litres d'ici 2022 à un prix de 85 dollars le baril. Cynthia Warner, le CEO de Sapphire Energy, qui produit 2 barils par jour (80 gallons) prévoit une production de 100 barils par jour d'ici un an, soit 35 000 barils par an (et 10 000 barils par jour d'ici 2018). Des économies d'échelle viendront avec des surfaces de 400 à 2 000 ha.

Sapphire Energy cultive les algues en autotrophie dans sa ferme algale composée de bassins en plein air. Elle a développé des micro-algues résistantes aux maladies (fongiques notamment) et croissant des conditions difficiles (PH ou salinité élevée) ; et, avec l'allemand Linde, elle a conçu un procédé pour alimenter la ferme algale avec du dioxyde de carbone provenant de raffineries. Le coût de production d'algo-carburants est de 1,4 cent de dollar par litre. En mars 2013, la société a annoncé qu'elle avait trouvé un premier client de biocarburant algal : le groupe Tesoro Corporation (une raffinerie de la côte Ouest américaine) va acheter sa production actuelle. Les deux entreprises ont pour objectif d'obtenir une certification de l'Agence de protection de l'environnement américaine pour un usage routier. En effet, Tesoro voudrait vendre des biodiesels issus des algues, pour des équipements agricoles et des générateurs.

*Un gros débouché
avec les carburants des avions*

Autre *start-up* californienne spécialisée dans les micro-algues, Solazyme a levé 227 millions de dollars à la bourse en mai 2011.

La société a signé un accord avec Qantas, une compagnie d'aviation australienne qui veut réussir à produire son carburant SolaJet en Australie. La compagnie aérienne est intéressée par la possibilité de produire un biocarburant qui permette de réduire les émissions de CO₂ de 80% et a également signé un accord avec la compagnie américaine Solena. Jonatan Wolson, le directeur de Solazyme, espère ainsi diminuer le prix de vente du carburant algal pour le transport dont le prix de production est, pour l'instant, deux fois plus cher que celui des diesels et carburants traditionnels.

Solazyme cultive les algues hétérotrophes dans le noir, dans des cuves où les organismes mangent de la canne à sucre ou des déchets de maïs et excrètent de l'huile. En 10 ans, Solazyme qui a été créée en 2003, a déjà levé 128 millions de dollars de ses divers investisseurs – entre autres Richard Branson, le patron de Virgin, et Chevron – et a négocié un accord avec l'US Navy. Cosmétique, chimie verte, nutrition, la *start-up* diversifie les applications. Elle a signé une *joint venture* avec Roquette Nutritionnel, établi un contrat avec Unilever pour produire des savons à base d'algues plutôt que d'huile de palme afin de « reverdir » son image altérée par une campagne de Greenpeace. Grâce à une innovation de rupture, l'acide algonique, elle commercialise des produits anti-âge vendus chez Sephora. Elle envisage à présent de fournir des fluides algaux à l'un des géants de la chimie Dow Chemical pour 20 millions de gallons (environ 76 000 millions de litres) d'ici fin 2013 et 60 millions d'ici 2015. Autant d'activités qui lui permettent de financer son autre activité. Solazyme va surtout produire des biocarburants algaux pour Chevron à un coût de production annoncé de 60 à 80 dollars le baril. Un objectif qui, selon son P-DG, nécessite de passer à la culture d'algues à grande échelle, pour un investissement estimé à plus 100 millions de dollars. Solazyme devait commercialiser à partir de juillet 2011 son carburant vert à un prix de 3,30 dollars le gallon (3,685 litres) contre 3 dollars le gallon pour les carburants à base de pétrole. Il affirme qu'il est en voie de produire 120 millions de gallons par an d'huile algale et qu'il a pour objectif d'être compétitif sur tous ses marchés, y compris celui

des biocarburants. Il en appelle aux investisseurs américains car il estime pouvoir gagner des milliards de dollars avec ces alco-carburants pour l'aviation. Même si, selon Forbes, ses dividendes ont chuté de 30% en 2012 et que ses pertes ont atteint 83 millions de dollars pour 44 millions de dollars de vente. Il est vrai que les risques pour les *start-up* du secteur sont encore considérables.

*Un avantage :
des prix qui sont appelés à baisser*

La demande émergente des compagnies aériennes va excéder de loin les capacités de production dans les prochaines années. À la différence de l'industrie automobile qui a résisté durant des décennies à fabriquer des véhicules fonctionnant avec des carburants plus efficaces, l'industrie aéronautique adhère aux biocarburants. La vitesse de la transition verte va rapidement contribuer à faire baisser les prix. D'autant plus que, de 2010 à 2012, les dépenses en carburants traditionnels des cinq principales compagnies américaines sont passées de 25 à 39,6 millions de dollars, soit un bond de 58% (Air et Cosmos), le prix du baril de pétrole ayant augmenté.

Pour une compagnie comme American Airlines qui consomme 4 milliards de gallons de carburants pour un coût annuel de plus de 121 milliards de dollars, la problématique consiste à accélérer la baisse des prix, quitte à faire payer davantage leurs clients fortunés... ceux qui seraient disposés à payer plus cher des vols avec un carburant mi-algues, mi-pétrole. United Airlines a réalisé son premier vol transatlantique (Miami-Roissy) avec du carburant vert en 2009 et son premier vol commercial (Houston-Chicago) en 2011 avec un mix à 40% Solazyme et 60% carburant traditionnel.

Le fantastique effet d'annonce de Graig Venter, directeur de Synthetic Genomics, qui a réussi à modifier le génome d'une bactérie est

**Produire un
biocarburant
qui permette
de réduire les
émissions de CO₂
de 80 %**

encore présent à tous les esprits. Synthetic Genomics (La Jolla, Californie) a conclu un accord de recherche de 600 millions de dollars avec Exxon pour développer des micro-organismes issus de la biologie de synthèse. Le passage à la phase industrielle dément parfois les performances en laboratoires. C'est ainsi que la société Greenfuel Technology,

une *spin-off* du MIT (Massachusetts Institute of Technology), qui avait pourtant levé 70 millions de dollars, s'est effondrée. GreenFuel Technologies avait remporté un contrat de 92 millions de dollars avec la société espagnole Aurantia pour la fourniture de 25 000 tonnes de micro-algues par an, mais n'a pu l'honorer suite à des difficultés de financement.

Malgré des risques encore considérables pour les *start-up* du secteur, les prévisions sont optimistes comme le montrent les résultats d'une enquête réalisée par l'ABO (Algae Biomass Organisation) auprès de 470 industriels des algues : 67% des producteurs d'algues prévoient de développer leurs capacités en 2013 et 95% d'entre eux estiment que les biocarburants à partir d'algues pourront voir le jour d'ici 2020. Voir : <http://www.algaebiomass.org/algae-industry-map/>.

Origin Oil affirme que, si l'on mélange des algues et des déchets, on obtient un coût de production de 0,6 centime d'euro par litre qui se rapproche du coût de l'essence (0,4 centime/l).

Les États-Unis ont recommencé les recherches dès 2002, prenant de l'avance sur l'Europe qui a vraiment démarré à partir de 2007. Les investissements en *venture capital* sont moindres en Europe qu'aux États-Unis. L'in-

vestissement privé y est également beaucoup moins important et les sociétés européennes dans le domaine des micro-algues sont encore de petites PME par rapport aux États-Unis. Les investissements d'État sont aussi plus massifs et affirmés aux États-Unis qu'en Europe.

**67 % des
producteurs
d'algues prévoient
de développer
leurs capacités
en 2013**

B) En Europe, plus d'une vingtaine de programmes financés par l'UE

Début novembre 2010, la Commission européenne a appelé les pays de l'UE à investir 1 000 milliards d'euros d'ici à 2020 pour se préparer à faire face à l'explosion du prix des ressources fossiles et pour réduire leur dépendance énergétique vis-à-vis de fournisseurs étrangers. Ceci dans un contexte de réduction des gaz à effet de serre pour éviter le réchauffement climatique. La Commission européenne a prévu de réduire de 20% les émissions de CO₂ d'ici 2020. À présent, elle propose de discuter dans les mois à venir d'une réduction des gaz à effet de serre, à - 40% en 2030. En France, le président de la République, dès la conférence environnementale de septembre 2012, s'est prononcé en faveur d'objectifs européens ambitieux : - 40% en 2030 et - 60% en 2040. Par ailleurs, la Commission s'est engagée à ce que l'UE produise 20% d'énergies renouvelables d'ici 2020.

En Europe, on dénombre au moins 19 programmes de recherche ayant trait aux micro-algues en 2012 : tels que le programme FP7 Suprabio sur les bio-raffineries à partir de la paille et du bois où les micro-algues, encore trop chères, servent seulement à recycler les déchets ; Aquafuels qui s'est terminé en août 2011 ; ou encore BIOFAT (BIO fuels from Algae Technologies), un projet de démonstrateur de 10 ha coordonné par Algafuel, une filiale du portugais Necton, avec huit autres partenaires européens. Il se fixe pour objectif de réaliser un démonstrateur sur 10 ha avec une raffinerie pour une production de 70 à 100 t/ha/an de biodiesel et de bioéthanol.

Biocarburants : un bilan environnemental positif pour les micro-algues

En février 2010, plusieurs éminents scientifiques de l'EABA (Association européenne pour les biocarburants à base d'algues) ont annoncé que les biocarburants à base de micro-algues avaient un bilan environnemental positif qui permettait de réduire l'empreinte CO₂ dans le domaine des transports et de l'aviation. Fin 2011, lors d'une session à Bruxelles de l'EABA (qui regroupe 77 membres, dont 38

industriels et de nombreux chercheurs) était présenté dans le cadre du FP7 2013 le projet Biofuel Flight Pass pour répondre à la feuille de route «The Aviation Biofuels Flight 2020» qui prévoit de produire 2 millions de tonnes de biocarburants pour l'aviation d'ici 2020. Le partenariat regroupe les gouvernements et l'industrie : Lufthansa, KLM, Airbus, Air France, etc. En effet, dans le cadre du programme Cleansky, les industriels de l'aviation se sont engagés à réduire leurs émissions de CO₂. De même, une baisse de 50% des nuisances des avions d'ici 2050 est souhaitée par l'International Civil Aviation Organisation. Le Biofuel Flight Pass vise à couvrir 4% de la consommation européenne de carburant pour les compagnies d'aviation (qui est actuellement de 53 millions de tonnes par an de kérosène, 200 millions de tonnes par an au niveau mondial). Sur le plan réglementaire, les biodiesels produits à partir d'algues doivent respecter les normes européennes EN 14214 et AST D6751, applicables à tous les biocarburants.

En 2013, trois nouveaux programmes de recherche européens ont d'ores et déjà été adoptés, parmi lesquels le FUEL4ME - Future European League for Microalgal Energy, porté par l'université néerlandaise de Wageningen dédié à différents systèmes de cultures d'algues et le Wageningen Food& Biobased Research et différents partenaires : Ben Gurion University of the Negev, Israël ; Fotosintetica & Microbiologica S.r.l., Italy ; Biotopic, Denmark ; Evodos BV, Netherlands ; Pursuit Dynamics PLC, United Kingdom ; Feyecon Development and implementation BV, Netherlands ; Neste Oil Corporation, Finland ; Joanneum Research Forschungsgesellschaft MBH, Austria ; ID-Consortium SL, Spain.

Des projets financés par les principaux pays européens

Au-delà des projets soutenus par l'Union européenne, en Europe, chaque pays développe ses propres programmes de recherche auxquels sont associés des entreprises et des laboratoires.

En Italie, les micro-algues suscitent de l'intérêt. Le Pr Mario Tredici de l'université de Florence, président de l'EABA, a fondé la

société Fotosintetica & Microbiologia. Pour réduire les coûts énergétiques de production, il a imaginé d'associer à ses *Green Walls*, composés de réacteurs tubulaires verticaux en plexiglas, des éoliennes et des panneaux solaires pour produire de l'électricité destinée à alimenter le système. Via son laboratoire à Florence, il est le responsable scientifique du projet Mambo qui se donne pour objectif de démontrer la viabilité économique, technique et environnementale des *process* de production de biodiesel par mixotropie (avec l'italienne Biodiesel Manufacturer Association). Par ailleurs, les filiales ENI de Gela et Enel de Brindisi mènent le projet italien Green Wall de réalisation de panneaux de PBR avec la biotech Bioscan SA, créée par des scientifiques chiliens, et la société portugaise Necton SA.

En Espagne, à Alicante, la société Bio Fuel System lançait en février 2011 la production d'une bioraffinerie algale pour produire et commercialiser 159 barils de biocarburants de *blue.fuel*. À terme, 40 ha de culture de micro-algues devraient alimenter 170 000 PBR pour produire 230 000 barils par an. Sauf que, selon certains experts, il s'agirait d'un effet d'annonce reposant sur des procédés scientifiques peu fiables, aux performances largement surestimées.

Au troisième Algae World Europe organisé par le CMT (Center for Management Technology), la société madrilène Algae Energy présentait son dernier PBR et son démonstrateur. La société qui s'intéresse non seulement à la production d'algo-carburants, mais également à la capture et la fixation de CO₂, travaille en partenariat avec le Pr Miguel Garcia de l'université de Séville, avec les universités d'Almería, de Saint-Jacques-de-Compostelle ainsi qu'avec l'Institut espagnol d'océanographie. Par ailleurs, la division Repsol New Energy Unit de la compagnie pétrolière Repsol a acquis 20% des parts d'AlgaeEnergy, ce qui lui permet d'avoir accès à des technologies fiables pour coordonner le projet CENIT de promotion des biodiesel en Espagne intégrant le projet Cenit Vida, porté

par la compagnie d'électricité Iberdrola, qui vise à développer de nouvelles technologies énergétiques basées sur les micro-algues. Sélectionné dans le sixième appel à projet par le ministère de la Science et de l'Innovation espagnol, le projet Vida rassemble 25 centres de recherche et 15 entreprises (dont Algae Energy) et a reçu un financement global de 20 millions d'euros jusqu'en 2013.

Au Royaume-Uni, le Carbon Trust réunit neuf institutions universitaires prestigieuses (dont Newcastle, Manchester, Sheffield et Southampton) pour «screener» les algues dans l'objectif de produire 70 milliards de litres de biocarburants d'ici 2030. Ce qui devrait permettre de produire 6% du diesel pour le transport routier et de récupérer 160 millions

de tonnes de CO₂ par an. Fondé par le Department for Energy and Climate Change (DECC), le Carbon Trust envisage d'installer un démonstrateur pour la production d'huile à grande échelle dans une région équatoriale où les algues sont plus productives que sous le ciel gris de l'Angleterre. L'Écosse a également investi 5 millions de

Livres sur le sujet.

Aux Pays-Bas, l'Algae Park au sein de l'université de Wageningen rassemble différents techniques de culture sur 40 ha. DSM, le groupe de chimie hollandais, a racheté Martek Biosciences pour 1 million de dollars (790 millions d'euros environ) pour suivre sa stratégie de développement d'applications dans le domaine de la chimie verte, pour des colorants, et dans celui de la nutrition avec une nouvelle plate-forme santé et ingrédients naturels axés sur les acides gras polyinsaturés tels que les oméga 3 DHA (*docosahexaenoic acid*) et Omega-6 ARA (*arachidonic acid*). Martek Biosciences Corporation (NASDAQ : MATK) est leader dans le domaine du développement et de la production d'huiles à haute valeur ajoutée à partir d'algues telles que les huiles DHA and ARA développées selon une technologie brevetée.

**40 ha de culture
de micro-algues
devraient alimenter
170 000 PBR pour
produire 230 000
barils par an**

Priorité à la chimie verte et à la nutrition

En France, Fermentalg, pionnier et leader de la recherche, du développement et de la production de micro-algues a réuni 14,6 M€ d'aides et d'investissements avec le soutien d'OSEO pour lancer le premier projet européen d'envergure autour de l'Exploitation industrielle des micro-algues (EIMA) initié en 2011 pour une durée de 5 ans. Ce projet porte sur des souches et cultures de micro-algues dites «hétérotrophes» ou «mixotrophes», c'est-à-dire ne nécessitant pas ou peu de lumière, ce qui permet d'obtenir des rendements de 50 à 100 fois supérieurs aux cultures traditionnelles «autotrophes». Le projet EIMA devrait en effet entraîner une division par 10 des coûts de production de la biomasse issue des micro-algues d'ici 5 ans, permettant à terme son utilisation pour des applications telles que la production de biocarburants. En tant que chef de file du projet d'Innovation stratégique industrielle (ISI), il a reçu d'OSEO une nouvelle tranche de financement de 1 M€.

Le programme EIMA, labellisé par trois pôles de compétitivité (IAR, Trimatec et Pôle Mer Paca), a pour objectif de produire plusieurs molécules d'intérêt grâce à la digestion de substrats alternatifs au glucose (dérivés de produits laitiers, sous-produits sucriers, dérivés cellulosiques, etc.) par des micro-algues cultivées en mixotrophie à dominante hétérotrophe. Il s'agit donc d'identifier huit couples souches/substrats capables de produire des molécules d'intérêt à l'échelle industrielle. L'exploitation à grande échelle se fera dans le cadre d'accords de partenariats avec des acteurs industriels.

Pour mémoire, sur le marché de la nutrition humaine, Fermentalg et Sofiproteol ont créé une co-entreprise destinée à la production à grande échelle d'huiles enrichies en Omega 3 (EPA-DHA). Le consortium réunit, autour de Fermentalg, de nombreux acteurs tant industriels (Lactalis, Pierre Guérin, Rhodia et Sanders) qu'académiques (CEA, CNRS, INSA, ITERG et l'université de Bordeaux I), et vise notamment

la pénétration des marchés des cosmétiques, de la nutrition humaine, de l'alimentation animale et de la chimie verte. Depuis sa création, Fermentalg à déposé 16 familles de brevets.

On le voit, la production de biocarburants se situe encore assez loin. Priorité est donnée à la chimie verte et à la nutrition ou aux applications dans le domaine de la santé. Au CEA Cadarache, le projet Hélobiotech dirigé par le chercheur Gilles Peltier, en biologie fondamentale et en relation avec le GEPEA (Génie des procédés en environnement et agro-alimentaire) de Nantes Saint-Nazaire, a pour objectif de produire des biocarburants pour l'aviation à partir de micro-algues en sélectionnant les souches les plus adaptées (*Nannocloopsis ocu-*

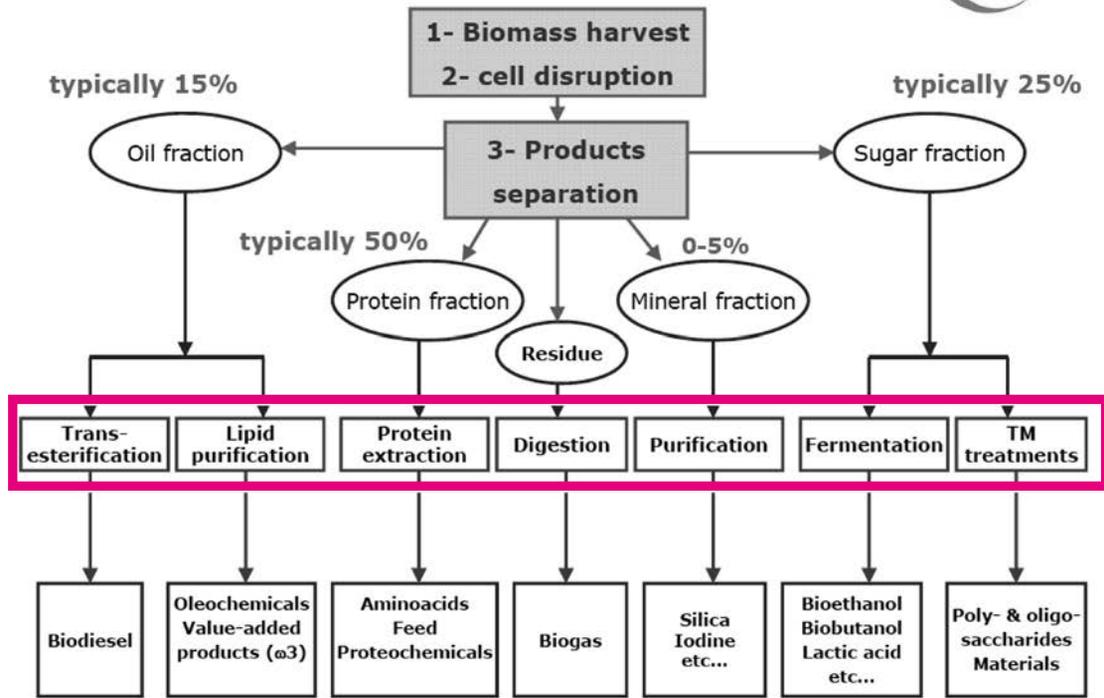
lata dans le cadre du programme CAER). «*Nous travaillons sur une souche, Botryococcus braunii, pour la production de bio-kérosène, dans le cadre du programme CAER, financé par la DGAC (direction générale de l'Aviation civile), en collaboration avec le laboratoire Lemar de Brest et du CEA de Cadarache*», précise Jack Legrand, le directeur du GEPEA. «*Nous avons également établi un partenariat en Chine avec le DICP de Palian*», ajoute-t-il.

Le groupe Algosource (Saint-Nazaire) participe à un projet ANR Diesalg (pour la production de biodiesel) porté par Jérémy Pruvost du GEPEA en collaboration avec le CEA (Cadarache et Grenoble) ainsi qu'à deux programmes européens FP7: BIOFAT et le projet de bio-raffinerie Suprabio démarré en 2010 (19 millions d'euros sur 4 ans) dirigé par l'université d'Oxford avec des industriels tels que les sociétés United Utilities, Boregaard; le groupe participe aussi au projet ANR Algoraffinerie.

Jean Jenck, l'un des quatre associés du groupe Algosource (avec Jack Legrand et Olivier Lépine qui cultive de la spiruline depuis plus de 15 ans au sein d'Alphabiotech), remet en question les conclusions du programme Shamash qui démontrait que les algues contiendraient 75% de lipides. «*En laboratoire*

Le projet EIMA devrait entraîner une division par 10 des coûts de production de la biomasse issue des micro-algues d'ici 5 ans

AlgoSource key activity: *Algoraffinerie*®



AlgoSource Technologies (www.algosource.com)

EABA Conference 29 novembre 2011

page 6

Figure 2. Algo-raffinerie

peut-être, mais quand on passe à des projets de diesel et à l'échelle de démonstrateurs, on s'aperçoit que cette part est de 15% seulement». Et le composant le plus important de ces algues est la partie protéine qui en représente 50%. Pour ce chimiste, les possibilités de production de molécules à haute valeur ajoutée sont multiples. «Les algues sont un super système (sic) qui permet de réduire de l'azote +5 contenu dans le nitrate ou dans les lisiers de porcs en Bretagne, par exemple, en azote (ammoniac-3), qui sont des formes d'aminoacides. Il suffit de transformer les nitrates dilués avec un co-intrant afin de produire des protéines par photosynthèse», explique Jean Jenck. Loin des effets d'annonce excessifs sur l'avenir radieux du pétrole bleu qui peut porter préjudice à cette filière naissante, il

défend à l'instar de l'EABA un plan protéine pour l'alimentation humaine.

Des études sur des substituts pétroliers

Le projet Green Stars porté par GDF Suez autour du projet Salinalgue rassemble des industriels tels qu'Air Liquide, EADS-PSA, IFP EN intéressé par les transferts technologiques. Pourtant, selon certaines sources, le projet semble battre de l'aile. Quelques-uns des industriels qui faisaient partie du consortium initial se sont retirés, dont Total...

Total a signé en 2012 un accord avec Collectis, spécialiste français de l'ingénierie du génome, qui porte sur le développement de substituts pétroliers dérivés de micro-algues. Le programme de recherche dont les coûts seront supportés à part égale par les deux partenaires verra les technologies et produits qui en seront

issus détenus à parts égales par Collectis et Total. La première phase d'1 an se focalise sur la mise au point de méthodes et d'outils d'ingénierie des génomes sur certaines espèces de micro-algues sélectionnées pour leurs spécificités. La seconde phase (de 2 à 3 ans) portera sur l'ingénierie de traits (modifications précises du métabolisme et de l'espèce) pour la production de composés aujourd'hui dérivés du pétrole. «*Nous fabriquons des systèmes d'enzymes (outils de programmation) qui sont des sortes de petits scalpels capables de couper dans un gène pour faire de l'accordage de génomes, des remodifications de séquences. Nous travaillons notamment sur les diatomées, des algues photosynthétiques à longues chaînes carbonées. Nous y insérons, grâce aux méganucléases, de nouvelles voies métaboliques pour introduire des acides gras qui se transforment en kérosènes. Les algues excrètent du kérosène!*», expliquait André Choulika lors d'une conférence sur la biologie de synthèse à Supbiotech, fin 2011. Il a créé la *start-up* en 1999 avec David Sourdivé. La société Collectis est cotée en Bourse sur le marché Alternext de NYSE-Euronext (Paris) depuis 2007. Le chiffre d'affaires 2010, dont 70% est réalisé à l'international, s'élève à 15,8 millions d'euros. Elle emploie environ 140 personnes dans quatre filiales distinctes : Collectis bioresearch, Collectis therapeutics, Collectis plant sciences et Ectycell, avec des centres situés à Paris (France), Saint-Paul, Minnesota (USA) et Cambridge, Massachusetts (USA). La société a obtenu 83 brevets et entrepris une demande pour 260 autres.

«*La troisième vague des micro-algues, qui a commencé dans les années 2000 ne sera pas un échec cette fois!*», déclare le Pr Otto Pulz qui travaille depuis 30 ans au développement de PBR sur les micro-algues chez IGV GmbH. Contrairement aux Américains, il ne croit pas aux *raceways*. Et il a la mémoire longue. Le chercheur exposait le démonstrateur de son tout dernier PBR par brumisation (100 m²), au cours de la neuvième édition en mai 2012 du colloque de Potsdam, au siège de la société IGV GmbH. Son idée : au lieu d'avoir des PBR tubulaires de verre remplis d'eau dans lesquelles les algues sont immergées, les micro-algues sont «brumisées» en continu

sur des réacteurs plats, composés de couches minces superposées fabriquées en polymères, une matière peu coûteuse qui permet de démocratiser leur coût pour une production de masse. Cette technologie devrait être développée dans le sud de l'Espagne. Un démonstrateur de 1000 m² fonctionnant avec un PBR tubulaire de 85000 litres a déjà été implanté sur le site de Jerez en Andalousie avec l'entreprise Aurantia. C'est également le Pr Pulz qui a réalisé la «cathédrale» de Klötze en Allemagne (un gigantesque site de production de Chlorella dans 500 km de tubes de verre, racheté par Roquette).

Un avantage climatique aux États du sud

En Espagne, un plus fort taux d'ensoleillement favorise une meilleure productivité des micro-algues destinées à la production de lipides pour les biocarburants. Le scientifique souhaite aussi tropicaliser ses technologies à la Réunion où l'ensoleillement est de 300 jours par an, grâce à l'entreprise Bioalgostral qui va réaliser un pilote industriel de 1 ha. «*La brumisation permet aux algues de vivre dans l'eau sans être immergées. Ainsi, elles sont mieux exposées aux nutriments et à la photosynthèse, le flux d'eau est important, les problèmes de contamination sont résolus et les rendements confirmés*», explique Laurent Blériot, président de Bioalgostral qui va cultiver différentes souches d'algues avec les deux technologies. «*Les rendements sur le tubulaire sont de 45 g/m²/j alors que les rendements sur l'UTL Horizontal sont de 80 à 100 g/m²/j, ce qui revient à produire 240 t/ha/an. Dans un premier temps, le démonstrateur coûte très cher. Mais si l'on passe à 1 ha, ils vont diminuer*», précise-t-il. «*Avec le soutien d'un investisseur local, la société d'économie mixte NEXA, qui a pris des parts majoritaire dans la société, nous avons conclu un accord de partenariat avec une société française cotée en bourse, Sechilienne Sidec, qui produit 60% de l'énergie thermique à la Réunion et va financer une partie de notre R&D : elle s'engage à racheter notre production de biocarburant à partir d'algues pour ses turbines à combustion ce qui représente une opportunité importante pour Bioalgostral*», poursuit le dirigeant. Des applications sont envisageables ensuite aux

Antilles, dans le cadre du contrat avec la société IGV.

Autre opérateur, Algae Stream a réalisé un démonstrateur de 1 ha en Tunisie à Djerba pour produire de la biomasse micro-algale dans des serres de type culture de tomates nécessitant très peu d'eau. Malgré des rendements satisfaisants, cette société détenue par le fonds d'investissement Solabio a été mise en liquidation le 12 mars dernier sans trouver de repreneur français. « *Avec le climat sud-tunisien, nous produisons 40 à 50 tonnes de spiruline par an avec 300 jours d'ensoleillement* », déclare Dominique Delobel, l'ex-directeur de la société, qui va essayer d'organiser une suite pour cette technologie qui a de l'avenir au sud de la Méditerranée.

Le Pr Arnaud Mueller-Feuga, ex-directeur de recherche au CNRS, a créé la société Microphyt et cultive différentes variétés d'algues pour la cosmétologie et la pharmacie dans des PBR tubulaires près de Montpellier. Très inventif, il a conçu des PBR flottants adaptés aux plans d'eau continentaux permettant de produire en masse des micro-algues sans prendre sur les terres agricoles. Il a mis à l'eau un prototype dans un plan d'eau de l'Hérault en juin 2012. Son objectif ultérieur est de les immerger sur le littoral ou en pleine mer. Ce type de projet de PBR flottants est inspiré d'un projet conçu par un chercheur de la NASA, dans le domaine des nanotechnologies. Dans son laboratoire de Santa Cruz, Jonathan Trent a mis au point des capsules flottantes en matière plastique appelées Omega (Offshore Membrane Enclosures for Growing Algae) pour la culture de micro-algues en mer dans les différentes baies de Californie. Les sorties d'égouts s'y déversant, cela permettrait en utilisant les capsules oméga sur 1% de la superficie de la baie de San Francisco de produire 20% du biodiesel de la ville (2 millions de gallons). Il s'agirait d'un système de traitement des eaux en mer satisfaisant sur le plan du développement durable, les algues se nourrissant des effluents pour croître, et qui intégrerait des capteurs solaires, des éoliennes, voire des élevages d'aquaculture ou de conchyliculture. Les avantages : les vagues agitent naturellement les PBR flottants et la mer les refroidit puisqu'ils

chauffent au soleil. En cas de fuite des capsules, les problèmes de contamination sont évités en sélectionnant des algues douces qui ne survivent pas en pleine mer et inversement. Les plastiques usagés seraient recyclés sous forme des serres pour protéger les cultures maraîchères. Ce sont aussi des chercheurs de la NASA, lorsque les programmes spatiaux américains ont été arrêtés, qui ont créé la société Martek pour des applications dans le domaine de la nutrition. Les stations habitables en orbite du projet Apogeoïos sont équipées des systèmes utilisant de micro-algues pour recycler l'eau dans l'habitacle tout en créant des sources d'alimentation renouvelables.

Toujours en Méditerranée, l'université Ben Gourion du Neguev (Israël) est l'une des plus avancées au monde dans le domaine de la recherche sur les technologies de production des micro-algues. Des kibboutz cultivent déjà des micro-algues sur de grandes surfaces à ciel ouvert. Parmi les démonstrateurs en plein air, la société israélienne Seambiotic possède un *raceway* pilote de 1 ha rattaché à une centrale électrique, et a achevé en 2011 l'installation d'une usine de production de 10 ha en Chine. Transalgae, une société créée en 2008 dont le siège est aux États-Unis, créée et le centre de recherche au Science Park in Rehovot en Israël produit des biocarburants et protéines par les micro-algues et travaille sur le développement d'algues transgéniques.

C) En Chine, projet de capture de CO₂ par les micro-algues

La Chine, tout comme l'Inde, s'est refusée à s'engager dans les accords internationaux (notamment lors de la dernière conférence de Doha) sur le plafonnement des émissions de gaz à effet de serre. Reste que la Chine met les bouchées doubles dans le domaine des énergies renouvelables. L'objectif est de révolutionner le mix énergétique dominé à 80% par le charbon. Le deuxième Plan prévoit de consacrer 3000 milliards de yuans d'ici 2020 (300 milliards d'euros) aux énergies renouvelables. Hormis les énergies principales comme le nucléaire, l'hydraulique ou le charbon, le mix énergétique sera composé

d'énergies renouvelables : éolien, solaire, mais aussi biocarburants.

Les efforts chinois s'inscrivent dans une loi qui prévoit que la part des énergies renouvelables (hors nucléaire) doit passer à 10% de la consommation d'énergie en 2010 et 15% en 2020. Selon un entretien accordé au quotidien britannique *Guardian* par Zhang Xiaoqiang, le vice-président de l'agence de planification chinoise, la Chine atteindrait en réalité, à cette échéance, au moins 18% – voire 20% – de renouvelable dans son mélange énergétique. Hors hydroélectricité, le renouvelable doit passer de 1,5 à 6% du total.

Tout comme les États-Unis, la Chine développe ainsi des programmes d'investissements basés sur la croissance verte dans le domaine de l'urbanisation, de l'efficacité énergétique et de la réduction de l'activité carbone. Lors du voyage de François Hollande en Chine, Delphine Batho, la ministre de l'Environnement français, a signé deux accords de coopération dans le domaine des énergies renouvelables et de la dépollution avec le gouvernement chinois.

Reste que la Chine, l'un des plus grands émetteurs de CO₂ au monde, connaît une telle pollution dans les villes qu'elle passera sans doute directement à des applications les plus avancées en matière de dépollution et de capture du CO₂. Le quatrième World Algae Asia qui s'est tenue à Beijing les 15 et 16 novembre 2011 a donné l'occasion de visiter l'un des programmes les plus avancés actuellement en Chine : le groupe ENN, l'un des plus dynamiques dans le domaine de l'énergie (24000 salariés, 4 milliards de dollars de CA), s'est engagé activement dans le développement de technologies de capture du CO₂. Son objectif est la réduction des émissions de CO₂ des usines des centrales au charbon en Chine qui produisent 70% de l'électricité du pays. Le charbon est gazéifié dans le sous-sol. Le dioxyde de carbone est extrait à l'aide d'énergies éoliennes et solaires, puis nourrit les algues qui peuvent être utilisées pour produire des biocarburants, des engrais et de l'alimentation animale. Le site de Langfang, à 4 heures de Beijing, comprend un laboratoire, l'Algae National Key Bioenergy

Lab, qui mène des recherches sur la sélection des couches de micro-algues, leur culture, leur récolte, l'extraction des lipides, etc. Fruit d'une *joint venture* entre ENN et Duke Energy, ce laboratoire teste les micro-algues en fin de procédé.

EADS Innovation Works, Airbus et ENN ont signé un accord de partenariat avec ENN au salon de l'aviation de Zhuhai en novembre 2012 pour explorer différentes solutions innovantes pour l'aviation. L'accord inclut la qualification des carburants basés sur l'huile d'algues et la promotion de leur usage pour l'aviation en Chine, celle au monde qui se développe le plus rapidement. Des vols d'essai sont prévus pour 2013 avec des algo-carburants produits par ENN, l'une des plus grosses usines au monde avec une capacité de production de 10 tonnes par an. Après 2013, les partenaires passeront à l'échelle supérieure pour produire des quantités suffisantes pour l'aviation. Airbus soutient les tests et la qualification des activités et coordonne la participation de partenaires extérieurs, industriels et compagnies d'aviation. Gageons que les résultats ne se feront pas attendre.

L'Asie est le premier producteur de micro-algues au monde et représente à elle seule environ 50% de la production mondiale. Le gouvernement de Singapour a investi 15 milliards de dollars, celui de Corée 200 millions de dollars 2010 et à Taïwan, l'Industrial Technology Research Institute (ITRI) a reçu une subvention de 7,67 millions de dollars du bureau de l'énergie du ministère des Affaires économiques.

4. Dépollution, un énorme enjeu

La captation du CO₂ et la dépollution représentent d'énormes enjeux. L'intérêt est clair en Australie, en Chine et même au Moyen-Orient, ainsi que nous avons pu le constater lors des derniers sommets World Algae Summit à Queensland en Australie, à Beijing en 2012 et au tout dernier World Algae Mena Summit à Dubaï, du 25-27 février 2013, organisés par le CMT (Singapour et Kuala Lumpur).

La captation du CO₂ devient presque un enjeu plus important en soi que la production de micro-organismes qui peut lui être associée en récupérant les intrants nécessaires à leur culture. Le captage du carbone représente un marché potentiel énorme. *«L'ensemble des quotas de CO₂ alloués aux entreprises françaises entre 2008 et 2012 est de 132 millions de tonnes. Selon le système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE), le prix d'une tonne de carbone excédentaire aujourd'hui est revendable à 13 euros la tonne. Si l'ensemble des industriels français revendaient leurs crédits carbone, le total des ventes représenterait un chiffre d'affaire de 1 716 milliards d'euros»* (projet IEED Green Stars). C'est ainsi que Jacques Degroote a créé deux entreprises : l'une sur les micro-algues, Algonesia Technologies, et l'autre, CO₂ Track (Groupe Heliogreen), sur le stockage et le transport des stocks de CO₂. *«En effet, pourquoi les sites de production devraient-ils forcément se trouver au pied des usines ou des raffineries ? »*, s'interroge-t-il.

A) Micro-algues pour traiter les eaux

Les micro-algues réduisent les sulfates, les nitrates et fixent le phosphore sous forme de nodules qui peuvent être utilisés comme des traitants d'eau. La décontamination des produits pétroliers constitue la majorité du marché de la bioremédiation. La remédiation des sites se fait à partir de cyanobactéries. La dépollution est l'un des aspects où les micro-algues pourraient jouer un rôle. L'azote et le phosphore sont consommés par les micro-algues pour la production d'énergie. Le Groupe Algosource a conçu et mis en œuvre pour le groupe Ciment Calcia, sur le site de Gargenville (près de Mantes-la-Jolie), un démonstrateur récupérant le CO₂ pour produire de la biomasse algale et des molécules d'intérêt. S'il s'avère rentable, il pourrait être généralisé à l'échelle du groupe. Et Jean Jenck expose le calcul suivant : *«Une station de 500 MWb peut produire 2,5 millions de tonnes de CO₂/an à retraiter. Si pour traiter une tonne de CO₂, il faut une demi-tonne de biomasse, pour traiter 2,5 millions de tonnes de CO₂ par an, il faudrait 1,3 million de tonnes*

de biomasse. Compte-tenu de la productivité des micro-algues, il faudrait une surface de 13000 ha, soit 130 km². On obtiendrait du carbone par bio-séquestration à un coût de 250 euros la tonne». Lafarge lui aussi s'est lancé il y a quatre ans dans le même type de projet sans réussir à atteindre le seuil de rentabilité suffisante (Montpellier, fin 2011).

En France, les étangs de Meze dans la région de Montpellier sont déjà utilisés pour le recyclage des eaux usées à l'aide de micro-algues. L'INRA a une unité à Narbonne qui étudie des projets utilisant des micro-algues pour la remédiation ou la dépollution. C'est là que s'est déroulé le projet Symbiose financé par l'ANR (Agence nationale de la recherche) qui s'est achevé en 2012. Avec la société Naskeo Environnement, il a permis de mettre en place l'Algotron au sein duquel est réalisée la méthanisation de la biomasse algale par fermentation pour produire du biogaz, mais pas seulement. Un circuit qui permet dans un second temps de réutiliser les nitrates ou phosphates pour produire des fertilisants.

B) L'Australie très active

L'Australie également se montre particulièrement en pointe sur le sujet. MBD Energy est devenu le premier client de la société californienne Origin Oil qui s'est spécialisée dans la dépollution des déchets et le recyclage des eaux usées, et notamment celles utilisées par les procédés de fracturation hydraulique dans le cadre de l'exploitation des gaz de schiste. Ils se sont associés en 2011 autour d'un projet de culture de micro-algues. MDB va utiliser les micro-algues (mais aussi les macro-algues et les bactéries) pour la recapture de CO₂ et la bioremédiation des émissions industrielles, c'est-à-dire pour la transformer en énergie grâce à la synthèse des algues. Origin Oil lui fournit le procédé permettant de contrôler en continu les opérations de culture et de récolte sur de très grandes surfaces de cultures de micro-algues. Ce nouveau système, Green Sting, utilise le système d'acquisition de données SCADA pour mesurer et contrôler la croissance des algues, la déshydratation, la floculation et jusqu'à la récupération des huiles. Testé sur

un démonstrateur d'1 ha situé sur le site de la centrale au charbon de Tarang à Queensland (1400 MW) en partenariat avec la Queensland University of Technologies, l'exploitation de culture d'algues s'est implantée sur 80 ha. Ce processus sera étendu d'ici 2020 à d'autres sites du groupe, Eraring (2400 MW) dans la Hunter Valley ou Log Yag A, tous deux en Australie. MBD Energy dispose également d'un site de R&D incluant un démonstrateur de 5000 m², en partenariat avec l'université James Cook à Townsville (Australie). La phase commerciale prévoit de faire descendre le bilan carbone de ces centrales de plus de 70000 tonnes de CO₂ par an, ces quantités étant utilisées pour produire environ 10000 tonnes (11 millions de litres) d'huiles d'algues et 25000 tonnes d'algues alimentaires par an. Car MBD produit et commercialise aussi des produits alimentaires et des engrais issus du processus. D'autres projets ont été initiés également, l'un en Thaïlande et l'autre en Afrique.

C) Générer des économies d'énergie dans l'habitat

La société Ennesys, filiale d'Origin Oil, a installé en haut d'une tour de la Défense à la fin 2012 des PRB à partir de micro-algues pour recycler les eaux usées circulant dans les tuyaux de cet édifice (eaux grises, eaux des circuits de chauffage et de climatisation). Facile d'installation sur un immeuble neuf ou restauré, ce système de récupération des eaux grises du bâtiment permet de réaliser des économies sur la consommation d'énergie de 87% et sur celle d'eau de 90%. Ennesys a une quinzaine de projets et une levée de fonds de 5 millions d'euros est prévue.

Et si les PBR se présentaient sous la forme de dalles vertes et bleues, des capteurs solaires biologiques, pour composer des « bio-façades » en mur rideau dans les tours de bureaux ou de logements? C'est le projet innovant Symbio 2 dans lequel s'est engagé le cabinet d'architecture et d'urbaniste X-TU qui a inventé ces « bio-façades » et a réalisé l'étude de deux tours à la Défense et à Paris depuis 2007. L'agence s'est associée au groupe Algosource et au GEPEA de Nantes dans le cadre de la plate-forme Défi-ualg pour poursuivre des

recherches sur ces systèmes de façades introduisant des panneaux à double vitrage ultramincés, renfermant une lame d'eau de quelques centimètres qui permet aux algues de se développer et de croître. C'est une nouvelle génération de bâtiments qui peuvent rendre des services écologiques en tirant pleinement partie des échanges thermiques et chimiques avec le bâtiment hôte, tout en produisant des molécules d'origine marine pour la chimie verte, la santé. Ces façades techniques prometteuses permettent de réduire de 80% les consommations énergétiques nécessaires à la régulation thermique des cultures des micro-algues, de 90% le volume d'eau par rapport aux cultures en bassin et de 50% des consommations de chauffage et rafraîchissement du bâtiment par rapport à un bâtiment standard RT 2012. Symbio 2 a été lauréat du FUI (Fonds unique interministériel) pour réaliser un premier projet pilote de « bio-façade » sur le site de traitement des déchets du groupe SéchÉ Environnement de Nantes Métropole (unité de valorisation des déchets Alcea). Un projet de 4,9 millions d'euros porté et financé en partie par le groupe industriel et subventionné à hauteur de 1,7 million d'euros par le FUI, les régions Île-de-France, Pays de la Loire et la Ville de Paris. En partenariat avec les pôles Valorial et Qalicity, une idée séduisante qui pourrait bien se propager au sein des éco-quartiers. Et l'on voudrait voir des tours vertes sortir des bouches du métro. Ou roses pourquoi pas, tout dépend du type d'algues cultivées dans ces PBR sophistiqués. À Singapour peut-être un jour, là où les terres agricoles viennent à manquer, cultivera-t-on les algues dans les tours pour s'en nourrir puisque 70% des citoyens vivront dans des villes à l'horizon 2050 (à Shanghai, il s'est construit 4000 tours de plus de 100 mètres de haut, soit une multitude de champs à la verticale possibles).

Le marché des algues est en plein développement: 20000 tonnes de matières sèches sont commercialisées chaque année dans le monde. L'inventivité est au rendez-vous. Sans doute les micro-algues seront-elles l'avenir de l'homme comme les archéobactéries ont été à l'origine de la vie. Leur devons-nous un jour notre survie ? ■