

La production de micro-algues sous serre photovoltaïque : évolution ou révolution ?

Olivier Bernard

De nombreux verrous limitent la productivité de micro-algues dans les systèmes de culture traditionnels de type raceway ou photo-bioréacteur : l'excès d'énergie solaire ou l'échauffement des cultures pendant les périodes de forte insolation. Le projet Purple Sun propose de développer des serres photovoltaïques spécifiques qui permettraient de produire de l'électricité localement, sans modifier la productivité des micro-algues et en réduisant à la fois les coûts de production et les impacts environnementaux des procédés de production de micro-algues à vocation énergétique.

Le début de ce millénaire a été marqué par deux événements qui ont définitivement contribué à lancer, ou plutôt relancer, les recherches sur les biocarburants. D'une part, la flambée des cours du baril, annoncée alors comme les prémices de l'épuisement de réserves de pétrole et, d'autre part, la prise de conscience des dérèglements climatiques principalement induits par l'accumulation de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère. La société très énergivore dans laquelle nous vivons a été profondément secouée par ces deux chocs concomitants, qui ont mis en lumière le constat alarmant qu'un des piliers de son développement n'était pas durable. Parmi les nombreuses voies explorées par les chercheurs pour imaginer un nouveau modèle énergétique capable de sortir nos sociétés de cette ornière, les biocarburants ont fait l'objet de toutes les attentions.

L'idée originale consiste à utiliser le potentiel naturel des plantes à capter l'énergie des photons solaires lors de la photosynthèse et à la stocker sous forme d'énergie de liaison entre atomes. Par exemple, sous nos latitudes, le colza produit de l'ordre de 1,3 tonne d'huile par hectare et par an. La betterave, après

fermentation des sucres qu'elle contient, permet également de produire 6,5 tonnes d'éthanol par hectare et par an. Dans un cas comme dans l'autre, ces produits peuvent être transformés chimiquement et devenir des additifs aux carburants fossiles, dans des proportions qui ne devraient cesser d'augmenter.

Les limites des biocarburants de la première génération

Les limites de ces biocarburants, dits de première génération, ont cependant été rapidement pointées du doigt. D'une part, leur production est en concurrence directe avec celle des cultures alimentaires et a, de ce fait, contribué à faire flamber les cours de denrées alimentaires. D'autre part, les productivités atteintes restent limitées : même en couvrant le territoire français de ce type de cultures, la production ne serait pas suffisante pour remplacer le pétrole que nous consommons. Enfin, l'impact environnemental de ces biocarburants a été fortement critiqué, notamment à cause des recours aux pesticides et engrais qui polluent les nappes phréatiques et de la réémission de molécules (parmi lesquelles le protoxyde d'azote) à fort potentiel de réchauffement

climatique. Même si des études d'impact détaillées, à travers des bilans sur l'ensemble de la chaîne, « du puits à la roue », ont montré que la plupart des biocarburants restaient moins polluants que les carburants fossiles actuellement utilisés, leur supériorité environnementale reste trop limitée. C'est dans ce contexte que des recherches sur la production de biocarburants à partir de micro-algues, menées aux États-Unis à la suite du choc pétrolier de 1973 par le *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) et abandonnées en 1996, ont progressivement été relancées aux quatre coins de la planète dès le milieu des années 2000 [Wijffels et Barbosa, 2010].

Les organismes phytoplanctoniques, dont la taille varie du micron à la centaine de microns, utilisent la lumière comme source d'énergie pour fixer le dioxyde de carbone. Ils se trouvent en abondance dans les milieux aquatiques (océans, rivières, lacs, etc.). On estime entre 200 000 et plusieurs millions le nombre d'espèces existantes, à comparer aux 250 000 espèces de plantes supérieures recensées.

L'énorme potentiel des organismes phytoplanctoniques

Une telle diversité non exploitée constitue un réel potentiel pour la recherche et l'industrie [Bernard et Cadoret, 2009]. Les algo-carburants ont d'abord semblé pouvoir répondre point par point aux critiques des agro-carburants avec, de surcroît, des productivités bien supérieures [Wijffels et Barbosa, 2010]. De nombreuses sociétés ont été créées pour développer ces nouvelles technologies et des investissements faramineux ont été engagés à grand bruit médiatique : ExxonMobil a annoncé 600 millions de dollars d'investissements sur ce thème, Sapphire Energy à San Diego a levé 100 millions de dollars, Solazyme à San Francisco a récolté 76 millions de dollars... Mais, dix ans après, il faut reconnaître que les rendements des procédés pilotes restent très en retrait de ceux obtenus en laboratoire. Le monde industriel prend conscience de la longueur et de la difficulté du chemin restant à parcourir pour produire des biocarburants à moindre impact environnemental et à un coût compétitif. En parallèle, ces recherches ont néanmoins

mis en lumière le potentiel des micro-algues pour répondre, à court terme, à un certain nombre de marchés dans les industries pharmaceutiques, cosmétiques, alimentaires (antioxydants, pigments, vitamines, protéines, ...) [Gudin et Bernard, 2013]. Ces applications en plein développement sont également à la recherche de procédés de culture plus productifs et moins énergivores.

Cet article a pour objectif de passer en revue les principaux facteurs expliquant la productivité relativement modeste des procédés actuels de culture de micro-algues lorsqu'ils subissent, en extérieur le flux solaire au fil des saisons. Nous présentons finalement une approche innovante pour améliorer le bilan énergétique et la productivité de ces systèmes.

1. La production de lipides par les micro-algues

Différentes voies sont actuellement explorées pour valoriser l'énergie contenue dans les micro-algues. Les voies indirectes passent par des étapes supplémentaires : par exemple, la fermentation alcoolique des sucres ou la méthanisation de la biomasse.

La voie directe, la plus convoitée, initiée en France par le projet Shamash financé par l'ANR, reste la production de lipides énergétiques. L'approche consiste à utiliser des espèces produisant des triglycérides qui peuvent être transformés en biodiesel par trans-estérification. Comme tous les organismes vivants, les micro-algues contiennent cette fraction de lipide. En condition de croissance optimale, cette fraction reste faible, les lipides étant principalement constitués de phospholipides et de glycolipides difficilement transformables en biocarburant. Chez certaines espèces, il est cependant possible d'augmenter significativement la fraction des triglycérides par le biais d'un stress nutritif. En effet, une carence en azote ou en phosphore stimule la production de triglycérides, qui peuvent alors dépasser 50 % de la masse sèche [Wijffels et Barbosa, 2010]. Ces conditions de carence ne peuvent toutefois pas être maintenues trop longtemps

puisqu'elles conduisent naturellement à un arrêt de la croissance puis, après un laps de temps, à la re-consommation des réserves lipidiques préalablement accumulées. L'optimisation de la productivité en lipide doit donc résulter d'un compromis entre croissance (donc sans carence) et production d'huile (avec un stress ralentissant la croissance). Pour la majorité des espèces, l'application d'un tel stress nutritif affecte la croissance à un niveau tel que la productivité chute immédiatement. Inversement, en l'absence de stress, les lipides cellulaires sont principalement représentés par des phospholipides et des glycolipides (constituant des membranes cellulaires), lesquels sont difficiles à utiliser pour produire un biodiesel car les normes imposent des teneurs en phosphore quasi-nulles.

Par ailleurs, il existe une très forte interaction entre le métabolisme des lipides et le cycle cellulaire, qui n'est actuellement connue que de façon très fragmentaire. Les cellules présentent des cinétiques nyctémérales très marquées d'accumulation et de réutilisation des lipides [Lacour *et al.*, 2013]. De nombreux travaux, notamment aux États-Unis, ont pour but de fabriquer des organismes dont le métabolisme a été modifié de façon à augmenter la productivité en triglycérides, si possible sans impliquer une carence minérale trop pénalisante pour la croissante.

2. Comment améliorer le bilan énergétique et environnemental des micro-algues

Mais produire des lipides ne suffit pas : il faut ensuite les récolter et les purifier. Récolter des cellules de quelques microns de diamètre dont la densité est proche de celle de l'eau et à de très faibles concentrations (de l'ordre du gramme par litre) est loin d'être trivial. C'est surtout une étape très énergivore. De nombreuses analyses du cycle de vie (ACV) ont été réalisées dans l'objectif d'évaluer les impacts environnementaux engendrés

L'amélioration du bilan énergétique est la première des priorités

par une hypothétique usine de production de biocarburant algal. Il apparaît que les coûts énergétiques associés à la récolte puis au séchage des algues ne seraient pas compensés par l'énergie re-

cueillie. Pour être énergétiquement rentables, les lipides doivent être récupérés en milieu liquide, avec des technologies à développer et donc singulièrement différentes de celles actuellement utilisées pour les plantes terrestres.

Une étude ACV récente [Collet *et al.*, 2014] montre que l'amélioration du bilan énergétique est la première des priorités pour que ces procédés soient durables, notamment pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). La plupart des études visant à réduire les émissions de GES mettent l'accent sur le développement de technologies pour améliorer le bilan énergétique. Cette cible prioritaire permettra certainement de réduire les coûts financiers et environnementaux. Toutefois, une grande partie des impacts environnementaux, et en particulier les émissions de GES, ne sont pas réalisés sur le site de production, mais découlent de la production d'électricité nécessaire aux différentes étapes du procédé : production, récolte et transformation des algues. La source d'électricité joue donc un rôle clé dans l'impact de la production algale. Collet *et al.* [2014] ont considéré un scénario où 45 % de l'électricité a été produite par une source renouvelable locale (panneaux photovoltaïques ou éoliennes) qui n'affecte pas la productivité des micro-algues sur la surface considérée.

Le bilan environnemental de ce nouveau système de production, qui fournit à la fois électricité et biomasse algale, est alors comparé aux améliorations résultant de percées technologiques conduisant à une augmentation de la productivité des micro-algues ou une intensification du procédé. Seule une augmentation très marquée de la productivité pourrait significativement réduire les impacts en termes de GES. Par contre, l'utilisation d'une source locale d'électricité renouvelable réduit fortement les émissions. Cette étude a orienté les recherches vers la solution exploitée par le projet ANR Purple Sun qui combine productions photosynthétique et photovoltaïque.

3. Des rendements réels bien inférieurs aux rendements théoriques de la photosynthèse

Les micro-algues peuvent atteindre des rendements photosynthétiques très élevés, définis par le rapport entre l'énergie lumineuse incidente et l'énergie stockée dans la plante. Dans des conditions optimales, au laboratoire, huit photons sont nécessaires pour fixer *in fine* une molécule de CO₂. Compte tenu des besoins énergétiques inhérents de la cellule et du contenu énergétique moyen d'un photon solaire, cela signifie que les micro-algues peuvent stocker au maximum 10 % de l'énergie solaire incidente.

Ces rendements théoriques ne diffèrent pas fondamentalement des rendements optimaux des végétaux supérieurs mais, pour ces micro-organismes, il est plus facile de s'en rapprocher. En effet, les conditions de croissance, en phase liquide, peuvent être beaucoup plus facilement optimisées, en particulier pour que le CO₂ soit toujours en concentration optimale pour la rubisCO, l'enzyme-clé du règne végétal qui intervient dans le cycle de Calvin. Ces rendements photosynthétiques élevés ont pour première conséquence de forts taux de croissance, qui peuvent excéder un doublement de la biomasse par jour. Ces rendements directement extrapolés loin des murs du laboratoire à des productions extensives fixent des limites thermodynamiques de l'ordre de 250 tonnes de biomasse (sèche) par hectare et par an. Mais, parmi le nombre fleurissant de *start-up* sur ce sujet, des annonces de productivité dépassent régulièrement ces limites. Outre le fait que l'objectif est avant tout d'attirer des investisseurs, les excès d'optimisme résultent de deux erreurs.

La première découle de la difficulté à extrapoler des productivités de l'échelle du laboratoire à l'échelle industrielle. À surface équivalente, un doublement de la profondeur du système de culture ne produira pas un doublement de biomasse car, l'essentiel de la

lumière étant absorbé dans la couche de surface, la population algale située dans la couche inférieure n'aura pas accès à la lumière.

La seconde erreur vient de l'utilisation d'espèces souvent hétérotrophes, c'est-à-dire pouvant également tirer leur énergie d'une source de carbone organique (par exemple, du glucose). Le bilan énergétique devant alors être considéré doit prendre en compte l'impact de la production agricole de ces sucres, ce qui ramène immédiatement les productivités à des niveaux largement plus faibles. L'approche plus raisonnable consistant à utiliser des déchets organiques n'est pas encore mature car elle nécessite des étapes intermédiaires pour dégrader la matière organique carbonée afin

Les excès d'optimisme résultent de deux erreurs

de la rendre disponible pour les micro-algues. Des recherches sont en cours pour exploiter cette piste prometteuse mais complexe, qui lierait le sort des micro-algues à celui des dispositifs de traitement de l'eau. Outre l'utilisation du carbone organique, les algues pourraient

également éliminer nitrates, ammonium, phosphates, etc. qu'elles utilisent comme source minérale d'azote et de phosphore.

Les rendements qui ont pu, jusqu'à présent, être obtenus expérimentalement en condition autotrophe et en utilisant la lumière solaire sont pourtant bien en dessous de ces rendements théoriques. Ils plafonnent plutôt dans la fourchette de 5 à 60 T.ha⁻¹.an⁻¹ et les productivités des systèmes commerciaux vont de 10 à 30 T.ha⁻¹.an⁻¹. Ces chiffres sont encore vraisemblablement optimistes car la majorité des études ont été extrapolées à partir de résultats obtenus sur des périodes relativement courtes et, souvent, seules les meilleures performances sont rapportées. Notons aussi que, paradoxalement, les productions en systèmes intensifs (photo-bioréacteurs) ne tiennent pas toujours leurs promesses en extérieur et ne conduisent pas nécessairement à des productivités significativement supérieures à celles obtenues dans des systèmes de cultures ouverts (type *raceways*), plus rustiques.

4. Principaux facteurs affectant les rendements de production des micro-algues

Les productivités mesurées expérimentalement sont souvent loin de la limite théorique pour différentes raisons. La première est liée au rendement de la photosynthèse en fonction du flux de photons reçu. À faible intensité, les photosystèmes peuvent utiliser chaque photon avec une efficacité maximale. En effet, lorsque le flux de photons est faible, la probabilité qu'un photosystème excité par un photon en reçoive un second est réduite. Cette efficacité maximale à faible intensité lumineuse correspond à la partie linéaire de la courbe de réponse de la photosynthèse à la lumière (courbe dite PI, illustré sur la Fig. 1 pour une diatomée marine). Mais, pour une lumière plus intense, la proportion de photons atteignant des photosystèmes déjà excités augmente. Dans le meilleur des cas, cet excès d'énergie est dissipé soit par un processus de *quenching* non photochimique (principalement thermique), soit par réémission d'un photon de plus faible énergie (fluorescence). Mais il peut également conduire à la dégradation de protéines impliquées dans les voies de fixation du carbone. Cet endommagement de l'appareil photosynthétique se traduit par le maximum visible sur la courbe PI, au delà duquel les performances sont largement dégradées. De plus, la production d'oxygène photosynthétique induit d'autres mécanismes d'inhibition. La concentration élevée d'oxygène dans un flux photonique fort conduit à la formation de radicaux libres de l'oxygène, éléments très réactifs qui endommagent également les cellules et conduisent à une forte inhibition.

Ces mécanismes de photo-inhibition se produisent majoritairement l'été, au cœur de périodes de forte production, et sont responsables d'une baisse significative de productivité. À partir d'une certaine intensité lumineuse, le taux de croissance de l'algue

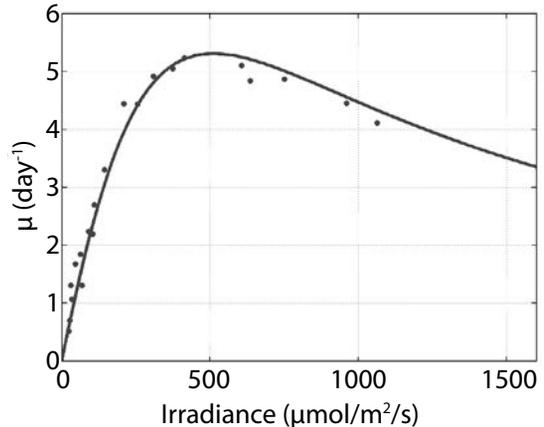


Figure 1. Taux de croissance de *Skeletonema costatum* en fonction de la lumière
Source : d'après Anning *et al.*, 2000

diminue, ce qui signifie qu'elle aurait une meilleure croissance si on lui faisait de l'ombre. Certains systèmes de cultures de micro-algues ombragent les micro-algues aux heures les plus ensoleillées, mais l'énergie solaire est alors perdue.

Il existe un deuxième effet délétère résultant d'un excès de flux solaire, moins connu que le précédent et dû à l'échauffement de l'eau de la culture. Généralement, la masse totale d'eau par m^2 est relativement faible dans les systèmes de production, de l'ordre de $30 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ au maximum. Une telle masse d'eau va donc atteindre des températures supérieures à 40° [Béchet *et al.*, 2010], en

particulier pour les photo-bioréacteurs, plus fins et pour lesquels il y a peu d'évaporation (phénomène qui limite l'échauffement). Hors, les températures optimales de croissance pour la majorité des micro-algues cultivées sont en général inférieures à 30° et deviennent létales pour des valeurs supérieures à 35° (voir Fig. 2).

Les solutions habituellement utilisées (dans le cadre de la production de composés à haute valeur ajoutée) pour pallier ce réchauffement consistent, d'une part, à ombrager les cultures et, d'autre part, à brumiser de l'eau (de bonne qualité) de façon à réduire localement

Les productivités mesurées expérimentalement sont loin de la limite théorique

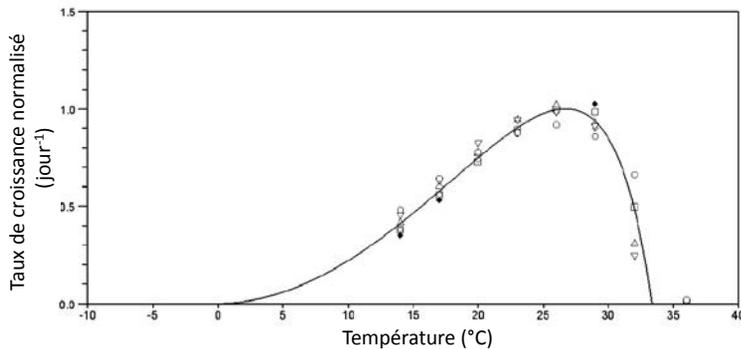


Figure 2. Effet de la température sur *Nannochloropsis oceanica*

Source : d'après Bernard et Raymond, 2012

la température par évaporation. Mais ces pratiques ont un fort impact sur les ressources en eau et conduiraient à une consommation considérable si elles étaient utilisées à grande échelle [Béchet *et al.*, 2010].

5. Utilisation préférentielle de certains photons en fonction de leur couleur (longueur d'onde)

La photosynthèse n'utilise pas identiquement tous les photons du spectre solaire. Les micro-algues absorbent principalement les photons dont la longueur d'onde varie entre 400 et 700 nm, les photons bleus et rouges étant les plus efficaces, de sorte que la photosynthèse n'utilise approximativement que 45 % de l'énergie solaire.

La Fig. 3 illustre l'absorption due aux principaux pigments constitutifs des micro-algues et cyanobactéries. La phycocyanine et la phycoérythrine sont synthétisées de façon significative uniquement par certaines espèces (principalement des cyanobactéries), ce qui explique que les photons verts soient peu absorbés par une majorité de micro-algues.

6. Utilisation de panneaux photovoltaïques pour optimiser le flux d'énergie solaire

Le surplus d'énergie solaire, délétère pour la production de micro-algues, peut être

utilisé par des panneaux photovoltaïques. Ce concept, déjà exploré dans le cadre de cultures de plantes terrestres sous serres photovoltaïques, est maintenant bien établi. En général, des modules de panneaux photovoltaïques (type silicium) sont intégrés dans les serres et ombragent partiellement les cultures.

Les cellules photovoltaïques ont maintenant des rendements supérieurs à 22 % sur des systèmes pilotes [Green *et*

al., 2014]. Plusieurs types de ces cellules sont actuellement disponibles sur le marché (technologies cristallines ou couches minces), leur rendement restant de l'ordre de 15 %. Le marché mondial est actuellement dominé par les cellules en silicium cristallin (86 % en 2011), du fait de leur rendement élevé et de leur coût de fabrication relativement faible. Des technologies émergentes (silicium haut rendement, cellules organiques, cellules nano-structurées) sont susceptibles de se développer à court terme [der Wiel, 2014], en particulier pour l'intégration au bâti.

Les panneaux photovoltaïques classiquement installés sur les serres diminuent les radiations solaires, ce qui a pour effet de réduire la productivité biologique [Pérez-Alonso *et al.*, 2012]. Étant donné que les plantes, comme les micro-algues (par exemple les Chlorophycées), n'utilisent qu'une partie du spectre solaire, principalement le bleu et le rouge, il s'en suit que l'utilisation des filtres photovoltaïques laissant passer préférentiellement certaines longueurs d'onde constitue un moyen de préserver la productivité en biomasse. De façon complémentaire, certaines cellules photovoltaïques sont plus efficaces dans la partie verte du spectre solaire.

Moheimani et Parlevliet [2013] ont montré, en utilisant un modèle numérique, qu'un filtre photovoltaïque placé au-dessus d'un dispositif de production de micro-algues de type *raceway* permettrait de modifier le spectre de la lumière reçue par les algues et d'exploiter les zones du spectre non absorbées par la

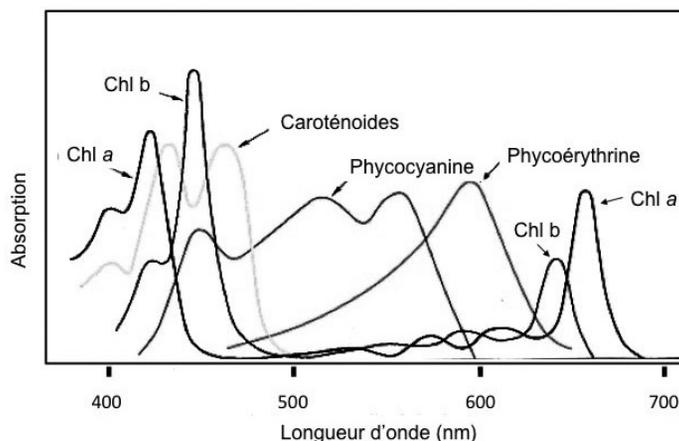


Figure 3. Absorption par les différents pigments présents chez les algues et les cyanobactéries

chlorophylle pour une production d'électricité. Leur modèle indique que la lumière solaire résiduelle non retenue par les panneaux photovoltaïques permettrait d'assurer une croissance algale induisant une productivité énergétique de l'ordre de 109 à 146 MJ.ha⁻¹.an⁻¹, alors que la production électrique serait de l'ordre de 551 à 1102 MJ.ha⁻¹.an⁻¹. Le modèle utilisé ne prend pas en compte l'impact de la température du milieu de culture et ne prédit donc pas le gain potentiel obtenu en limitant l'échauffement des cultures.

7. Le projet Purple Sun explore une voie innovante et prometteuse

Financé par l'ANR, le projet Purple Sun a pour objectif d'explorer cette piste novatrice. Réuni dans le cadre du programme ANR Bio-Matières et Energie (Bio-ME) 2013, le consortium rassemble sept partenaires pour un budget global de 3 millions d'euros. Leurs expertises s'appuient sur les techniques modernes de design et de pilotage des serres (INRA) et mobilise les compétences de spécialistes en micro-algues (LOV et INRIA), en technologies photovoltaïques innovantes (Sunpartner Technologies et Armines), en calcul numérique et en études d'impacts (ACRI et INRIA). Le

Les cellules photovoltaïques ont des rendements supérieurs à 22 % sur des systèmes pilotes

concept de serre photovoltaïque pour micro-algues (MPG) s'est vu remettre le prix spécial du jury des « Trophées Climat Énergie » en novembre 2013 par le Conseil général des Alpes-Maritimes.

Des expériences préliminaires réalisées sur la micro-algue *Dunaliella salina* ont démontré la pertinence de la technologie photovoltaïque « transparente » Wysips® (*What You See is a Photovoltaic Surface*) développée par Sunpartner Technologies, qui a reçu le prix « Nobel Sustainability Supported Clean Tech Company 2013 ». En effet, l'utilisation de Wysips® permet à la fois de maintenir la productivité biologique aux intensités lumineuses moyennes et de réduire la photo-inhibition aux fortes intensités tout en produisant de l'électricité photovoltaïque.

Le projet vise à déterminer et tester le design d'une solution photovoltaïque spécifique optimisant l'utilisation globale du spectre solaire pour les productions photovoltaïque et photosynthétique. Des expériences seront menées pour mieux comprendre et maîtriser l'effet d'une lumière colorée (dépourvue de certaines longueurs d'onde) sur le taux de croissance des micro-algues et leur bioaccumulation de composés énergétiques. Les développements technologiques du projet seront guidés par l'utilisation

de modèles numériques de pointe. Ces modèles serviront de support pour le développement de dispositifs de contrôle-commande pour maintenir les algues dans des conditions optimales de croissance. En outre, ils permettront d'optimiser les coûts et les impacts sur l'environnement.

8. Conclusion

La voie explorée par le projet Purple Sun permettra, à terme, de préparer la prochaine génération de composants photovoltaïques optimisés pour les serres de micro-algues. L'optimisation conjointe du dispositif photovoltaïque et du procédé de production de micro-algues nécessitera de nombreux développements et une décennie sera probablement nécessaire pour que ces systèmes de production de biocarburants deviennent rentables. Mais, d'ici là, cette nouvelle génération de procédés de culture représentera une opportunité pour la production de composés à haute valeur ajoutée. ■

Remerciements. Le projet Purple Sun ANR-13-BIOME-004 est financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR) dans le cadre du programme « Biomasse-énergie ».

Bibliographie

- Anning, T, MacIntyre, HL, Pratt, SM, Sammes, PJ, Gibb, S & Geider, RJ (2000) Photoacclimation in the marine diatom *Skeletonema costatum*. *Limnology and Oceanography* 45 (8) : 1807-1817.
- Béchet, Q, Shilton, A, Fringer, OB, Muñoz, R & Guieysse, B (2010) Mechanistic modeling of broth temperature in outdoor photobioreactors. *Environmental Science & Technology* 44 (6) : 2197-2203.
- Béchet, Q, Shilton, A, Park, JBK, Craggs, RJ & Guieysse, B (2011) Universal temperature model for shallow algal ponds provides improved accuracy. *Environ Sci Technol* 45 (8) : 3702-3709.
- Bernard, O & Rémond, B (2012) "Validation of a simple model accounting for light and temperature effect on microalgal growth". *Bioresource Technology*, Vol. 123, pp. 520-527.
- Bernard, O (2011) "Hurdles and challenges for modeling and control of microalgae for CO₂ mitigation and biofuel

production". *Journal of Process Control*, Vol. 21, No. 10, pp. 1378-1389.

Cadoret, JP & Bernard, O (2008) La production de biocarburant lipidique avec des micro-algues : promesses et défis. *Journal de la Société de Biologie*, 202, pp 201-211.

Chisti, Y (2007) Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25: 294-306.

Collet, P, Lardon, L, Hélias, A, Bricout, S, Lombaert-Valot, I, Perrier, B, Lépine, O, Steyer JP & Bernard, O (2014) Biodiesel from microalgae – Life cycle assessment and recommendations for potential improvements. *Renewable Energy* 71: 525-533.

der Wiel, BV, Egelhaaf, HJ, Issa, H, Roos, M & Henze, N (2014) Market Readiness of Organic Photovoltaics for Building Integration. *MRS Online Proceedings Library*, 1639, mrsf13-1639.

Gudin, C & Bernard, O (2013) La culture de l'invisible – le rêve porté par les micro-algues, p. 109. Nice, Ovadia.

Huntley M & Redalje DG (2007) CO₂ Mitigation and Renewable Oil from Photosynthetic Microbes: A New Appraisal. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12 : 573-608.

Green, MA, Emery, K, Hishikawa, Y, Warta, W & Dunlop, ED (2014) Solar cell efficiency tables (version 44). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 22 (7) : 701-710.

Lacour, T, Sciandra, A, Talec, A, Mayzaud, P & Bernard, O (2012) Diel variations of carbohydrates and neutral lipids in nitrogen-sufficient and nitrogen-starved cyclostat cultures of *Isochrysis sp.* *Journal of Phycology* 4(4) : 966-975.

Lardon, L, Hélias, A, Sialve, B, Steyer, JP & Bernard, O (2009) "Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae". *Environ. Sci. Technol.*

Moheimani, NR & Parlevliet, D (2013) Sustainable solar energy conversion to chemical and electrical energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27 : 494-504.

Pérez-Alonso, J, Pérez-García, M, Pasamontes-Romera, M & Callejón-Ferre, AJ (2012) Performance analysis and neural modeling of a greenhouse integrated photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (7) : 4675-4685.

Sialve, B, Bernet, N & Bernard, O (2009) "Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable". *Biotechnol. Advances*, Vol. 27, pp. 409-416.

Wijffels RH & Barbosa MJ (2010) An outlook on microalgal biofuels. *Science (New York NY)* 329 (5993) : 796-799.

Zittelli, GC, Rodolfi, L, Biondi, N & Tredici, MR (2006) Productivity et photosynthetic efficiency of outdoor cultures of *Tetraselmis suecica* in annular columns. *Aquaculture* 261 : 932-943.