

## Le rêve porté par les microalgues

Claude Guadin, Olivier Bernard

► **To cite this version:**

Claude Guadin, Olivier Bernard. Le rêve porté par les microalgues. Claude Guadin. La culture de l'invisible - le rêve porté par les microalgues, Ovadia, pp.109, 2013, 2363920325 9782363920324. hal-00852254

**HAL Id: hal-00852254**

**<https://hal.inria.fr/hal-00852254>**

Submitted on 22 Aug 2013

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

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

Claude Gudin  
& Olivier Bernard

*La culture  
de l'invisible*  
&  
*Le rêve porté  
par les microalgues*



LES EDITIONS **OVADIA**

## **Le rêve porté par les microalgues... regard vers le futur.**

Olivier BERNARD

BIOCORE - INRIA/INRA/CNRS/UPMC

Je me revois au début des années 1990, assistant à ma première conférence internationale sur la biotechnologie des microalgues. Jeune doctorant au Laboratoire d'Océanographie de Villefranche, je découvrais, dans l'immense Corum de Montpellier, l'étendu de ce domaine, que je n'avais abordé que par mes travaux très théoriques sur la croissance des microalgues en condition de carence azotée. J'étais ému de rencontrer des scientifiques célèbres, dont j'avais pu lire les travaux. Claude Gudin, organisateur de la conférence, et animateur de débats enflammés était incontestablement le plus passionné de tous. Sa façon singulière de prononcer les r –bien français- dans un anglais excellent m'avait amusée. Je découvrais avec admiration et fascination l'un des grands pionniers de ce nouveau domaine. Depuis, j'ai compris que, bien au-delà de ses contributions scientifiques et techniques directes, évoquées dans ce livre, et largement reconnues au niveau international (combien de fois m'a-t-on demandé : « Tu es français ? Alors tu connais peut être Claude Gudin ?»), Claude fait partie de ces scientifiques qui ont aussi énormément contribué à la science, de façon indirecte. A travers la passion qu'il a su transmettre, il a suscité chez de nombreux jeunes chercheurs l'envie de mettre nos pas dans les siens, et de partir à la découverte de nouveaux territoires.

Du haut de mes vingt jeunes années d'expérience dans ce domaine, il m'est maintenant bien difficile, à la suite de l'immense Claude de donner mon point de vue sur les perspectives des recherches sur les microalgues et les cyanobactéries. Une chose est sûre, avant tout, c'est que les microalgues font rêver. Elles font d'abord rêver parce que, comme Claude nous le dit si bien, les microalgues, nous offrent, parmi l'immense palette de molécules qu'elles produisent, des composés chimiques essentiels à notre cerveau, ce qui nous permet –entre autre– de rêver (ou de cauchemarder). Les acides gras polyinsaturés à longue chaîne qu'elles produisent, et que nous

ingérons par le biais de maillons de la chaîne alimentaire, sont indispensables au bon fonctionnement de notre cerveau. Sur un autre plan, elles nous font rêver car, souvent, elles semblent incarner une voie vers la résolution de problèmes émergents de l'humanité, et en particulier sa capacité à se nourrir, éliminer ses déchets ou à produire l'énergie qu'elle utilise pour se déplacer... Quelle en est la part de rêve, et quel est le réel potentiel, c'est souvent très difficile de s'en faire une idée précise à travers les annonces fracassantes qui paraissent régulièrement dans la presse, le plus souvent sous l'impulsion de start-ups peu scrupuleuses, et à la recherche de capitaux.

### **Le futur des microalgues peut-il se lire dans le passé ?**

Les promesses des microalgues sont apparues de façon cyclique et périodique, au rythme des coïncidences et des difficultés rencontrées par l'humanité (pénuries pétrolières, famines, prise de conscience des bouleversements climatiques, etc.). Je n'ai connu de ces cycles que la fin du précédent, dont Claude Guéhenneq avait été l'un des initiateurs. Puis, plus d'une décennie plus tard— j'ai vécu l'arrivée du nouveau cycle, sans doute déclenché par la flambée des prix du pétrole, associé à la prise de conscience des effets délétères de l'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique. Ces deux facteurs exogènes peuvent paraître bien loin du monde des microalgues, mais —à une autre échelle— ils y sont fortement liés. La photosynthèse des microalgues contribue à capter près de la moitié du CO<sub>2</sub> émis par l'homme (les forêts en captent des quantités équivalentes). C'est bien parce qu'elles ne sont pas capables d'en capter davantage que le CO<sub>2</sub> s'accumule dans l'atmosphère, conduisant alors aux changements climatiques globaux par effet de serre, mais aussi à l'acidification des océans. Ce deuxième phénomène, entraîné par un excès de CO<sub>2</sub> dans l'eau de mer, ralentit les mécanismes de calcification de nombreux organismes, dont certaines microalgues calcifiantes (coccolithophoridées) (capables de fabriquer des « coccolithes », structures microscopiques en calcite), réduisant encore le flux de CO<sub>2</sub> capté et piégé au fond des océans, et accélérant encore le rythme d'accumulation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Les microalgues ont donc leur part de culpabilité dans les cycles qui relancent les recherches tous les vingt ans. Elles y sont même bien davantage liées, car, une partie du pétrole provient de la dégradation, il y a plusieurs millions d'années de microalgues. Les activités anthropiques qui conduisent à la production de CO<sub>2</sub> reposent donc aussi sur des microalgues qui

ont vécu il y a bien longtemps. Et, sans vergogne, nous renvoyons dans l'atmosphère, en quelques décennies, le CO<sub>2</sub> qui avait servi à les fabriquer au fil de millions d'années.

Les périodes où les algues prennent le devant de la scène (pour ne pas parler de devant de la Seine, lié à l'invasion de la Seine par les algues), ont régulièrement été suivies par d'autres cycles, où ces organismes machiavéliques sont plutôt connus pour leur impact négatif sur certains animaux que nous aimons particulièrement. Certaines espèces toxiques peuvent, en l'espace de quelques jours, empoisonner nos huîtres et nos réveillons, et les rendre impropres à la consommation ou à la fête. C'est le cauchemar des ostréiculteurs, mais ce ne sont pas les seuls. Certaines espèces peuvent produire des neurotoxiques, qui peuvent définitivement empêcher de rêver. Qui n'a pas cauchemardé après avoir vu « les oiseaux » d'Hitchcock ? En adaptant le roman de Daphné du Maurier, Hitchcock s'était pourtant inspiré d'un fait divers survenu en août 1961 près de Santa Cruz, en Californie. Des centaines de puffins fuligineux étaient venus s'écraser sans raison apparente sur les maisons. Cet accident avait été imputé à la présence de brouillard. Heureusement que les oiseaux ne viennent pas s'aplatir sur les maisons chaque fois qu'il y a du brouillard... C'est bien plus tard que des prélèvements de zooplancton, qui avaient été effectués à la même période, ont permis de corréler cet événement à la présence massive de *Pseudo-nitzschia*, une diatomée toxique connue pour sa capacité à synthétiser l'acide domoïque, substance neurotoxique pouvant causer de sérieux dommages cérébraux. De quoi méditer, tant que nous le pouvons encore... Ces propriétés sont inquiétantes, mais elles ne font que refléter l'envergure du potentiel de ce monde, que décrit par Claude Guéhenneuc.

### **Explorer la biodiversité**

Philosopher sur les microalgues, est équivalent à discuter des plantes, sans les distinguer entre elles, en embrassant toute leur diversité. Comment mettre sur le même plan un plan de blé, un saule blanc (source de l'acide acétylsalicylique, l'aspirine), une ciguë ou un hévéa. C'est pourtant ce que nous faisons lorsque verbalement nous agrégeons de façon insensée cette immense biodiversité (plusieurs centaines de milliers d'espèces). Le premier défi auquel nous serons confrontés consistera à explorer cette biodiversité, et à identifier les capacités insoupçonnées de ce monde microscopique qui renferme d'innombrables promesses de molécules nouvelles. C'est

bien entendu une tâche plus délicate que de se promener dans la forêt amazonienne (ce qui n'est déjà pas une mince affaire). Ces organismes ont une taille de quelques millièmes de millimètres et leur présence n'est pas toujours détectable, en tout cas avec des moyens simples. Il est assez surprenant de réaliser que l'une des espèces les plus abondantes sur la planète, mais aussi une des plus petites, les cyanobactéries du genre *Prochlorococcus* n'ont été découvertes qu'en début des années 1990. Explorer cette immense biodiversité demandera certainement encore des générations de chercheurs, qui auront à sillonner les mers du globe, mais quelles promesses de nouvelles molécules à la clé !

### **Voir dans l'invisible**

Pour sonder la biodiversité de ces organismes microniques, nous devons progresser dans nos moyens d'investigation pour les isoler, les reconnaître, et en identifier les potentiels. Si un jour des hominidés ont réalisé qu'un pêcher pouvait présenter un intérêt pour l'homme, c'est parce qu'ils l'ont vu, à certaines saisons, et à condition qu'il ait été pollinisé, porter ses fruits. Comment être sûr qu'une espèce de microalgue qui ne semble pas posséder de caractéristique attrayante, n'est pas capable, dans certaines conditions, et en présence d'autres organismes, de produire l'ambrosie recherchée. Il faudra développer une palette de technologies adaptées au monde microscopique pour patiemment observer et comprendre ces organismes. Les techniques moléculaires, qui sont capables de lire dans le code génétique, ont permis de faire un immense bond en avant, en allant directement voir dans la machinerie cellulaire les programmes existants. Il est maintenant possible de séquencer le transcriptome complet à partir de l'ARN présent, indice de la synthèse de protéines. D'autres techniques permettent maintenant de séquencer un génome entier en quelques mois. Chaque semaine, le génome d'une nouvelle espèce est publiée (souvent d'ailleurs sous la forme d'un infâme et approximatif brouillon... l'objectif est d'être le premier pour marquer l'histoire, pas de produire une connaissance sûre). Le code génétique permet de prédire les molécules qui peuvent être produites, et ainsi de révéler une partie des potentiels cachés. Mais comment savoir si ces gènes s'expriment, ou s'ils sont des résidus évolutifs non utilisés, et comprendre dans quelles conditions la fonction est déclenchée pour des organismes dont on ne connaît que très peu de choses. Explorer cette forêt microscopique

foisonnante, cette énorme biodiversité nous révélera des surprises dont nous n'avons pas fini de nous réjouir.

## **Domestiquer la nature**

Identifier et cueillir les fruits dans ce paradis microscopique ne suffira pas. Nos ancêtres ne se sont pas contentés de recueillir et de planter les graines des plantes qu'ils utilisaient. Ils ont, au fil des siècles, sélectionné et hybridé les individus les plus productifs, les plus robustes, ceux à la saveur incomparable. Ainsi, en quelques millénaires, le téosinte –ancêtre sauvage du maïs– a évolué, les agriculteurs ayant patiemment gardé les meilleures graines, hybridés les plantes les plus prometteuses. Progressivement cette plante sauvage est devenue le maïs que nous connaissons. Cette évolution peut être plus rapide pour des plantes microscopiques qui peuvent se diviser plus d'une fois par jour. Néanmoins, pour être utilisées dans l'industrie dans les années à venir, il faudra en accélérer le processus. Cultiverait-on aujourd'hui des fraises des bois, alors qu'une fraise « domestiquée » a un poids largement supérieur, qu'elle est plus facile à ramasser et qu'elle se conserve mieux ? Mais comment refaire le chemin en quelques années, ou quelques décennies (qu'est-ce qu'une décennie à l'échelle de nos descendants ?) ? Deux voies sont explorées. L'une appelée « évolution dirigée », très prometteuse, consiste à placer des populations dans des conditions environnementales qui vont favoriser les individus les plus prometteurs. Par exemple, les individus qui sont capables de faire des réserves nutritives résisteront mieux à des carences nutritives, et se remettront à pousser plus rapidement. Comme ils se divisent plus vite, au fil des générations, ils prédomineront progressivement. En cultivant ces organismes en milieu ouvert, c'est-à-dire dans un dispositif que Jacques Monod avait nommé chémostat, dans lequel on prélève continuellement une partie de la population, on observe alors, au cours des semaines, une prédominance progressive de la population exprimant le phénotype d'intérêt. Ces techniques découlent directement des théories darwiniennes. On peut aussi imaginer, comme dans l'agriculture, croiser et hybrider différentes souches. Cela nécessite de progresser dans notre connaissance, trop maigre pour la plupart des espèces, des modes de reproduction sexuée des microalgues. L'alternative à ces approches, plus directe, consiste, comme pour d'autres organismes à insérer dans des organismes « sauvages » des gènes qui utiliseront la machinerie métabolique de la cellule pour produire les molécules choisies. De tels

Organismes Génétiquement Modifiés (OGM) sont largement utilisés par l'homme, notamment dans l'industrie pharmaceutiques, et nous permettent de produire un éventail de molécules actives que l'on retrouve avec soulagement dans nos médicaments. Ils sont également utilisés –dans certains pays– à grande échelle, pour limiter l'invasion des insectes échappés de l'écosystème naturel environnant la culture. Les stratégies classiques consistent alors à insérer des gènes qui produisent des molécules toxiques pour les insectes qui auraient l'idée de venir croquer les plantes. Une autre possibilité consiste à utiliser un pesticide en grande quantité sur les cultures, et à inclure dans les plantes les gènes de résistance à ce pesticide. Tant que les prédateurs et les compétiteurs ne se sont pas adaptés à ces molécules toxiques, ces stratégies peuvent être très efficaces. Sauf qu'en les consommant, nous ingérons des quantités importantes de pesticides dont les conséquences sont mal connues, sans parler de ces pesticides qui se répandent dans l'environnement.

### **Composer avec l'insoutenable légèreté de la biodiversité**

Qu'en sera-t-il pour les microalgues ? Comment lutter contre les conséquences de la biodiversité, encore plus foisonnante au niveau microbien, et qui s'invite rapidement dans les cultures ? Pour les cultiver, nous recréons des conditions idéales pour la croissance de ces organismes (éléments nutritifs, lumière, température). Alors, pourquoi imaginer que le premier organisme venu, accroché à un grain de sable transporté par les vents, n'en profiterait pas ? La question des « contaminations biologiques » (c'est malheureusement comme cela qu'on en parle) est encore plus poignante pour des cultures de microorganismes pour lesquels il n'est pas question d'aller arracher des mauvaises herbes, ou même, simplement, de constater qu'il faut agir car une autre plante se développe dangereusement : on ne les voit pas ! La réponse à cette question, pour les microalgues a largement été traitée, de façon dogmatique, sur les rails de l'agriculture productiviste. Vouloir à tout prix isoler l'organisme, et le faire pousser dans des conditions hostiles pour tout autre organisme. Chez les algues, cela consiste à utiliser des systèmes de culture axéniques (en évitant la présence d'autres organismes), notamment en enfermant les organismes dans des dispositifs clos (photobioréacteurs), pour lesquels les échanges avec l'atmosphère –et ses risques– sont limités. En maintenant la biodiversité à distance, on contrôle



certes mieux le système. Le coût important qui est inéluctablement associé n'est pas un problème lorsque des molécules à forte valeur ajoutée sont visées. Mais cela coûte très cher si on souhaite s'orienter vers des marchés de masse, tels que l'énergie. Cette fragile barrière ne constitue pas seulement une dépense importante, c'est aussi un rempart contre le bon côté de la biodiversité. Les organismes dans la nature ont rarement évolué seuls, et des associations efficaces ont réussi à perdurer malgré les aléas climatiques et autres attaques de la biodiversité. Les microalgues, elles aussi, se sont associées à d'autres espèces de microalgues, ou à des bactéries, champignons microscopiques, etc. C'est même sans doute comme cela, qu'au cours de leur évolution, elles sont arrivées sur la terre ferme. Ainsi, une microalgue rejette une partie des sucres qu'elle a pu produire au cours de la photosynthèse, permettant autour d'elle la croissance de bactéries qui vont fixer l'azote de l'air, produire des vitamines (qui ne peuvent pas être produites par les eucaryotes), ou d'autres probiotiques favorables à la croissance. Elles pourront même produire des molécules allélopathiques qui inhiberont d'éventuels compétiteurs. Cet assemblage d'espèce peut être très efficace, et il a pu être montré que la productivité de microalgues quand elles sont cultivées en présence d'autres microorganismes amis pouvait être significativement accrue. En termes de stabilité, et de résilience, il est connu qu'un écosystème comprenant plus d'acteurs résistera mieux aux aléas extérieurs. Mais les connaissances dans ces domaines de l'écologie restent maigres et il faudra déployer d'importants efforts de recherche pour mieux comprendre et reconstruire des écosystèmes complets, à la fois productifs et limitant par eux même les invasions de toute sorte. Reconstruire des associations efficaces d'acteurs microscopiques conduira à des progrès énormes. Mais ne nous y trompons pas, même dans les cultures dites axéniques, les microalgues vivent avec certaines espèces bactériennes, souvent celles qui sont assez résistantes pour ne pas succomber aux procédés radicaux et énergivores de décontamination biologique. Ces approches sont plus simples lorsqu'on cultive les algues dans des conditions auxquelles les habitants de l'écosystème local ne sont pas habitués. Ainsi, des milieux « hyper-alcalins », « hyper-salins », etc. sont des remparts naturels à la biodiversité, à condition qu'il n'existe pas un écosystème de ce type dans les environs

### **Comprendre le fonctionnement de ces organismes calqués sur le cycle solaire**

Par rapport à l'immense majorité des microorganismes (bactéries, levures, champignons filamenteux, ...) que nous exploitons depuis des milliers d'années (pour produire fromage, bière, vin, pour traiter nos déchets, ...), les microalgues ont une particularité directement liée à leur capacité photosynthétique. Elles synchronisent leur division cellulaire sur le cycle solaire, et séquencent méthodiquement la suite des opérations qu'elles doivent mettre en œuvre pour acquérir éléments (C, N, P, ...), micronutriments et énergie, répliquer leur ADN puis se diviser. De nombreuses espèces se divisent en fin de journée, après qu'elles ont effectué des réserves de carbone. L'exécution de leur cycle cellulaire (Phases G1, S (synthèse), G2 (interphase) et M (mitose)) de façon synchrone n'est pas sans conséquence. Par exemple, il a été montré que la diatomée *Thalassiosira weissflogii* ne pouvait pas absorber d'azote pendant qu'elle est en phase de mitose. Si elles n'ont pas collecté tous les éléments nécessaires à leur croissance, elles peuvent rester bloquées dans une phase du cycle cellulaire. Si elles n'ont pas reçu assez de lumière elles resteront bloquées en fin de phase G2, ou en fin de phase G1 si elles n'ont pas absorbé assez d'azote. Des expériences menées avec la prymnesiophycée *Isochrysis affinis galbana*, ont permis de montrer que les stocks de triglycérides accumulés au cours de la journée étaient du même ordre de grandeur que ceux induits par une carence minérale. Cela pourrait signifier que carencer les cellules, ce qui a pour conséquence de les stresser et d'induire une chute importante du taux de croissance, donc de la productivité, pourrait être moins efficace que la récolte de cellules non carencées en fin de la journée.

Les microalgues ont le plus souvent été étudiées au laboratoire, en condition d'équilibre. Dans ces états de stabilité artificielle les propriétés liées à la conjonction de leur horloge interne et du cycle solaire n'apparaissent pas. Des travaux devront être menés pour mieux comprendre et domestiquer les conséquences de cette synchronisation. Cela implique notamment de développer des dispositifs pour suivre à haute fréquence l'évolution de populations de cellules. En effet, un prélèvement chaque jour, à la même heure, de cellules suivant un cycle périodique parfait pourrait laisser supposer un état parfaitement stable.

**Evaluer et réduire l'impact de la culture en masse de microalgues**

Lutter habilement contre les effets de l'écosystème avoisinant sera, comme pour l'agriculture classique, un des enjeux du domaine des microalgues. Mais le problème doit être considéré dans les deux sens. Pour peu que l'on envisage de cultiver ces microorganismes à grande échelle pour tirer profit de certaines de leurs capacités (épuration des eaux usées, des effluents gazeux, biocarburants, molécules sources pour l'industrie chimique), il faut aussi s'interroger, en amont, sur les impacts de ces cultures sur l'écosystème naturel. Evaluer les conséquences des inévitables fuites vers l'environnement. Comme pour l'agriculture classique il faut éliminer les risques d'invasion de l'écosystème avoisinant par les espèces susceptibles de bouleverser les équilibres locaux. Mais, cultiver des centaines d'hectares de microalgues peut aussi avoir des conséquences sur l'ensemble du réseau trophique. Remplacer de l'herbe et des fourrés par des étendues d'eau n'est pas anodin. Sous Louis XVI, des grandes campagnes d'éradication du paludisme ont été lancées en France, passant notamment par l'assèchement de nombreuses régions. Des arbres à croissance rapide, et capables de se développer en zones très humides ont été importés, par exemple des eucalyptus (espèces invasive importée d'Australie). Tous ces aspects devront être soigneusement étudiés avant d'envisager des implantations à grande échelle. Cela devra principalement être porté par des organismes de recherche publique, dont c'est la mission. L'impact des microalgues doit être étudié au-delà de son impact direct sur les écosystèmes. Notamment dans la perspective de biocarburants utilisant les réserves de lipides ou de sucres accumulées par les algues. Il faut vérifier que le processus de production, dans sa globalité, n'est pas plus lourd de conséquence que ce qui est actuellement utilisé : le pétrole fossile que l'on extrait des entrailles de la terre pour ensuite en rejeter le carbone sous forme de CO<sub>2</sub> du bout des cheminées des raffineries ou du pot d'échappement des voitures, ou les agrocarburants de première génération, qui ont contribué, par l'entremise de spéculateurs boursiers, à faire flamber les cours des denrées alimentaires. Il faut donc considérer l'ensemble des impacts potentiels, ce qui est particulièrement difficile puisque la plupart des effets sont inconnus et doivent être imaginés et anticipés. C'est l'objectif de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), qui consiste d'abord à recenser l'ensemble des rejets directs et indirects vers l'environnement. L'énergie qui est nécessaire pour l'agitation des cultures ou pour la récolte doit être prise en compte. Mais aussi l'énergie qui a été mobilisée pour construire le dispositif de culture, ainsi que la part d'énergie et les matériaux qui ont permis de fabriquer les roues du camion qui ont livré les tuyaux alimentant les systèmes de culture, etc. On établit ainsi un bilan exhaustif des flux de matière et d'énergie,

directs et indirects, vers l'environnement. Ces bilans se traduisent alors par divers type d'impacts, production de CO<sub>2</sub>, de déchets radioactifs (les deux sont fortement associés à l'utilisation d'énergie électrique), de composés susceptibles d'augmenter l'eutrophisation (effets délétères, sur un écosystème, d'un excès de substances nutritives) des lacs et des rivières, etc. Les premières études ACV qui ont été réalisées pour évaluer le bienfondé de la culture de microalgues pour produire des biocarburants sont encore très spéculatives. Mais elles peuvent donner des indications, notamment en se comparant aux techniques habituelles de l'agriculture classique, où on sème une graine et on récolte quelques mois plus tard sans avoir apporté d'énergie (autre que la part d'énergie très importante cachée derrière les engrais azotés obtenus par le procédé chimique Haber-Bosch à partir de l'azote de l'air). Elles montrent que les procédés actuels pour l'exploitation des microalgues sont fortement consommateurs d'énergie (agitation, récolte, extraction et transformation des huiles). Cela induit indirectement des émissions de CO<sub>2</sub> encore trop élevées (du même ordre que pour les agrocarburants). Des progrès importants devront être réalisés pour réduire la consommation énergétique, et au besoin utiliser un appoint d'énergie renouvelable pour cultiver, récolter et transformer les algues. C'est là un verrou important pour arriver à produire un biocarburant, à un coût raisonnable, et avec un impact environnemental réduit.

### **Prédire le développement d'une espèce de microalgues en culture industrielle**

Ces études sont nécessaires, mais délicates. Notamment, car elles requièrent des extrapolations hasardeuses pour évaluer le comportement des cultures de microalgues, sur la base de la connaissance disponible, le plus souvent à partir de résultats obtenus au laboratoire ou à petite échelle. Extrapoler et évaluer quelles productivités pourront être obtenues dans certaines conditions climatiques, avec une espèce identifiée, et pour des conditions de croissances bien définies est le Graal que les modélisateurs numériques poursuivent. Cette extrapolation doit passer par la prise en compte d'une conjonction de mécanismes qui chacun affecte la productivité globale. Les études de la physiologie des microalgues en laboratoire se focalisent généralement sur le taux de croissance obtenu lorsque la lumière et les sels nutritifs sont distribués de façon homogène dans le milieu de culture. Mais ces études peuvent également proposer des

représentations du comportement d'une cellule lorsque, comme dans un dispositif de culture industrielle à très forte densité, elle est soumise à des fluctuations rapides de lumière. C'est un peu paradoxal, mais, dans un procédé de culture, une cellule ne perçoit certainement pas l'homogénéité de son milieu de culture. Au contraire, pour elle, qui voyage entre des zones sombres (au fond ou au centre) et des zones éclairées (en surface ou en périphérie), la vie est une succession rapide d'intensités lumineuses très différentes. Les microalgues ont l'impression que le monde s'apparente davantage à une boîte de nuit qu'à une paisible masse d'eau. Des modèles sont capables de décrire le comportement de microalgues dans cet environnement sans doute stressant. Mais pour cela il faut déterminer quelle est la lumière à chaque point du système de culture. Des modèles numériques de nature physique –donc mieux maîtrisées– sont capables de prédire quelles sont les trajectoires des cellules. D'autres modèles peuvent calculer la lumière en tout point de ce milieu très turbide où les photons ne cessent de rebondir sur ces petites particules (phénomène appelé « diffusion multiple ») avant de finir absorbés par l'un des pigments. En rassemblant toutes les pièces du puzzle, on commence maintenant à reconstruire numériquement le lien entre des mesures de laboratoire et des mesures de productivité sur un système de culture en extérieur. En rajoutant à cela l'influence de la température, qui peut fluctuer fortement entre le jour et la nuit, et d'une saison à l'autre, les modélisateurs conçoivent des outils de simulations qui guideront le développement des systèmes de production du futur en les rationalisant. Les premiers simulateurs dont nous disposons, et qui sont encore largement perfectibles, démontrent que chacun des phénomènes mentionnés contribue à décroître la productivité globale du système. Les rendements théoriques de conversion de l'énergie solaire s'érodent alors de 12.7% (rendement de conversion maximal de photons issus du spectre solaire) à des taux de l'ordre de 3%. Au final, les productivités effectives sont plutôt de l'ordre d'une cinquantaine de tonnes de biomasse par hectare et par an (ce chiffre est bien entendu très variable), en tout cas sur la base des trois mois de l'année les plus productifs. Il s'agit là des productivités maximales qui seraient obtenues si aucun prédateur, compétiteur ou pathogène n'avait le mauvais goût de s'inviter à la fête. Il faut donc garder à l'esprit que le lien, qui relie l'éprouvette de laboratoire et le système de culture, est loin d'être évident, mais que faire ce chemin, et disposer d'outils de simulation précis permettra de gagner énormément de temps, notamment en pré-optimisant les dispositifs de culture en simulation ou une saison entière sera simulée en l'espace de quelques heures.

Mettre en équation le développement de microalgues n'a rien d'extraordinaire. Je dois souvent me justifier sur cette discipline que certains trouvent saugrenue, exotique, ou relever davantage du domaine des mathématiques que de celui de la biologie. Mais la mathématisation du réel est une étape nécessaire à une compréhension globale. En tout cas, c'est le chemin qui a été parcouru depuis des siècles dans les sciences physiques, ou il serait surprenant, voire suspect, qu'un physicien ne quantifie pas ses résultats par le biais d'équations. De même, que penser d'un ingénieur qui ne simulerait pas son procédé industriel pour en optimiser le dimensionnement. Le modèle et ses équations permettent alors d'élaborer des théories explicatives, et de mieux comprendre, dimensionner, maîtriser et optimiser ces systèmes physiques. Modéliser le vivant c'est faire le même chemin, c'est avoir un point de vue de physicien sur des particules plus complexes, puisqu'elles sont elles-mêmes des fantastiques usines microscopiques. Représenter et théoriser le vivant est une des grandes gageures du 21<sup>ème</sup> siècle, et les microalgues numériques nous aideront à mieux comprendre et interpréter ce qui résulte de l'intrication complexe de mécanismes nonlinéaires et dynamiques.

### **Financer les graines qui porteront leur fruit à moyen et long terme**

Quelle place occuperont les microalgues dans la vie de nos enfants et de nos petits enfants ? Lorsqu'on se penche sur une boule de cristal, c'est un symbole « \$ » qui apparaît en premier. Sans doute parce qu'il y a un lien entre ce symbole et les colonnes d'Hercule (représentées par les deux barres verticales), matérialisant les portes de l'océan Atlantique, vues depuis le détroit de Gibraltar. En somme, une invitation à la découverte de la biodiversité phytoplanctonique au sein des océans. Mais ce voyage ne se fera que si les financements le permettent, comme l'ont bien compris les américains qui ont investi plusieurs milliards de dollars dans les recherches sur les microalgues au cours de ces dernières années. Le rythme des découvertes dans les années à venir sera dicté par les fonds investis dans la recherche. Il est clair que ces investissements colossaux, à la fois publics et privés, sont avant tout motivés par le « pétrole vert ». En Europe, les promesses énergétiques des microalgues ont servi de locomotive à la ribambelle de valorisations de cette nouvelle biomasse. Le train a ralenti lorsque les investisseurs ont pris conscience des échelles de temps nécessaires pour que ces technologies prometteuses puissent aboutir. Alors que nous devrions nous soucier des implications de nos actions à l'échelle du siècle, il n'y a plus beaucoup de volontaires pour investir dans des projets qui pourraient voir le jour dans une dizaine d'années.

Du coup, de nombreuses sociétés très en vue, et qui promettaient pour demain des voitures à l'huile d'algues, se sont rabattues sur des marchés plus accessibles à court terme, et en tout cas plus juteux dans des délais brefs. Il est pourtant vital qu'un effort de recherche puisse être maintenu dans la durée. De toute façon, les investissements porteront aussi leurs fruits dans toutes les applications que nous n'avons pas encore imaginées, et qui sont cachées dans le grenier des océans. Mais tout pourrait basculer rapidement, si les débouchés vers des carburants renouvelables étaient abandonnés... Par exemple, si on découvrait qu'il y a des régions du monde où il suffit de percer la roche pour récupérer un gaz très énergétique, et que ce gaz permettait à moindre frais de faire rouler des voitures. Et si, tout compte fait, les implications environnementales ne s'avéraient plus aussi primordiales, dans un monde qui n'a pas réussi à proroger les accords de Kyoto, et les efforts qu'ils impliquaient. Alors oui, nous aurions du souci à nous faire, pour l'avenir à moyen terme de la planète. De quoi être vert.

### **Focaliser et synchroniser les efforts de recherche**

De manière générale, la multidisciplinarité permettra d'aller plus loin pour comprendre et maîtriser ces organismes qui ne sont pas à notre échelle. Les compétences des uns et des autres doivent s'associer pour relever les défis qui nous permettront d'exploiter ce matériau « nouveau » (même si c'est sans doute l'une des plus vieilles ressources biologiques de notre planète).

Il est nécessaire, pour progresser dans ces nouveaux domaines, d'associer les compétences et les outils d'équipes de recherche complémentaires, mais chacune hyper spécialisée. Mais collaborer, échanger, n'est pas évident dans le monde ultra compétitif de la recherche, où nos travaux et nos découvertes ne semblent avoir un intérêt que si nous sommes les premiers. Qui se souvient de la deuxième cordée à avoir gravi l'Everest ? Dans ce contexte, il n'est pas simple de s'associer, d'unir nos forces. Sans cela, nous ne pourrions pas faire face aux défis que nous devons relever. Tant que les applications des recherches paraissent éloignées et qu'il n'y a pas de commercialisation proches, les chercheurs échangent et collaborent volontiers. Par contre, si des enjeux applicatifs apparaissent, les équipes de recherche se recroquevillent sur elles même, et la diffusion de la connaissance ralentit brutalement. J'ai vécu ce phénomène, au milieu des années

2000, lors de la ré-émergence de la thématique des microalgues. Devant l'illusion de débouchés faciles, à court terme, vers la production de biocarburant, des investisseurs ont soudainement injecté d'énormes capitaux et de nombreuses start-ups sont apparues. Les chercheurs, qui pour beaucoup s'intéressaient à des sujets plus fondamentaux et moins facilement valorisables se sont vus soudain très sollicités. Des promesses de carrière, ou d'enrichissement à court terme, ont souvent eu raison de la collaboration et des échanges. Les chercheurs sont des abeilles qui œuvrent dans l'ombre, avec patience et minutie. Ce travail lent et méticuleux est nécessaire pour progresser au fil des décennies sur les chemins de la connaissance et des certitudes. J'ai vécu la parfaite désorganisation de la ruche, lorsqu'en 2007, le baril de pétrole a dépassé la barre des 150 dollars, et que tous les regards se sont braqués vers les microalgues, leur prêtant les vertus les plus déraisonnables. Les collaborations internationales se sont mises en veille, il devenait soudain difficile d'échanger avec nos collègues américains, israéliens, allemands, etc. Combien de laboratoires ont volé en éclat sous l'effet de cette pression ? Au lieu de s'associer et d'unir leurs forces, les abeilles se sont mises en concurrence. Devant la complexité et l'étendu du défi il faudra être patient, pour arriver à la production d'énergie par des microalgues. Il faudra soigneusement et sereinement reconstruire la logique collaborative qui est la seule susceptible de nous conduire à ce succès, une des nombreuses pistes dont l'humanité a besoin. En France ce mouvement a été initié, notamment avec un institut (Green Stars) associant recherche académique et industrielle, et qui a pour vocation de synchroniser et de rationaliser les recherches sur les microalgues. Cet élan doit être entretenu, et étendu au niveau international. C'est aussi de la responsabilité des chercheurs de contribuer à cet effort de structuration. C'est une condition nécessaire pour que les algues puissent prendre la part qui leur revient, et pour que les rêves qu'elles portent en matière d'énergie se concrétisent un jour.