

Microalgues, un atout pour l'économie circulaire

Résumé Les microalgues sont des microorganismes photosynthétiques qui présentent une très grande diversité, conduisant à un large potentiel d'applications biotechnologiques. On s'intéresse dans cet article au mode de culture autotrophique des microalgues dans des systèmes de culture appelés photobioréacteurs. Les principaux facteurs limitant la culture des microalgues sont décrits et des éléments de calcul de la productivité sont présentés. La fin de l'article est consacrée à la valorisation par les microalgues des effluents gazeux et liquides, et l'utilisation des microalgues dans le développement de l'économie circulaire.

Mots-clés **Économie circulaire, microalgues, photobioréacteur, valorisation d'effluents.**

Abstract **Abstract Microalgae, an asset for the circular economy**

Microalgae are photosynthetic microorganisms with a huge diversity, leading to a wide range of potential biotechnological applications. This article focuses on the autotrophic cultivation of microalgae in culture systems known as photobioreactors. The main factors limiting the cultivation of microalgae are described and elements for calculating productivity are given. The end of the article is devoted to the use of microalgae to recover gaseous and liquid effluents and the use of microalgae in the development of the circular economy.

Keywords **Circular economy, microalgae, photobioreactor, effluent recovery.**

Les microalgues

Les microorganismes photosynthétiques sont divisés en organismes procaryotes (cyanobactéries et bactéries photosynthétiques) et eucaryotes (microalgues). Les procaryotes sont les organismes les plus anciens et leur structure interne ne possède pas d'organites cellulaires, ni de noyau. Au contraire, les microalgues présentent des organites intracellulaires spécialisés, ainsi qu'un noyau contenant le matériel génétique. Dans la suite du présent article, on assimilera l'ensemble de ces deux types d'organismes sous le vocable de microalgues.

Les microalgues présentent une grande diversité en termes de structure intracellulaire, de morphologie (*figure 1*) et de mode de vie, ce qui peut conduire à un large éventail d'applications biotechnologiques.

Les microalgues peuvent se développer sur trois conditions nutritives différentes : sur milieu organique où l'acétate, le glucose, parmi d'autres types de composés organiques, peuvent être utilisés comme source de carbone, en présence de lumière (mixotrophie) et en absence de lumière (hétérotrophie). De même, elles peuvent croître sur milieu entièrement minéral en présence de lumière avec le CO₂ comme source

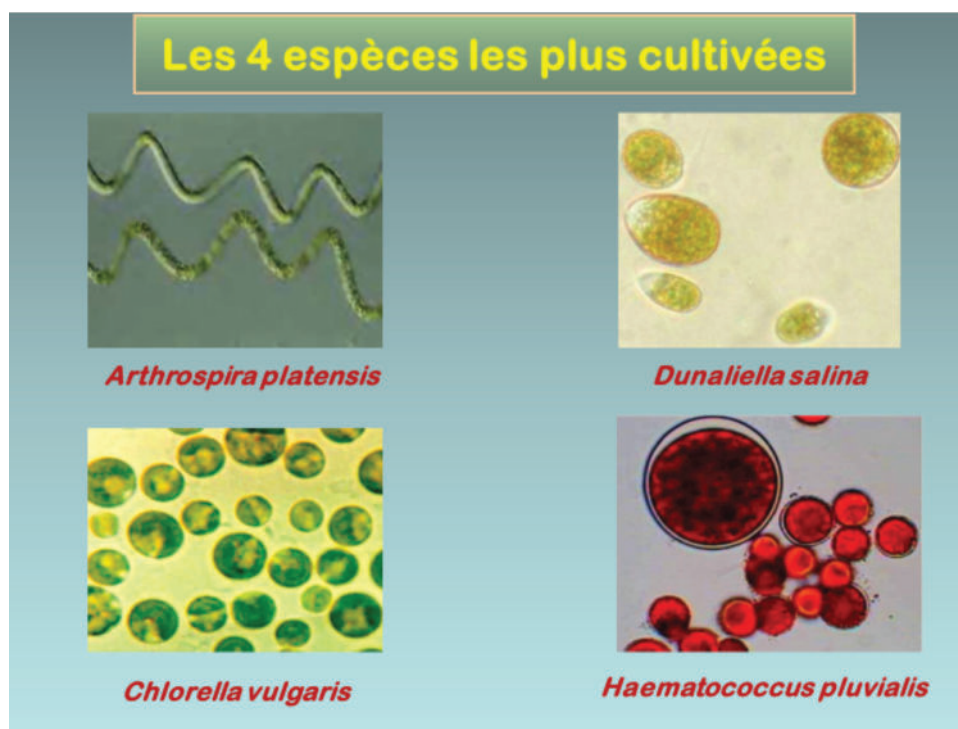


Figure 1 - Micrographies des quatre espèces les plus cultivées pour leurs valorisations industrielles.

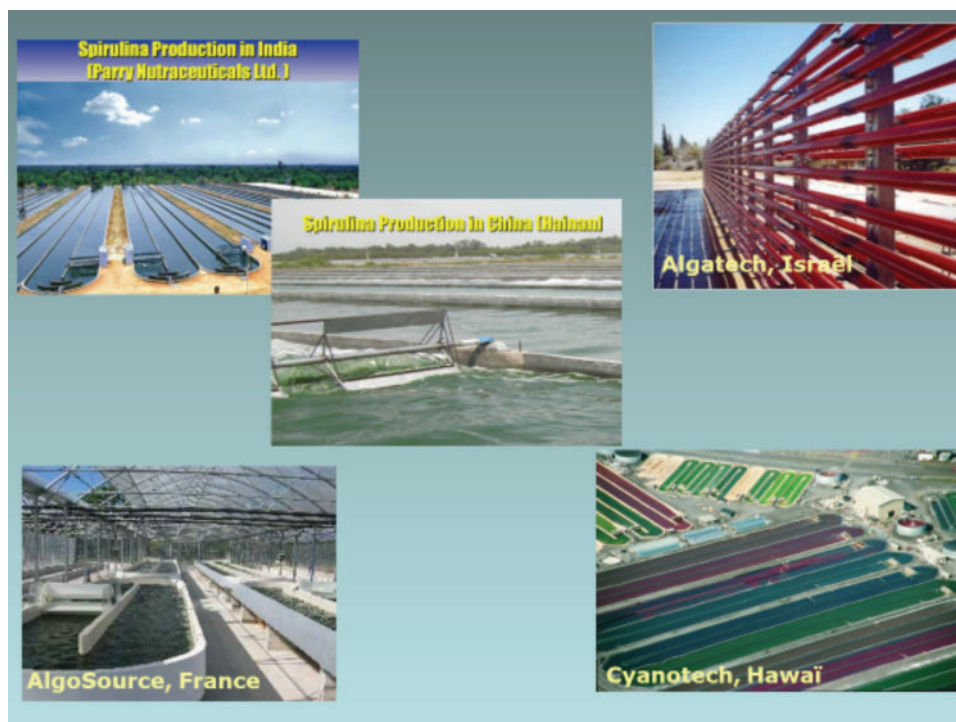


Figure 2 - Quelques exemples de systèmes de culture industriels.

de carbone (photoautotrophie). Nous n'étudierons ici que les cultures photoautotrophiques. Grâce à leur diversité biologique et métabolique, les microalgues peuvent produire des molécules à valeur ajoutée. Ces produits biochimiques sont très variés : carbohydrates, protéines, lipides, vitamines, antioxydants, pigments [1-4]. La production commerciale contemporaine de microalgues, visant à exploiter ces produits d'intérêt, est utilisée pour des applications dans l'industrie cosmétique, l'industrie alimentaire humaine et animale, les compléments alimentaires, l'industrie chimique, pharmaceutique et des biocarburants [5].

Photosynthèse et production d'algues

La photosynthèse est le processus par lequel les plantes, les algues et certaines bactéries convertissent la lumière du soleil en énergie chimique pour alimenter leur croissance. Ce processus se déroule dans les chloroplastes des cellules végétales et implique l'utilisation de la lumière, de l'eau et du dioxyde de carbone pour produire des réserves carbonées et de l'oxygène. Les algues sont des organismes photosynthétiques qui jouent un rôle crucial dans la production d'oxygène de la planète et dans la chaîne alimentaire aquatique (*i.e.* phytoplancton dans les océans). Elles peuvent être unicellulaires ou multicellulaires et se trouvent dans une grande variété d'environnements aquatiques, allant des océans aux lacs en passant par les rivières. Les microalgues s'adaptent très facilement et peuvent être retrouvées dans de nombreux environnements extrêmes, comme dans les régions arctiques ou antarctiques et dans les déserts. En comparaison des autres végétaux, les microalgues sont très efficaces pour transformer par photosynthèse le dioxyde de carbone (CO_2), les nutriments et l'eau en protéines, en lipides et en polysaccharides. Du fait de leur caractère unicellulaire, elles peuvent se reproduire rapidement, sans la formation de tiges, de racines ou de

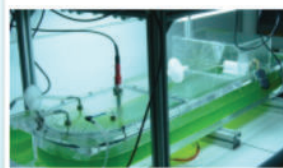
feuilles, formation qui nécessite de l'énergie, et peuvent donc utiliser le CO_2 et les nutriments plus efficacement que les plantes terrestres. Par exemple, elles peuvent produire plus de protéines en utilisant moins de surface terrestre, entre 4 et 15 tonnes de protéines par hectare et par an, contre 0,6 à 1,2 pour le soja [6]. L'efficacité de la photosynthèse est directement liée à la quantité (et plus précisément au flux) de photons reçus par les microalgues. Ce flux est nommé irradiance et son unité est la micromole de photons absorbée par mètre carré de surface et par seconde ($\mu\text{mol}_{\text{h}\nu}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). La réponse photosynthétique est fonction de cette irradiance, et trois régimes sont ainsi usuellement distingués : un régime photolimité dans lequel l'activité de la photosynthèse augmente avec l'irradiance, un second régime dit photosaturé dans lequel l'activité de la photosynthèse est indépendante de la lumière reçue, et un régime de photoinhibition où l'activité de la photosynthèse décroît avec l'augmentation de l'irradiance reçue par le microorganisme. Il faut ajouter à cela qu'en dessous d'une certaine valeur d'irradiance, appelée irradiance de compensation, et caractérisée par un bilan de production nul en oxygène à l'échelle de la cellule, le phénomène de respiration est prédominant sur la photosynthèse. Ceci se caractérise par une production de biomasse négative (consommation des réserves en carbone). Les besoins en lumière des microalgues ont amené à élaborer de nombreux systèmes dédiés à leur production [7]. Ces systèmes de culture ouverts ou fermés (*figure 2*) sont catégorisés en fonction de leur taille, du contrôle ou non du pH et de la température, du mode d'agitation (lorsqu'il existe), de la source lumineuse (solaire ou artificielle), de la profondeur de culture, ou encore de leur forme (plane, cylindrique ou tubulaire).

Les principaux systèmes dédiés à la culture de microalgues sont ouverts, de type bassins ou lagunes (*figure 2*). Ce système de production est le plus simple. Il consiste en une étendue d'eau d'une profondeur comprise généralement entre 20

Ingénierie des photobioréacteurs

Conception et intensification de photobioréacteurs

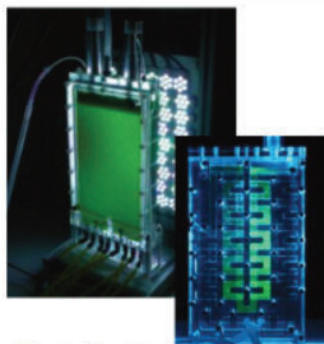
- Recherche et conception de technologies adaptées de production
- Intégration industrielle (CO₂, effluents liquides, recyclage de milieu de culture, couplage aval)



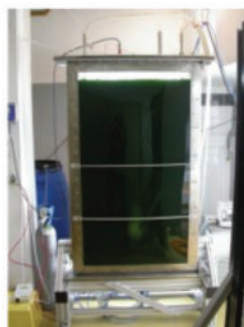
Technologie Raceway



PBR pour l'aquaculture (coll. Jouin Plastique, Ifremer)



Photobioréacteur Haute Productivité Volumique)



Photobioréacteur de production



Photobioréacteur solaire « AlgoFilm »

Figure 3 - Quelques exemples de photobioréacteurs développés au laboratoire GEPEA (Génie des procédés Environnement-Agroalimentaire, UMR CNRS 6144).

et 40 cm sans agitation particulière. Ce système a été utilisé par exemple par l'entreprise Cognis à Hutt Lagoon, en Australie, pour cultiver la microalgue *Dunaliella salina* cultivée pour sa forte composition en bêta-carotène. C'est aujourd'hui l'entreprise allemande de chimie BASF qui exploite ces 700 hectares de surface, ce qui en fait le plus grand site de production du monde [8]. Les systèmes ouverts agités les plus populaires à grande échelle sont les systèmes de type « raceway ». Développée dans un premier temps dans le domaine du traitement des eaux usées par l'équipe de l'américain William Oswald [9], cette technologie consiste en une boucle (ou, parfois, plusieurs imbriquées) constituée de deux zones droites et deux zones de virages dans laquelle circule une faible épaisseur de culture de microalgues (environ 20 à 40 cm pour les systèmes industriels) mise en mouvement, le plus souvent par l'intermédiaire d'une roue à aubes. Un dernier type de système ouvert a été développé dans les années 1960 en République Tchèque, à Trebon [10]. Ce système a pour but de diminuer au maximum l'épaisseur de culture pour une même surface au sol. Pour cela, un système de plan faiblement incliné a été développé (inclinaison de 1,7 % sur lequel la culture de microalgues ruissèle, puis est réinjectée en tête de plan *via* une pompe).

En raison de leur coût de fabrication, les systèmes fermés (photobioréacteurs) sont à ce jour peu exploités à l'échelle industrielle. Seules quelques entreprises commercialisant des métabolites à forte valeur ajoutée ont opté pour produire des microalgues ou cyanobactéries dans des photobioréacteurs (PBR). Ces derniers ont toutefois de multiples avantages par rapport aux bassins ouverts : la contamination peut y être contrôlée en raison de l'absence de contact avec l'extérieur, la désorption du CO₂ injecté est elle aussi limitée en raison des faibles échanges avec l'air ambiant et la consommation en eau est faible comparée aux systèmes ouverts, du fait de la quasi-absence d'évaporation et du volume faible de culture

mobilisé. Il existe de nombreux types de PBR. On distingue en particulier les systèmes à éclairage artificiel et ceux à éclairage solaire. Les systèmes clos (*figure 3*) les plus utilisés et étudiés sont les photobioréacteurs tubulaires, à colonnes et plans [7].

Les PBR tubulaires sont principalement utilisés pour la culture de microalgues à grande échelle et en extérieur. Ils sont généralement fabriqués en verre ou en plastique, composés de plusieurs unités assemblées. Ils peuvent être disposés de façon horizontale, inclinée, verticale ou hélicoïdale, afin de maximiser la capture de la lumière solaire. La circulation de la culture peut se faire par pompage ou bien en l'agitant simplement par injection d'un mélange air-CO₂ (« air-lift »). Les tubes qui les composent ont généralement un diamètre de 10 à 60 mm. Les PBR à colonne à bulles sont de simples systèmes cylindriques verticaux dont le rayon ne doit pas dépasser idéalement 0,2 m et la hauteur comprise entre 2,5 et 4 mètres pour éviter les problèmes liés à la disponibilité de la lumière au centre du PBR et à la résistance des matériaux transparents souvent utilisés pour sa conception. L'agitation de la culture est réalisée en injectant un mélange d'air-CO₂ comprimé par le bas du système (système « air-lift »). Parfois, les systèmes comportent deux cylindres : un cylindre pour la montée de la culture (« riser ») et un cylindre pour la descente (« downcomer »). Les PBR plans ont généralement une forme rectangulaire et sont fabriqués en verre, polycarbonate ou autres matériaux transparents dont l'épaisseur est variable, pouvant aller de quelques centimètres pour atteindre les quelques millimètres (PBR à haute productivité). Ils peuvent être orientés et/ou inclinés à différents angles (verticaux ou inclinés) en fonction de l'intensité ou de la direction de la source lumineuse, pour capter au mieux la lumière solaire. Du fait que l'on peut atteindre un rapport élevé entre la surface éclairée et le volume du PBR, en minimisant l'épaisseur

du milieu de culture, ils peuvent également atteindre des productivités importantes de biomasse, notamment pour les PBR à haute productivité comme la technologie AlgoFilm (de 11 à 30 kg/m³ par jour) [11].

La culture de microorganismes en PBR peut se réaliser selon différents modes de fonctionnement définis en fonction de l'apport en milieu de culture liquide (batch, continu, semi-continu), indépendamment du système utilisé. La caractéristique supplémentaire à tenir en compte pour la culture de microalgues, par rapport aux cultures d'autres microorganismes comme les bactéries, est l'apport en lumière. Dans les systèmes à éclairage artificielle, la lumière peut être fournie en continu ou par cycles jour/nuit. Le carbone minéral peut être apporté soit sous forme de bicarbonate dans le milieu de culture ou sous forme de CO₂ atmosphérique pour les systèmes ouverts, soit sous forme de gaz injecté dans le milieu, permettant ainsi de contrôler le pH. Pour le mode de fonctionnement discontinu (« batch »), le milieu de culture est fourni au début de la culture avec l'inoculum. Les cellules vont se développer jusqu'à que la lumière soit limitante ou l'un des autres éléments nutritionnels dans le milieu de culture soit épuisé. Une culture en mode « fed-batch » (entrée de milieu de culture sans sortie) se caractérise par l'ajout de milieu de culture jusqu'à atteindre un volume final de travail dans le réacteur. Dans un premier temps, le réacteur est rempli avec un volume opérationnel nettement inférieur au volume final de travail, puis alimenté progressivement en milieu jusqu'à avoir le volume souhaité. Ce mode de conduite permet de limiter les carences nutritionnelles. En mode dit semi-continu ou séquentiel, le réacteur est rempli initialement de milieu de culture et de l'inoculum. Ensuite, un volume de la culture est récolté ponctuellement dans le temps et remplacé par du milieu frais. Une entrée et une sortie ponctuelles sont effectuées dans le réacteur. Ce mode est bien adapté aux cultures solaires. Le mode de fonctionnement continu est appelé « chemostat » ou « turbidostat ». La principale différence entre le chemostat et le turbidostat réside dans le fait que le chemostat maintient un environnement chimique constant, alors que le turbidostat maintient une turbidité constante. Pour ce faire, le milieu frais est ajouté en continu au chemostat au même rythme que les produits sont éliminés, tandis que dans le turbidostat, le milieu frais est automatiquement ajouté à la culture en maintenant une turbidité constante. Le critère opérationnel est le taux de dilution D , avec le temps de séjour τ défini par la relation $\tau = 1/D$. En mode continu, et si les conditions de culture sont maintenues stables, les cellules sont censées atteindre un état d'équilibre où les variables d'état deviennent indépendantes du temps, c'est-à-dire que tous les paramètres de culture deviennent constants. Ce mode est particulièrement bien adapté à une analyse approfondie dans des conditions contrôlées spécifiques. En effet, comparé à d'autres modes de conduites, comme les cultures en batch, le mode de fonctionnement en continu ou en semi-continu peut donner lieu à des procédés stables et robustes avec des productivités plus élevées.

Principaux facteurs limitants de la croissance des microalgues

En conditions axéniques, les principaux paramètres susceptibles de limiter la croissance photosynthétique sont la lumière, la température, le pH, l'oxygène dissous, la salinité, la qualité du mélange, l'apport en carbone et en nutriments

minéraux. En conditions non axéniques, la contamination bactérienne, fongique, la prédation par des protozoaires, ou même parfois la contamination par une autre microalgue que celle désirée sont aussi des causes de perte de productivité et même de perte de culture.

La température

Comme pour tout phénomène réactif, plus la température est élevée, plus le taux de croissance des microalgues est important, jusqu'à une certaine valeur à partir de laquelle on note des dégradations dues à une dégradation des protéines pouvant conduire à la mort cellulaire ou à l'augmentation du stress oxydatif par la formation des espèces réactives de l'oxygène (ROS). La température optimale des microalgues va dépendre de l'espèce et se trouve usuellement entre 18 et 35 °C [12, 13]. Pour les cultures solaires, la température est le paramètre le plus influent sur la perte de biomasse en période de nuit. Le ralentissement de l'activité métabolique et, de ce fait, de la décroissance en biomasse par diminution de la température a été confirmé par de nombreuses études et sur de nombreux microorganismes [14-16].

Le pH

Chaque microalgue possède un pH optimal de croissance. Toutefois, un lien direct entre pH et carbone dissous existe, le CO₂ étant un acide faible, avec une physico-chimie de dissolution spécifique. Ainsi, le carbone inorganique dissous peut se trouver sous trois formes : CO₂, HCO₃⁻ et CO₃²⁻ selon le pH du milieu de culture. La consommation du carbone minéral entraîne une basification du milieu de culture, provoquant l'augmentation du pH. Une régulation du pH est donc souvent nécessaire afin d'éviter toute limitation carbonée, le pH étant alors asservi à un apport de carbone inorganique assimilable pour les microalgues sous la forme de dioxyde de carbone ou de bicarbonate CO₂/HCO₃⁻ dissous en phase liquide [17].

La lumière

La lumière est un paramètre essentiel pour la culture des microalgues. Les microalgues absorbent la lumière dans le spectre visible grâce aux pigments dont elles disposent dans leurs chloroplastes, et plus précisément dans la région dénommée PAR (pour *photosynthetically active radiation*) comprise entre 400 et 750 nm. Pour la culture de microalgues, l'intensité d'énergie lumineuse apportée à la surface d'un photobioréacteur est définie comme le flux de lumière incident, ou PFD (pour *photon flux density*), exprimé en $\mu\text{mol/s/m}^2$. Le PFD est associé à une direction, notamment dans le cas des cultures en conditions solaires, puisque la source d'énergie lumineuse change de position au long d'une journée [18]. Pour les cultures éclairées avec la lumière artificielle, la source d'énergie lumineuse est contrôlée et provient souvent d'un panneau LED émettant de la lumière blanche collimatée. D'autre part, du fait de l'absorption importante de la lumière par les cellules, la quantité d'énergie lumineuse arrivant aux cellules localement pour réaliser la photosynthèse sera fonction de la position dans la profondeur du PBR. Cette quantité est appelée irradiance G et dépendra donc du flux incident reçu en surface de PBR, de la géométrie de celui-ci et des propriétés dites radiatives des microalgues voire du milieu si celui-ci n'est pas transparent. L'atténuation lumineuse peut être représentée en première approximation par l'équation de Beer-Lambert en utilisant un coefficient d'extinction représentant le coefficient d'absorption de la biomasse.

Le professeur Jean-François Cornet et son équipe ont utilisé une approche différente décrivant de manière précise l'atténuation lumineuse dans un photobioréacteur [20]. Le modèle de transfert radiatif proposé décrit l'atténuation de la lumière en prenant en compte son absorption par les pigments et la diffusion de la lumière par l'ensemble des cellules. Une fois la lumière reçue par les cellules connues, il est utile d'en déduire la vitesse d'absorption de photons, qui représente donc la quantité de photons effectivement absorbée par unité de temps par les cellules (et jouant donc sur les réactions biologiques de photosynthèse). Cette vitesse, exprimée par unité de masse de microalgues, est appelée MRPA (pour *mean rate of photons absorption*) et notée $\langle A \rangle$ (en $\mu\text{mol}_{\text{hv}} \cdot \text{kg}_{\text{C}_X}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). Elle prend en compte le champ d'irradiance dans le volume de culture, la composition pigmentaire (qui détermine la quantité effectivement absorbée par les cellules), ainsi que la concentration en biomasse. Le MRPA peut être également déterminé en réalisant un bilan sur la phase photonique dans le volume de réacteur, en prenant en compte que ce qui n'est pas transmis en sortie du volume de culture est absorbé par les cellules [21] :

$$\langle A \rangle = \frac{S}{V C_X} (\bar{q} - q_L) = \frac{a_{\text{light}}}{C_X} (\bar{q} - q_L) \quad (1)$$

où a_{light} représente la surface spécifique du PBR, c'est-à-dire le rapport entre la surface éclairée et le volume du PBR (en m^{-1}), \bar{q} et q_L représentent respectivement le PFD à l'entrée et à la sortie du système. Lorsque l'intégralité du flux lumineux est absorbée dans le PBR, l'équation 1 se résume à :

$$\langle A \rangle \simeq \frac{\bar{q} a_{\text{light}}}{C_X} \quad (2)$$

Productivités des systèmes de culture

La productivité d'un système de culture est une grandeur largement utilisée pour caractériser les performances et comparer différents systèmes entre eux et les extrapoler. Deux types de productivités peuvent être définis en culture de microorganismes photosynthétiques : la productivité volumique et la productivité surfacique. Cornet et Dussap ont établi en 2009 des règles d'ingénierie simples capables de prédire les productivités maximales de biomasse dans les systèmes de culture à partir d'une modélisation approfondie, sachant que les productivités maximales sont atteintes lorsque seule la lumière limite la croissance [21]. Ceci a d'abord été publié pour des conditions d'illumination artificielle constante, puis étendu au cas d'une utilisation solaire, en introduisant des caractéristiques spécifiques comme l'effet de l'angle d'incidence θ et de la distribution diffuse-directe du rayonnement solaire sur la conversion résultante dans le système de culture [23]. Ces relations (équations 3 et 4) donnent les productivités maximales surfacique ($S_{X_{\text{max}}}$) et volumétrique ($P_{X_{\text{max}}}$) :

$$\begin{aligned} \overline{S_{X_{\text{max}}}} &= (1 - f_d) \rho_M M_X \bar{\Phi}'_X \frac{2\alpha}{1 + \alpha} \left[\frac{\bar{x}_d K}{2} \ln \left(1 + \frac{2\bar{q}}{K} \right) \right. \\ &\quad \left. + (1 - \bar{x}_d) \overline{\cos \theta} K \ln \left(1 + \frac{\bar{q}}{K \cos \theta} \right) \right] \quad (3) \end{aligned}$$

et

$$\overline{P_{X_{\text{max}}}} = \overline{S_{X_{\text{max}}}} \frac{S_{\text{light}}}{V_R} = \overline{S_{X_{\text{max}}}} a_{\text{light}} \quad (4)$$

Les paramètres de l'équation 3 peuvent être divisés en trois groupes :

- Paramètres liés à l'espèce cultivée : il s'agit du rendement quantique molaire moyen de la croissance photosynthétique $\bar{\Phi}'_X$, de la masse molaire C_{M_X} , de la constante de demi-saturation pour la photosynthèse K et du module de diffusion linéaire α lié aux propriétés radiatives du microorganisme.

- Paramètres liés aux conditions d'exploitation : l'angle d'incidence θ , la PFD totale collectée avec la fraction diffuse correspondante (ici moyennée sur la période d'exploitation considérée).

- Paramètres liés à la géométrie du photobioréacteur : la surface spécifique a_{light} donnée par le rapport entre la surface éclairée du PBR et le volume total de la culture, et la fraction de volume sombre de conception f_d qui représente toute fraction de volume du PBR non éclairée par la PFD incidente.

Ainsi, pour une espèce donnée, les paramètres affectant la productivité du PBR sont la surface spécifique a_{light} , la fraction sombre du réacteur f_d et la capacité du PBR à collecter la lumière (caractérisée par la PFD incidente \bar{q} , l'angle d'incidence θ et la fraction diffuse \bar{x}_d). Tous ces paramètres sont liés à l'apport de lumière dans le PBR, qui dépend de son emplacement et des conditions météorologiques pour les conditions solaires. Ces formules d'ingénierie peuvent être simplifiées dans le cas de la lumière artificielle. En lumière artificielle, la source lumineuse est souvent réglée pour fournir une incidence normale ($\cos \theta = 1$). Une lumière quasi-collimatée ($\bar{x}_d = 0$) est également généralement appliquée, comme celle obtenue à partir d'un panneau LED (c'est-à-dire sans combinaison avec une plaque diffuse). Cela conduit à la formule simplifiée suivante :

$$\overline{S_{X_{\text{max}}}} = (1 - f_d) \rho_M M_X \bar{\Phi}'_X \frac{2\alpha}{1 + \alpha} K \ln \left(1 + \frac{\bar{q}}{K} \right) \quad (5)$$

et

$$\overline{P_{X_{\text{max}}}} = a_{\text{light}} (1 - f_d) \rho_M M_X \bar{\Phi}'_X \frac{2\alpha}{1 + \alpha} K \ln \left(1 + \frac{\bar{q}}{K} \right) \quad (6)$$

La surface spécifique éclairée a_{light} influence fortement la productivité volumique, mais n'a pas d'influence sur la productivité surfacique. La productivité en surface est indépendante de la profondeur du PBR, car elle ne dépend que de la lumière collectée dans des conditions de croissance limitée par la lumière. La fraction de volume dans l'obscurité noté f_d a une influence très négative sur les productivités superficielle et volumétrique. La fraction de volume dans l'obscurité n'est pas en effet seulement un volume non productif, mais elle contribue aussi négativement à la performance globale du système PBR en raison du catabolisme de la biomasse dans ce volume non éclairé et dû à la respiration. Le volume d'obscurité est généralement introduit dans la pratique lors de la conception des unités de culture de microalgues, par exemple pour le réservoir de mélange dans la boucle de culture d'un système tubulaire.

Valorisation des effluents

Valorisation du CO₂

La capture du carbone par les microalgues a été reconnue comme une méthode intéressante pour réduire les émissions de carbone, parce que les microalgues peuvent absorber le dioxyde de carbone 5 à 10 fois plus que les autres plantes terrestres du fait de leur productivité élevée par unité de surface [24]. La fixation du CO₂ s'effectue en utilisant le NADPH et l'ATP produits dans les réactions lumineuses de la photosynthèse. La conversion du CO₂ en hydrates de carbone (et autres macromolécules) se déroule dans le cycle de Calvin-Benson. Les microalgues peuvent absorber le carbone inorganique dissous (CID) de l'environnement aquatique sous forme de H₂CO₃, HCO₃⁻, CO₂ et CO₃²⁻. Les formes de CID variant en fonction du pH, et différentes souches de microalgues peuvent préférer différents types de CID. *Chlorella miniata*, *Monodus subterraneus* et *Chlorella vulgaris*, par exemple, ne peuvent absorber que du CO₂, alors que les algues marines telles que *Nannochloropsis oculata* et *Nannochloropsis gaditana* ne peuvent transporter activement que du HCO₃⁻ [25]. Certaines espèces, en revanche, comme *Chlorococcum littorale*, *Dunaliella terteeolacta*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella pyrenoidosa* et *Scenedesmus obliquus* possèdent une anhydrase carbonique (AC) externe et peuvent utiliser à la fois le HCO₃⁻ et le CO₂. Certaines souches comme *Chlorella kesslerii* et *Chlorella ellipsoidea* n'ont pas d'AC externe, mais peuvent toujours utiliser le HCO₃⁻ et le CO₂ [26].

La fixation du dioxyde de carbone d'origine industrielle par les microalgues a été largement rapportée dans la littérature [27,28]. Une capacité de captage du dioxyde de carbone d'environ 100 tonnes/an par hectare a été obtenue grâce à la culture de la microalgue *Chlorella vulgaris* dans un bassin [29]. La fixation du carbone par les microalgues comprend la culture en amont et la valorisation en aval de la biomasse produite, ce qui implique que les deux processus doivent être pris en compte dans l'évaluation de l'impact sur l'environnement. La capacité de capture nette du CO₂ par les microalgues peut être quantifiée par la différence entre les émissions indirectes de carbone liées au fonctionnement du procédé et la quantité de CO₂ capturé. Les principales sources industrielles d'émissions de CO₂ dans le monde sont le charbon (40 %), le pétrole (35 %), le gaz (20 %), le ciment (4 %) et le brûlage de gaz (0,7 %) [30]. Les gaz d'échappement de ces industries peuvent contenir jusqu'à 15 % de CO₂, ce qui constitue une source riche en CO₂ pour la culture des microalgues, alors que l'atmosphère ne contient que 0,03 à 0,06 % de CO₂ et ne peut pas répondre aux besoins en CO₂ des cultures intensives de biomasse. Les gaz de combustion peuvent contenir plus d'une centaine de composés chimiques différents, qui peuvent affecter la culture et l'environnement ; par exemple, l'oxyde de soufre peut être toxique pour les algues.

Depuis une vingtaine d'années, de nombreuses recherches ont cherché à développer des procédés de captage et de valorisation de gaz et fumées d'origine industrielle riches en CO₂ via l'utilisation de microalgues afin de produire des molécules d'intérêt ou des biocarburants. Les recherches ont également porté sur l'influence de molécules traces contenues dans les gaz industriels comme les oxydes de soufre et d'azote. Ces derniers n'ont pas forcément un effet néfaste sur la croissance des microalgues du fait qu'ils peuvent constituer

une source supplémentaire d'azote et de soufre, en fonction du type de souche. En revanche, à haute concentration, ils entraînent l'acidification du milieu de culture. Aussi, suivant leurs concentrations, leurs effets peuvent être très variables sur la culture [31]. L'impact de la présence de métaux dans les fumées est peu connu, en particulier quand le nombre de métaux différents est élevé.

De nombreuses initiatives existent de par le monde, associant culture de microalgues et recyclage de CO₂ d'origine industrielle. La société israélienne Seabiotic a été fondée en 2003 pour cultiver des microalgues en raceway ouverts alimentés par du CO₂ provenant de la centrale à charbon toute proche d'Ashkelon, d'une puissance de 500 MW et qui produit par jour 10 000 tonnes de CO₂. L'espèce de microalgues cultivée est la souche *Nannochloropsis sp.* Cette souche s'est avérée être l'une des souches les mieux adaptées, ainsi que certaines diatomées, aux gaz produits par la centrale. Le projet de la société allemande de production électrique RWE lancé en novembre 2008 pour une durée de trois ans consistait à métaboliser le CO₂ contenu dans des gaz de combustion provenant de la centrale au charbon de Niederaußem (Bergheim) d'une puissance de 350 MW. La transformation du CO₂ est réalisée au sein de 1 720 photobioréacteurs fermés de type « sac » (technologie fournie par la société Novagreen Projektmanagement GmbH) installés dans une serre d'une surface de 600 m² et totalisant un volume de culture de 52 m³. Ces photobioréacteurs sont alimentés en gaz de combustion préalablement séchés via une canalisation de 750 m de long. La production est environ de 6 tonnes par an de matière sèche correspondant à une fixation de CO₂ de 12 tonnes. Entre 2009 et 2012, au sein de la cimenterie du groupe Secil située à Pataias, au Portugal, la société A4F du groupe Necton S.A. a installé et exploité une unité pilote alimentée par le gaz de la cimenterie puis, fort des résultats obtenus, a construit en 2012 une grande unité de 1 100 m³ de PBR tubulaires dans le but de produire des molécules à haute valeur ajoutée. En 2009, le groupe pétrolier italien ENI a testé avec une petite unité pilote la culture de microalgues alimentées par un gaz industriel riche en CO₂ issu de la raffinerie de Gela (Sicile) dans le but de produire du biodiesel. Fort des résultats obtenus, ENI a entrepris la construction d'une unité de production de microalgues comprenant des bassins de type raceway s'étendant sur une surface de 0,9 ha. En France, deux projets sont en cours d'exploitation : les projets CIMENALGUE et VASCO. Le projet CIMENALGUE cible la valorisation biologique de CO₂ d'origine industrielle en réunissant toute la chaîne de valeur technique et économique allant du captage et transport du CO₂ du site industriel sélectionné, sa dissolution dans le milieu de culture, sa métabolisation par les microalgues et la récolte (figure 4). Le projet CIMENALGUE réunit le groupe Vicat (coordinateur), le laboratoire GEPEA, le laboratoire GeM, la société AlgoSource Technologies (partenaire) avec un financement de l'ADEME. Le démonstrateur de 800 m² a été installé en 2021 dans la cimenterie Vicat de Montalieu-Vercieu (Isère). L'objectif du projet VASCO était d'étudier la valorisation du CO₂ par des microalgues dans le port de Marseille-Fos, où a été implanté un démonstrateur. Le programme VASCO est basé sur un procédé naturel sans aucune sélection des algues, ni prétraitement de l'eau ou des fumées, dans des bassins de culture sur les sites de Kem One, d'ArcelorMittal et de Solamat-Merex à Fos-sur-Mer en 2017. Les microalgues produites ont été transformées en biobrut par liquéfaction hydrothermale.

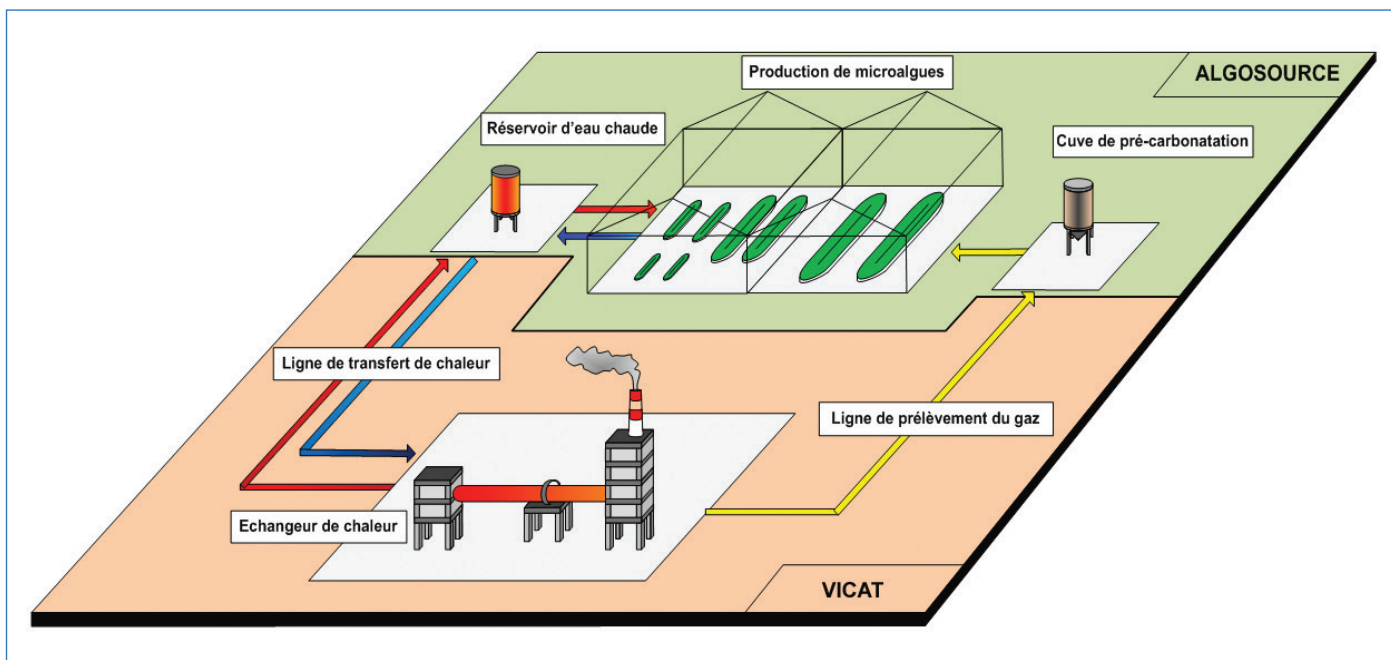


Figure 4 - Schéma du démonstrateur CIMENALGUE (source AlgoSource).

Valorisation des effluents liquides

Le traitement des eaux usées à base d'algues est connu et étudié depuis plus de 60 ans [32]. La culture d'algues dans les flux d'eaux usées permet un double effet bénéfique, puisque les eaux usées municipales et/ou industrielles municipales et/ou industrielles sont traitées et qu'une biomasse valorisable est produite simultanément. Lorsque les eaux usées sont utilisées comme source de nutriments, les voies de valorisation de la biomasse cultivée sont limitées en raison des contaminants accumulés dans les eaux usées. La faible biodisponibilité des nutriments, voire l'absence de certains d'entre eux, et la présence d'autres microorganismes – les prédateurs de type champignons et zooplancton – dans les eaux usées, peuvent limiter la productivité en biomasse.

Le traitement des eaux usées par une co-culture algues-bactéries permet d'éliminer à la fois la matière organique et l'azote et le phosphore inorganiques, ce qui nécessite ainsi une unique étape de traitement, réduisant donc la complexité et la consommation d'énergie du procédé de traitement [33]. Les microalgues assimilent l'ammoniac (NH_3) et le phosphate (PO_4) directement pendant la croissance cellulaire. Les procédés de traitement utilisant des microalgues ont donc un taux d'émission de gaz à effet de serre plus faible. En effet, la majorité de l'azote est assimilée par les microalgues au lieu d'être convertie en oxydes d'azote. Diverses études ont fait état de l'émission négligeable de N_2O causée par les microalgues en conjonction avec les microorganismes associés dans les eaux usées [34]. La recherche sur l'élimination biologique des matières carbonées, azotées et phosphorées par les microalgues dans les effluents d'eaux usées a fait l'objet de plusieurs études avec diverses espèces de microalgues sur une large gamme d'eaux usées, y compris les effluents municipaux, agricoles, de brasserie, de raffinerie et industriels, avec des efficacités variables en termes de performance de traitement et de croissance des microalgues [35]. De nombreuses espèces de microalgues, dont *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Botryococcus*, *Phormidium*, *Limnospira* et *Chlamydomonas*, ont montré une bonne capacité de bioassimilation des nutriments, des métaux lourds, des polluants émergents et des agents pathogènes

présents dans les eaux usées [36]. Par exemple, la souche *Scenedesmus obliquus* est avérée éliminer le carbone, l'azote et le phosphore des eaux usées des porcheries [37], tandis que *Chlorella pyrenoidosa* s'est développée avec succès dans les effluents de la production laitière [38]. Les méthodes de culture des microalgues comprennent la croissance autotrophique, hétérotrophique et mixotrophique. Les microalgues peuvent minimiser le risque d'eutrophisation en éliminant les composants P et N, et peuvent être considérées comme des alternatives multifonctionnelles pour le traitement biologique, en transformant les ingrédients inorganiques et organiques indésirables en biomasse valorisée, tout en épurant l'eau ensuite utilisable pour de l'irrigation.

Une autre stratégie prometteuse est la co-culture de microalgues avec d'autres microbes pour améliorer l'efficacité du traitement des eaux usées. Les microalgues mixotrophes sont utilisées dans le processus de traitement des eaux usées en raison de leur capacité à utiliser des sources de carbone organiques et inorganiques pour leur croissance, ainsi que de l'azote et du phosphore inorganiques. Cela permet de réduire la concentration de ces composés dans l'eau. Les microalgues interagissent de manière symbiotique avec des microorganismes hétérotrophes tels que les levures, les bactéries et les champignons, ce qui entraîne l'échange de nutriments et de métabolites qui, à leur tour, augmentent le rendement de la biomasse d'algues et l'efficacité du procédé. La photosynthèse des microalgues produit de l'oxygène, indispensable aux bactéries hétérotrophes pour biodégrader les composés carbonés des eaux usées [39]. Le processus de respiration dans les cellules bactériennes permet d'obtenir des métabolites secondaires et du carbone inorganique indispensables à la prolifération des algues. Les souches de microalgues peuvent résister aux environnements difficiles des déchets industriels et municipaux modernes. La co-culture symbiotique entre les bactéries et les microalgues s'est avérée plus efficace que l'une ou l'autre culture seule pour éliminer la matière organique, la demande chimique en carbone (DCO) et les nutriments de l'eau [40]. L'évolution vers une bioéconomie circulaire qui repose sur la diversification des ressources a également incité

à réorganiser les procédés traditionnels de traitement des eaux usées en un modèle de bioraffinerie intégrée à faible émission de carbone, capable de s'adapter aux besoins des consommateurs.

Les algues sont déjà utilisées pour le traitement de l'eau usée à l'étranger comme aux États-Unis sur le site de Hollister, ou encore comme en Israël, au Maroc et en Australie. Un système algo-bactérien est mis en œuvre dans des chenaux à haut rendement algaux (ou HRAP, pour *high rate algae ponds*). Ces dispositifs sont en revanche très extensifs, destinés à des climats semi-arides. Des entreprises et organismes de recherche publics étrangers travaillent également sur le sujet de la culture des algues sur l'eau usée, comme Algevolve (États-Unis), Algae entreprise (Australie), le projet de Christchurch (Australie, avec Solray, Niwa et FRST) ou le projet d'All Gas (Espagne, avec FCC Aqualia, BDI, Hygear, l'Université de Southampton, Fraunhofer, Volkswagen) qui est basé sur des procédés rustiques avec une valorisation en méthane de la biomasse produite.

Microalgues et économie circulaire

La production de microalgues est souvent considérée comme un exemple d'économie circulaire en raison de ses nombreux avantages environnementaux et économiques. Tout d'abord, la production de microalgues peut être réalisée à partir de ressources renouvelables, telles que la lumière du soleil et les nutriments présents dans les eaux usées ou les déchets organiques. Cela permet de réduire la dépendance aux ressources non renouvelables, tout en valorisant des ressources qui seraient autrement gaspillées. De plus, la culture de microalgues peut être réalisée dans des milieux clos, tels que des photobioréacteurs ou des étangs artificiels. Cela signifie qu'elle peut être réalisée sur des terres peu fertiles ou non utilisées, n'entrant pas en concurrence avec l'agriculture alimentaire. Les microalgues peuvent également être cultivées en combinaison d'autres systèmes biologiques, comme les bassins d'élevage de poissons, où elles jouent un rôle crucial dans le maintien de la qualité de l'eau en absorbant les nutriments en excès et en produisant de l'oxygène. Cela permet de réduire les besoins en filtration mécanique et chimique, ainsi que les risques de prolifération d'algues nuisibles.

En termes économiques, la production de microalgues présente plusieurs avantages. En premier lieu, les microalgues peuvent être utilisées comme matière première pour la production de nombreux produits d'intérêt, tels que les biocarburants, les ingrédients alimentaires, les produits cosmétiques et les compléments alimentaires : cela ouvre de nouvelles opportunités commerciales et réduit la dépendance aux matières premières fossiles. De plus, la production de microalgues peut créer des emplois locaux et favoriser le développement économique des régions rurales ou en difficulté comme les régions semi-arides par exemple. La rentabilité de cette activité peut être renforcée par l'utilisation conjointe des eaux usées des exploitations agricoles ou d'autres industries, réduisant ainsi les coûts liés à l'épuration de ces eaux. Enfin, la production de microalgues présente également des avantages environnementaux. Les microalgues absorbent le dioxyde de carbone (CO₂) lors de leur croissance, ce qui contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à lutter contre le changement climatique. De plus, elles peuvent également absorber d'autres polluants, tels que

les métaux lourds ou les nitrates, contribuant ainsi à la dépollution de l'eau et de l'air. En conclusion, la production de microalgues offre de nombreux avantages en termes d'économie circulaire, en utilisant des ressources renouvelables, en valorisant les déchets, en créant des emplois et en élargissant également les zones exploitables par l'homme, tout en réduisant l'empreinte environnementale. Elle constitue donc un exemple prometteur de transition vers une économie plus durable et circulaire.

Potentiel applicatif des microalgues

Comme pour toute bioressource végétale, la production de microalgues peut être exploitée à des fins commerciales, notamment dans l'industrie alimentaire, l'industrie pharmaceutique et la production de biocarburants. Les algues sont une source riche en éléments nutritifs tels que les protéines, les acides gras oméga-3, les vitamines et les minéraux, ce qui en fait un aliment précieux pour l'homme et les animaux. En outre, les algues sont capables d'absorber le dioxyde de carbone de l'atmosphère et de filtrer les polluants de l'eau, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique et à la préservation de la qualité de l'eau. La photosynthèse et la production de microalgues sont des processus essentiels à la vie sur Terre, offrant des avantages à la fois écologiques et économiques. Il est important de continuer à étudier et à exploiter ces procédés dans une perspective de développement durable pour répondre aux besoins croissants de la population mondiale, tout en préservant notre environnement. L'économie circulaire comme nouveau mode de production est une opportunité pour le développement de la culture des microalgues grâce à ses capacités de traiter des effluents gazeux et liquides tout en produisant des molécules d'intérêt pour différentes applications.

- [1] N.T. Eriksen, The technology of microalgal culturing, *Biotechnol. Lett.*, **2008**, *30*, p. 1525-36.
- [2] O. Pulz, W. Gross, Valuable products from biotechnology of microalgae, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **2004**, *65*, p. 635-648.
- [3] J. Rumin, R. Gonçalves de Oliveira Jr, J.-B. Bérard, L. Picot, Improving microalgae research and marketing in the european atlantic area: Analysis of major gaps and barriers limiting sector development, *Mar. Drugs*, **2021**, *19*, 319.
- [4] P. Spolaore, C. Joannis-Cassan, E. Duran, A. Isambert, Commercial applications of microalgae, *J. Biosc. Bioeng.*, **2006**, *101*(2), p. 87-96.
- [5] A. Udayan, A.K. Pandey, P. Sharma, N. Sreekumar, S. Kumar, Emerging industrial applications of microalgae: Challenges and future perspectives, *Syst. Microbiol. Biomanufact.*, **2021**, *1*, p. 411-431.
- [6] A.K. Koyande *et al.*, Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans, *Food Sc. Hum. Wel.*, **2019**, *8*(1), p. 16-24.
- [7] J. Legrand, A. Artu, J. Pruvost, A review on photobioreactor design and modelling for microalgae production, *React. Chem. & Eng.*, **2021**, *6*, p. 1134-51.
- [8] L.J. Borowitzka, M.A. Borowitzka, β -Carotene (Provitamin A) production with algae, in: *Biotechnology of Vitamins, Pigments and Growth Factors*, **1989**, p. 15-26.
- [9] W. J. Oswald, C.G. Goleuke, Large-scale production of algae, PB-296411, **1967**.
- [10] J. Doucha, K. Lívanský, Novel outdoor thin-layer high density microalgal culture system: Productivity and operational parameters, *Algological Studies/Archiv für Hydrobiologie*, **1995**, *Sup. Vol.*, p. 129-147.
- [11] J. Pruvost, F. Le Borgne, A. Artu, J. Legrand, Development of a thin-film solar photobioreactor with high biomass volumetric productivity (AlgoFilm[®]) based on process intensification principles, *Algal. Res.*, **2017**, *21*, p. 120-137.
- [12] O. Bernard, B. Rémond, Validation of a simple model accounting for light and temperature effect on microalgal growth, *Bioresour. Technol.*, **2012**, *123*, p. 520-527.
- [13] M. Ras, J.-P. Steyer, O. Bernard, Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production, *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, **2013**, *12*, p. 153-164.
- [14] G. Torzillo, A. Vonshak, Effect of light and temperature on the photosynthetic activity of the cyanobacterium *spirulina platensis*, *Biomass & Bioen.*, **1994**, *6*(5), p. 399-403.

- [15] J. C. Ogbonna, H. Tanaka, Night biomass loss and changes in biochemical composition of cells during light/dark cyclic culture of *Chlorella pyrenoidosa*, *J. Ferm. Bioengin.*, **1996**, 82(6), p. 558-564.
- [16] F. Le Borgne, J. Pruvost, Investigation and modeling of biomass decay rate in the dark and its potential influence on net productivity of solar photobioreactors for microalga *Chlamydomonas reinhardtii* and cyanobacterium *Arthrospira platensis*, *Biores. Techn.*, **2013**, 138, p. 271-276.
- [17] J. Legrand, *Photobioreaction engineering*, **2016**, Academic Press Inc., Amsterdam Boston Heidelberg.
- [18] J. Pruvost, J.-F. Cornet, V. Goetz, J. Legrand, Modeling dynamic functioning of rectangular photobioreactors in solar conditions, *AIChE J.*, **2011**, 57, p. 1947-60.
- [19] C.-G. Lee, Calculation of light penetration depth in photobioreactors. biotechnology and bioprocess engineering, *Biotechn. Bioprocess Engin.*, **1999**, 4(1), p. 78-81.
- [20] J.-F. Cornet, C.G. Dussap, J.-B. Gros, C. Binois, C. Lasseur, A simplified monodimensional approach for modeling coupling between radiant light transfer and growth kinetics in photobioreactors, *Chem. Engin. Sc.*, **1995**, 50(9), p. 1489-1500.
- [21] J. Pruvost, J.-F. Cornet, J. Legrand, Hydrodynamics influence on light conversion in photobioreactors: an energetically consistent analysis, *Chem. Engin. Sc.*, **2008**, 63(14), p. 3679-94.
- [22] J.-F. Cornet, C.G. Dussap, A simple and reliable formula for assessment of maximum volumetric productivities in photobioreactors, *Biotechn. Prog.*, **2009**, 25, p. 424-435.
- [23] J. Pruvost, J.-F. Cornet, Knowledge models for engineering and optimization of photobioreactors, *Microalgal Biotech.*, **2012**, p. 181-224.
- [24] W. Zhou *et al.*, Biomitigation of carbon dioxide using microalgal systems: advances and perspectives, *Renew. Sustain. Eng. Rev.*, **2017**, 76, p. 1163-75.
- [25] J.R. Coleman, The molecular and biochemical analyses of CO₂-concentrating mechanisms in cyanobacteria and microalgae, *Pl. Cell & Env.*, **1991**, 14(8), p. 861-867.
- [26] S. Miyachi, M. Tsuzuki, S.T. Avramova, Utilization modes of inorganic carbon for photosynthesis in various species of *Chlorella*, *Plant Cell Physiol.*, **1983**, 24(3), p. 441-451.
- [27] S.R. Chia *et al.*, CO₂ mitigation and phycoremediation of industrial flue gas and wastewater via microalgae-bacteria consortium: possibilities and challenges, *Chem. Eng. J.*, **2021**, 425, 131436.
- [28] Z. Wang *et al.*, CO₂ gradient domestication produces gene mutation centered on cellular light response for efficient growth of microalgae in 15% CO₂ from flue gas, *Chem. Eng. J.*, **2022**, 429, 131968.
- [29] E.M. Valdovinos-García *et al.*, Techno-economic study of CO₂ capture of a thermoelectric plant using microalgae (*Chlorella vulgaris*) for production of feedstock for bioenergy, *Energies*, **2020**, 13(2), 413, p. 1-19.
- [30] F.V. Bekun, A.A. Alola, S.A. Sarkodie, Toward a sustainable environment: nexus between CO₂ emissions, resource rent, renewable and nonrenewable energy in 16-EU countries, *Sci. Total Environ.*, **2019**, 657, p. 1023-29.
- [31] C.-Y. Kao *et al.*, Utilization of carbon dioxide in industrial flue gases for the cultivation of microalga *Chlorella sp.*, *Biore Techn.*, **2014**, 166, p. 485-493.
- [32] W.J. Oswald, H.B. Gotaas, Photosynthesis in sewage treatment, *Trans. Am. Soc. Civil. Eng.*, **1957**, 122, p. 73-97.
- [33] L. Gouveia *et al.*, Microalgae biomass production using wastewater: treatment and costs scale-up considerations. *Algal Res.*, **2016**, 16, p. 167-176.
- [34] K.D. Fagerstone, J.C. Quinn, T.H. Bradley, S.K. De Long, A.J. Marchese, Quantitative measurement of direct nitrous oxide emissions from microalgae cultivation, *Environ. Sci. Technol.*, **2011**, 45, p. 9449-56.
- [35] Y.-H. Wu *et al.*, Microalgal species for sustainable biomass/lipid production using wastewater as resource: a review. *Renew. Sust. Energy Rev.*, **2014**, 33, p. 675-688.
- [36] A. Lopez-Sanchez *et al.*, Microalgae-based livestock wastewater treatment (MbWT) as a circular bioeconomy approach: enhancement of biomass productivity, pollutant removal and high-value compound production, *J. Environ. Manag.*, **2022**, 308, 114612.
- [37] M. Ji *et al.*, Removal of nitrogen and phosphorus from piggery wastewater effluent using the green microalga *Scenedesmus obliquus*, *J. Environ. Eng.*, **2013**, 139, p. 1198-1205.
- [38] R. Kothari, V.V. Pathak, V.Kumar, D.P. Singh, Experimental study for growth potential of unicellular alga *Chlorella pyrenoidosa* on dairy waste water: an integrated approach for treatment and biofuel production, *Bioresour. Technol.*, **2012**, 116, p. 466-470.
- [39] S.A. Razzak, S.A.M. Ali, M.M. Hossain, H. deLasa, Biological CO₂ fixation with production of microalgae in wastewater—a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **2017**, 76, p. 379-390.
- [40] K. Verma, P.K. Kumar, S.V. Krisna, V. Himabindu, Phycoremediation of sewage-contaminated lake water using microalgae-bacteria co-culture, *Wat. Air Soil Pollut.*, **2020**, 237, p. 1-16.

Jack LEGRAND*, professeur émérite, et **Jérémy PRUVOST**, professeur, Laboratoire GEPEA (Génie des procédés Environnement-Agroalimentaire), UMR 6144, Oniris, CNRS, Nantes Université, Saint-Nazaire.

*jack.legrand@univ-nantes.fr

GFSM 2025
NANO-CHEMISTRY, HYBRID MATERIALS &
MOLECULAR CHEMISTRY

April 22
2024

Open Doors:
14:00

GFSM GROUPE FRANCOPHONE DE
SPECTROMETRIE MOSSBAUER

UCLouvain

IMP PAN
GDANSK

fnrs
LA LIBERTÉ DE CHERCHER

Le 22 avril 2024. Plus d'informations : <https://gfsm2025.homesteadcloud.com>