

## La Culture de *Spirulina* en Photobioreacteur

Nous avons vu que *Spirulina platensis* (photo) pouvait produire de l'oxygène avec un bon rendement énergétique et présentait également des qualités nutritionnelles qui en font un excellent candidat pour la régénération de l'atmosphère d'un [écosystème clos artificiel](#). Il faut pour cela être capable de produire rapidement une grande quantité d'oxygène, donc de pouvoir cultiver le micro-organisme en masse dans des conditions si possible optimales.

Cette préoccupation est identique à celle des industriels qui utilisent *Spirulina*, d'autres cyanobactéries, ou des micro-algues pour produire des métabolites à haute valeur ajoutée comme les pigments, les antioxydants, les polysaccharides, des acides gras essentiels ; pour réaliser des opérations de dépollution (métaux lourds, fixation de CO<sub>2</sub>), voire pour produire de l'hydrogène.

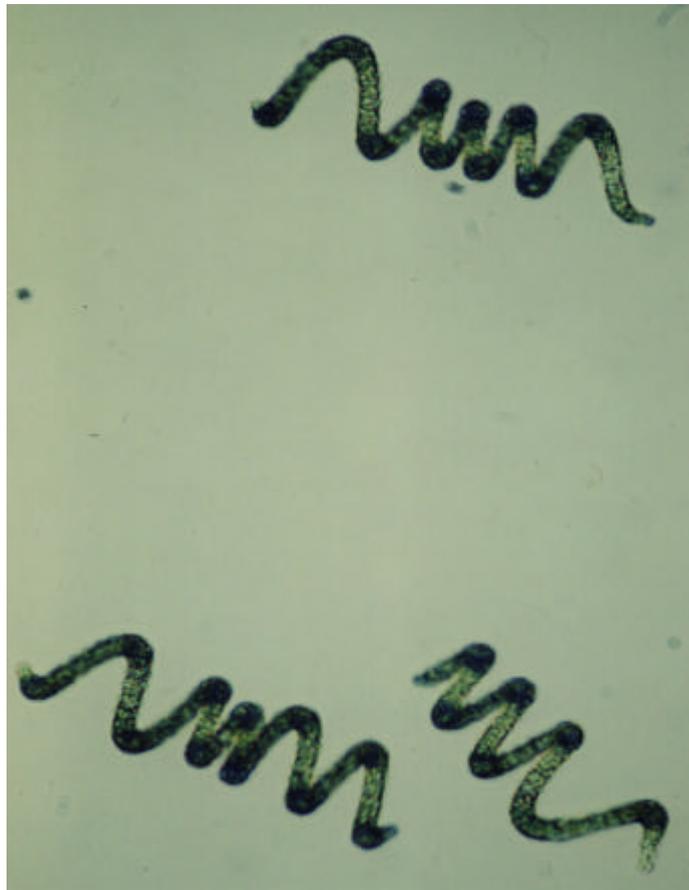


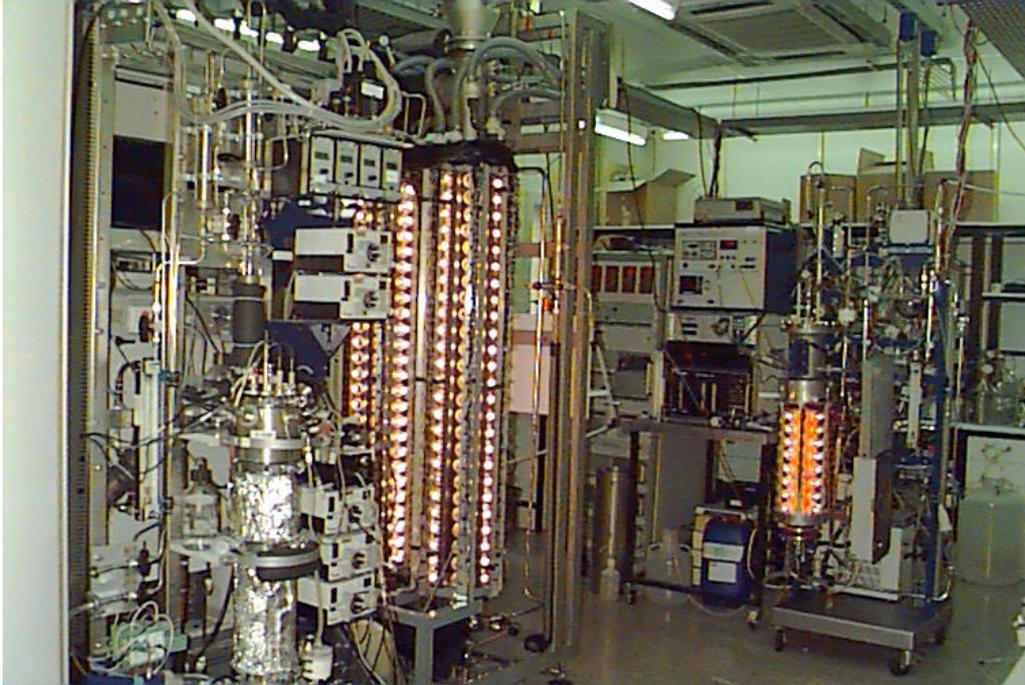
Photo Roland Boyer - CNRS

*Arthrospira (Spirulina) platensis* PCC 8005

Lorsque l'on souhaite contrôler la culture d'un micro-organisme pour réaliser une transformation biologique de la matière, que ce soit dans un écosystème clos artificiel ou à des fins industrielles, on travaille généralement dans un bioréacteur. C'est la version biologique du réacteur chimique, enceinte fermée dans laquelle on peut contrôler les principaux paramètres influençant la culture. Dans le cas particulier d'un micro-organisme photosynthétique, il faut éclairer le réacteur pour que la croissance ait lieu, soit par l'extérieur à travers la paroi (énergie solaire ou lampes), soit directement dans le réacteur (lampes). Nous

verrons plus loin qu'il s'agit là d'un point fondamental car un photobioréacteur fonctionne quasiment toujours en condition de limitation physique par le transfert d'énergie lumineuse.

## Les Photobioréacteurs Contrôlés



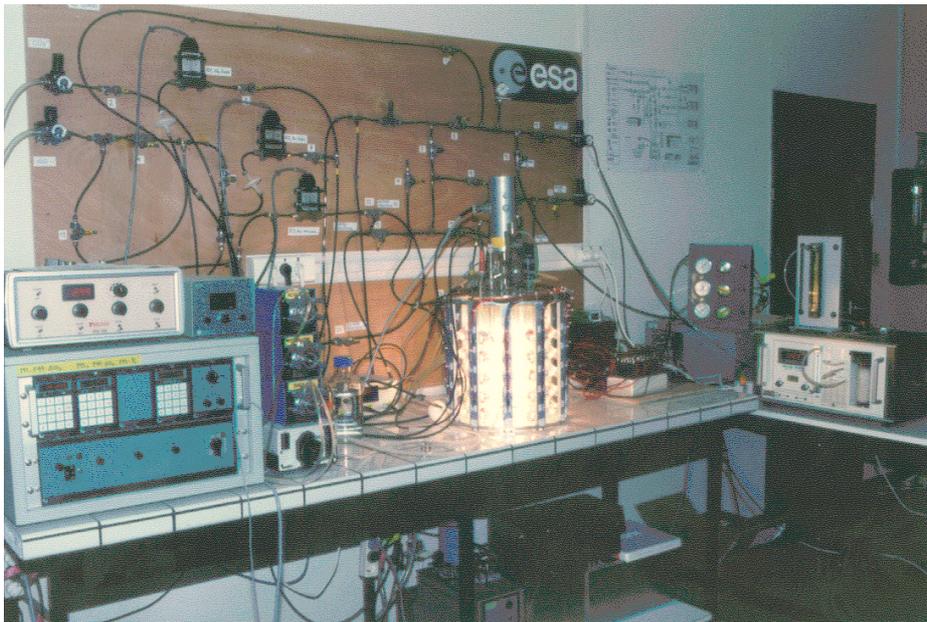
**Hall pilote MELiSSA du laboratoire de Génie Chimique de l'Université Autonome de Barcelone (Espagne). On peut voir deux photobioréacteurs, l'un (au premier plan) de 75 litres utiles cultivant *Spirulina platensis*, l'autre de 7 litres utiles (au second plan) cultivant *Rhodospirillum rubrum*.**

L'utilisation d'un bioréacteur contrôlé permet avant tout autre avantage de maintenir la stérilité de la culture ; c'est à dire que l'on évite ainsi la contamination du réacteur par une autre souche que celle que l'on désire cultiver. En effet, il existe de très nombreuses souches de bactéries naturellement présentes dans notre environnement (inoffensives ou pathogènes) qui pourraient se développer dans le milieu de culture utilisé par la souche que l'on produit, occasionnant de graves dysfonctionnements. Pour se prémunir, on stérilise le bioréacteur et son milieu de culture (le milieu nutritif contenant tous les éléments nécessaires à la croissance) avant d'y introduire l'inoculum (la quantité initiale de cellules de la souche à cultiver). La meilleure solution est généralement une stérilisation par la chaleur (on utilise de la vapeur à 121°C pendant au moins 20 min). Il faut ensuite bien veiller à garder cette stérilité chaque fois que l'on désire introduire quelque chose dans le bioréacteur.

Deux autres paramètres extrêmement variables et donc importants, mais qui sont en général surveillés sont le pH et la température. En effet, un micro-organisme donné fonctionne de façon optimale (croissance la plus rapide) dans des limites de pH et de température assez étroites (dépendant le plus souvent des conditions de son milieu naturel) : le maintien de la valeur de ces paramètres est nécessaire, ce qui exige des mécanismes régulateurs. On utilise toujours pour cela un capteur et un actionneur. Le capteur mesure la grandeur que l'on souhaite réguler (la température ou le pH), et l'actionneur permet d'agir pour corriger un éventuel écart observé avec une consigne (respectivement une électrovanne laissant circuler un liquide chaud ou froid, ou une pompe envoyant un acide ou une base).

L'actionneur est commandé par un régulateur dans lequel on implante une loi de commande plus ou moins complexe qui permet de gérer l'écart observé entre la mesure du paramètre et sa consigne.

L'agitation est également un paramètre important sur un bioréacteur, car il faut s'assurer qu'il existe un brassage suffisant des cellules et du milieu de culture de façon à éviter l'existence de gradients de concentration ou de zones peu agitées qui ne fonctionneraient pas de façon optimale dans le réacteur. A contrario, une agitation trop importante n'est pas forcément supportée par les micro-organismes, surtout s'ils sont pluricellulaires comme beaucoup de cyanobactéries ou de micro-algues. Il existe plusieurs façons d'agiter un réacteur ; les réacteurs dits agités peuvent l'être par des moyens mécaniques (différents types de mobiles d'agitation sont mus par un moteur), ou pneumatiques (par injection de gaz). Il existe aussi des réacteurs tubulaires dans lesquels l'agitation est essentiellement assurée par la turbulence de l'écoulement. L'agitation est également un facteur très important influençant fortement l'efficacité du transfert gaz-liquide au sein du réacteur. Ce point est crucial lorsque l'on veut échanger de la matière entre ces deux phases, comme c'est le cas pour un photobioréacteur régénérateur d'atmosphère dans lequel on souhaite échanger  $\text{CO}_2$  contre de l'oxygène produit par photosynthèse ([projet BIORAT](#)).

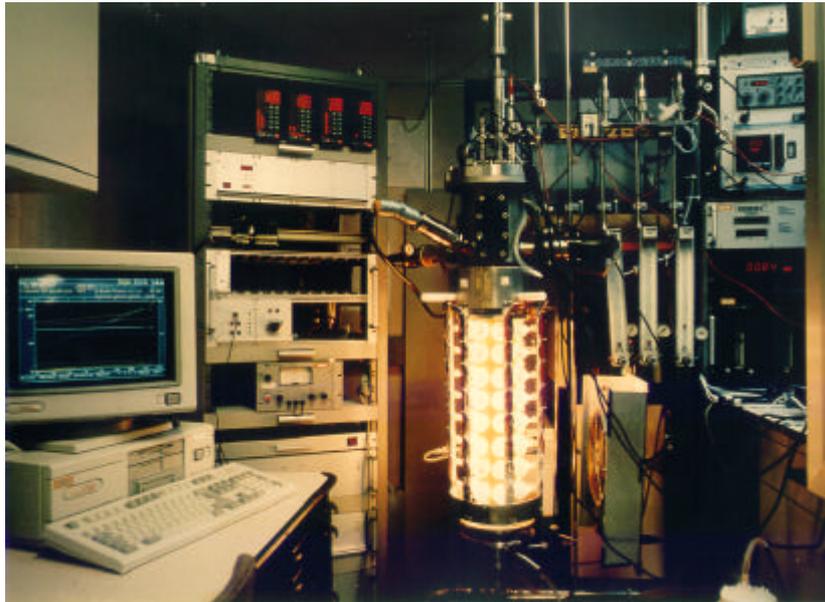


**Photobioréacteur pilote du Laboratoire de Génie Chimique et Biochimique de l'Université Blaise Pascal d'un volume utile de 5 litres cultivant *Spirulina platensis*.**

Les racks électroniques sur la gauche servent au contrôle du pH, de la température et de la vitesse d'agitation. Sur le mur apparaissent les tuyaux du circuit de gaz et les régulateurs de débit, ce qui permet d'alimenter le réacteur avec des proportions  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  données. Tout à droite de la photo, on peut voir un analyseur de gaz qui mesure les teneurs en  $\text{O}_2$  et  $\text{CO}_2$  en sortie de réacteur. Enfin, juste sur la droite du réacteur apparaît l'alimentation stabilisée et le système de contrôle de l'intensité lumineuse incidente (sur cette expérience,  $I_0 = 250 \text{ W/m}^2$  environ, ce qui correspond à un plein soleil au mois d'août !)

Enfin, sur un photobioréacteur, il est important de connaître et de contrôler l'intensité lumineuse incidente sur le réacteur, car elle est à la base de la vitesse de production de la biomasse ou de l'oxygène.

Il existe deux grands types de fonctionnement pour un réacteur. Soit il s'agit d'un réacteur fonctionnant en discontinu, c'est à dire que l'on met au départ une quantité de nutriments définie dans le milieu ainsi que l'inoculum, et que l'on laisse croître la biomasse (sa concentration augmente dans le temps en même temps que diminuent les concentrations en nutriments) jusqu'à ce qu'elle épuise un constituant, ce qui termine la culture (et l'on doit nettoyer le réacteur pour démarrer un autre cycle).



**Photobioréacteur du centre technique de l'Agence Spatiale Européenne (ESTEC) à Noordwijk (Pays Bas) dans lequel on cultive *Spirulina platensis* en discontinu. En effet on ne voit ici aucun réservoir de milieu frais pour alimenter le réacteur : le milieu a été mis une fois pour toute au départ et le réacteur est entièrement fermé jusqu'à son épuisement.**

Soit le réacteur fonctionne en continu, c'est à dire que l'on alimente en permanence le réacteur avec du milieu frais, et que l'on suture la biomasse produite avec le même débit (pour garder constant le volume du réacteur). Dans ce dernier cas, il faut calculer le débit pour que la croissance se fasse pendant le temps de séjour dans le réacteur (on parle de régime permanent car alors aucune concentration dans le réacteur ne varie dans le temps) ; c'est à dire que l'on équilibre rigoureusement deux phénomènes dynamiques en égalant le temps caractéristique du lessivage du réacteur par le milieu frais au temps caractéristique de la vitesse de croissance du micro-organisme.



**Deux photobioréacteurs fonctionnant en continu (on peut voir les bidons d'alimentation en milieu frais et de récolte de la biomasse posés par terre). Dans celui de gauche (ESTEC, Noordwijk) on cultive *Spirulina platensis* ; dans celui de droite (LGCB, Université Blaise Pascal) on cultive *Rhodospirillum rubrum*.**

## Les Photobioréacteurs ont des Performances Techniques Limitées !

### La lumière est absorbée et diffusée

Comme cela a déjà été évoqué, la caractéristique principale d'un photobioréacteur est qu'il doit être éclairé par un rayonnement visible (les micro-organismes photosynthétiques utilisent classiquement le rayonnement entre 350 et 700 nm, voir jusqu'à 1000 nm pour certains). Quelle que soit la méthode choisie pour éclairer le réacteur (de l'extérieur ou à l'intérieur), l'intensité lumineuse va très rapidement décroître au sein du volume réactionnel, à partir de la source lumineuse, en raison du phénomène d'absorption de la lumière par les pigments photosynthétiques des micro-organismes. En réalité, il faut également tenir compte du phénomène de diffusion de la lumière par les cellules, mais la lumière diffusée d'une direction réapparaît sur une autre direction (où elle sera soit absorbée, soit rediffusée), alors que la lumière absorbée par les pigments va être utilisée comme source d'énergie pour réaliser la photosynthèse des constituants cellulaires. Seule une partie du rayonnement absorbé sera transformée en énergie chimique, l'autre partie étant essentiellement transformée en chaleur, ce qui est à la base de la notion de rendement énergétique de la photosynthèse dont nous dirons un mot plus loin.

### Il faut raisonner à l'échelle d'une population de cellules !

L'existence de gradients de lumière dans le photoréacteur (non homogénéité de la lumière disponible au sein du volume réactionnel, en raison de son absorption par les cellules) est le problème majeur qui intervient à la fois dans la compréhension de la culture en masse de micro-organismes photosynthétiques, mais aussi pour la conception de photoréacteurs technologiquement efficaces. Sur un bioréacteur, on raisonne plutôt en masse (caractérisée par le poids sec de biomasse que l'on mesure dans un litre de culture) qu'à l'échelle cellulaire (on

peut avoir jusqu'à 10000 milliards de cellules dans un litre !). Dans le réacteur, l'agitation conduit à un brassage régulier des cellules qui passent donc alternativement dans des zones plus ou moins bien éclairées en raison du phénomène d'absorption. Plutôt que d'essayer de comprendre ce qui se passe à l'échelle cellulaire (comme si l'on chevauchait une cellule qui se déplace dans le réacteur), on suppose que le métabolisme des cellules peut s'adapter suffisamment vite à ces modifications d'environnement pour qu'il suffise de s'intéresser de façon figée à cet environnement et à lui seul. Cela signifie que si l'on est capable de calculer les profils de lumière dans le réacteur, on sera capable de prévoir ses performances (vitesses de production de la biomasse et de l'oxygène par exemple).

L'atténuation importante de la lumière par les cellules à partir de la source lumineuse ( $I_0$ ) peut alors donner lieu à 2 comportements très différents pour le fonctionnement global du photoréacteur :

- **Soit la concentration en cellules est faible ou l'intensité incidente importante.**

Dans ce cas, l'énergie lumineuse est en excès et si l'on considère un photoréacteur rectangulaire éclairé d'un côté ( $I_0$ ), on peut mesurer sur l'autre face une intensité transmise non nulle  $I_T$  qui représente l'énergie en trop, perdue pour le procédé. On appelle densité

optique le rapport  $DO = \log_{10} \left( \frac{I_0}{I_T} \right)$ . Dans ce cas, toutes les cellules du réacteur disposent de

lumière et on ne pourra calculer la vitesse moyenne de production de la biomasse (en grammes de biomasse produite par litre de milieu et par heure) qu'en faisant la moyenne de toutes les vitesses respectives le long du profil d'atténuation de la lumière. En effet, sur un photoréacteur, lorsque l'on mesure expérimentalement une vitesse de production (en faisant des prélèvements successifs de biomasse produite par exemple), on obtient toujours une moyenne de chaque vitesse présente le long du profil de lumière, étant entendu que plus l'intensité lumineuse est grande, plus la vitesse de croissance est élevée. Ce type de situation où l'énergie lumineuse est en excès et où toutes les cellules fonctionnent en photosynthèse est appelé **régime cinétique**. On le rencontre très rarement dans la plupart des applications !

- **Soit la concentration en biomasse est élevée, ou bien l'épaisseur de la culture suffisamment grande.**

**Première limitation technologique : l'intensité lumineuse incidente :**

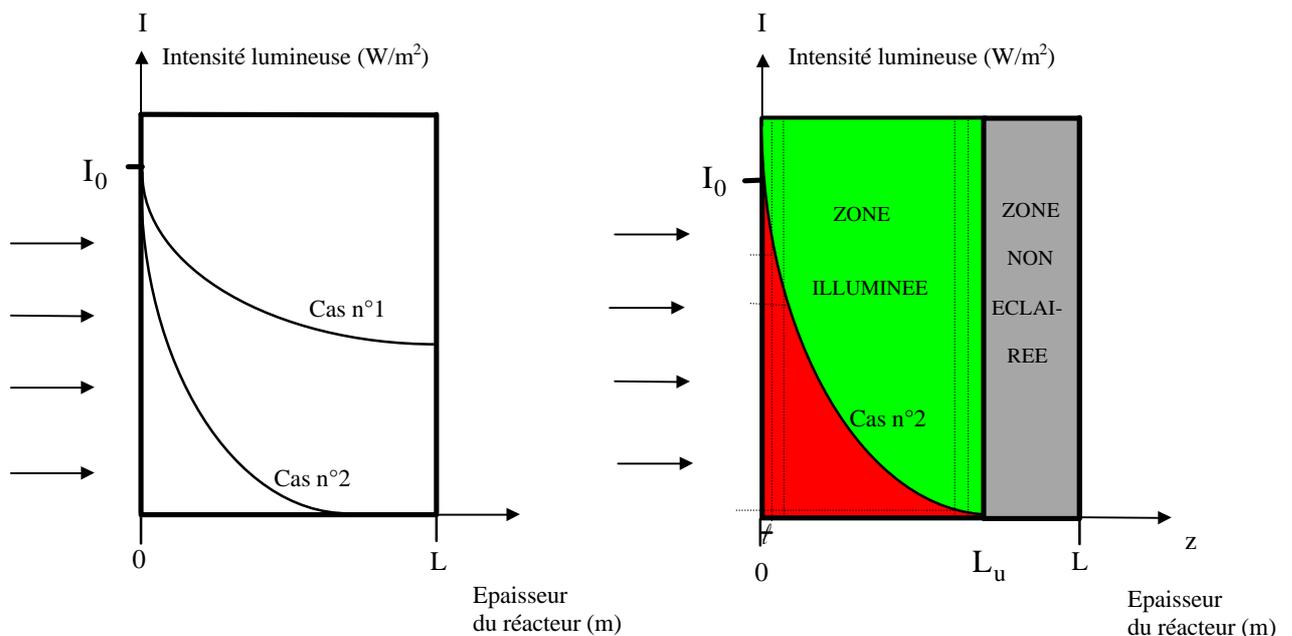
Dans ce cas, toute la lumière incidente  $I_0$  est absorbée dans le réacteur et il ne ressort aucun rayonnement inutilisé ( $I_T = 0$ ). Cette situation correspond à l'existence d'un volume sombre plus ou moins important dans le réacteur, qui se comporte comme un volume mort. C'est le cas le plus couramment rencontré et l'on dit alors que le photoréacteur fonctionne en **limitation physique par le transfert d'énergie lumineuse**. Comme l'intensité lumineuse transmise à la sortie du réacteur est nulle, on ne peut plus définir de densité optique sur le réacteur (elle serait infinie !), mais l'on peut toujours définir une DO correspondant au volume éclairé utile du photoréacteur. Si l'on considère que la photosynthèse n'est plus opérationnelle à partir d'environ  $I_{min} = 1 \text{ W/m}^2$ , on trouve

$DO_{\text{limitation physique}} = \log \left( \frac{I_0}{I_{min}} \right) \cong \log(I_0)$ . Cette simple relation montre qu'en condition de

limitation physique, la vitesse de production du réacteur est constante et proportionnelle au logarithme de l'intensité lumineuse incidente  $I_0$  (donc si l'on peut augmenter cette intensité, on améliorera les performances du réacteur).

### Deuxième limitation technologique : la surface spécifique éclairée :

La deuxième grandeur très importante caractérisant la limitation physique est la surface spécifique éclairée du photoréacteur. On appelle surface spécifique éclairée  $a$  le rapport de la surface éclairée (en  $m^2$ ) divisé par le volume total du réacteur (en  $m^3$ ). Pour un réacteur rectangulaire éclairé d'un côté,  $a$  est tout simplement égale à l'inverse de l'épaisseur du réacteur  $a = \frac{S_{\text{éclairée}}}{V_{\text{total}}} = \frac{1}{e} \text{ m}^2/\text{m}^3$ . On voit donc que plus le réacteur est mince, plus grande sera son efficacité. Pour remédier à ce problème de conception, la nature a développé la feuille des arbres, très fine présentant une surface spécifique de 2 à 3000  $m^2/m^3$ , là où les meilleurs photoréacteurs arrivent entre 10 et 100  $m^2/m^3$  ! On devra beaucoup travailler sur la technologie des réacteurs pour arriver à imiter les performances de la nature sans immobiliser des surfaces de culture énormes. Tout cela nous montre que la compréhension et l'optimisation des photoréacteurs est essentiellement un problème technologique puisque lorsque l'on est en limitation physique (ce qui représente la quasi totalité des cas pratiques), on ne peut améliorer les performances qu'en augmentant  $I_0$  (le rendement des lampes,...) ou  $a$ , la surface spécifique éclairée (conception du réacteur). Il faut noter que cette problématique est une constante de l'industrie de transformation de la matière.



*Illustration des deux cas limite de fonctionnement d'un photobioréacteur. On s'intéresse au cas simple d'un réacteur rectangulaire éclairé d'un côté par une intensité incidente  $I_0$ . Sur la figure de gauche sont symbolisés les profils de lumière dans le cas d'excès de lumière (cas n°1, régime cinétique), et dans le cas d'un manque de lumière (cas n°2, régime limité physiquement par le transfert de lumière). La seule différence entre ces deux cas est la concentration en biomasse dans le réacteur, plus élevée dans le deuxième cas. Sur la figure de droite qui correspond à la limitation physique par le transfert de lumière, on a fait apparaître la zone illuminée (longueur utile  $L_u$ ) qui participe à la croissance, et la zone sombre qui correspond à une partie inactive du réacteur.*

## La conversion de l'énergie lumineuse

Dire que la vitesse de production de la biomasse est proportionnelle à l'intensité lumineuse incidente  $I_0$  et à la surface spécifique éclairée du photoréacteur  $a$  est en réalité un peu simpliste car cette proportionnalité s'exprime à travers le rendement énergétique de conversion de l'énergie lumineuse captée, en énergie chimique emmagasinée dans la biomasse. En effet, la thermodynamique nous enseigne (notamment à travers son second principe) que toutes les formes d'énergie (mécanique, calorique, chimique, radiante,...) ne sont pas équivalentes et que leurs transformations ne se font pas avec une efficacité de 100%. Il se trouve que le rayonnement (l'énergie lumineuse dans le réacteur) est la forme la plus « noble » parmi les différentes formes d'énergie, et l'on peut s'attendre à ce que sa transformation en énergie chimique se fasse avec un assez faible rendement. En fait, ce rendement dépend lui-même de l'intensité lumineuse, car plus l'intensité est élevée, plus le rendement diminue. Cela s'explique par un effet de saturation des photosystèmes par un grand nombre de photons, dont une partie de plus en plus importante est dégradée en chaleur. Le fait que ce rendement énergétique dépende de l'intensité lumineuse qui est atténuée de façon exponentielle dans le réacteur explique pourquoi, comme nous le disions plus haut, la vitesse de production est proportionnelle à  $\log(I_0)$  et non directement à  $I_0$ . Néanmoins, le rendement énergétique de conversion que l'on peut obtenir avec des cyanobactéries du type *Spirulina* est le meilleur qui soit dans le règne végétal. Il est compris entre 5 et 15 % selon l'importance de l'intensité incidente, ce qui n'est quand même pas beaucoup ! Les micro-algues plus évoluées et les végétaux supérieurs ont développés des **régulations métaboliques** qui leur permettaient de s'adapter à un environnement pauvre en source de carbone ( $\text{CO}_2$ ), dont la limitation apparaissait plus stricte que la limitation par le transfert de lumière. La problématique de la nature était alors d'adapter leur métabolisme à cette nouvelle étape limitante, ce qui s'est fait au détriment du rendement énergétique de conversion de la lumière. Ainsi, les végétaux supérieurs affichent des rendements de conversion compris entre 2 et 5 % au maximum !

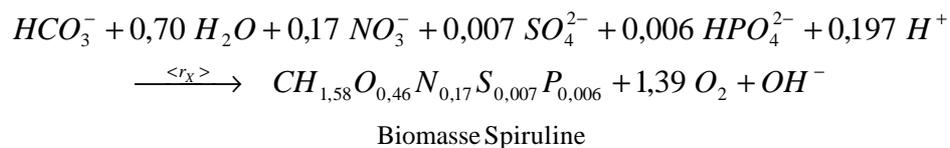
Remarquons enfin que ces rendements sont donnés sans tenir compte du rendement lié à la production du rayonnement lumineux; l'énergie solaire, gratuite, provient d'une forme d'énergie encore plus noble que le rayonnement : l'énergie nucléaire des réactions de fusion qui opèrent dans les étoiles. Si l'on utilise de la lumière artificielle comme des lampes pour éclairer le photoréacteur, on peut être intéressé par le calcul du rendement de conversion global de l'électricité en lumière puis en énergie chimique de la biomasse (en tout cas c'est une donnée primordiale pour un industriel qui envisagerait ce type de procédé). Sachant que malheureusement, on ne sait pas convertir efficacement l'électricité en rayonnement (les rendements varient de 5 à 15% selon la technologie des lampes) on arrive à une valeur désastreuse comprise entre 0,2 et 2%, même avec des spirulines !

## Modélisation Mathématique des Photobioréacteurs

L'écriture d'un modèle mathématique pour la croissance d'un micro-organisme photosynthétique cultivé en bioréacteur nécessite de connaître la vitesse de consommation et de production des principaux constituants impliqués dans la réaction biochimique (le  $\text{CO}_2$ , les minéraux, la biomasse, l'oxygène,...), puis d'être capable de relier cette vitesse calculée aux flux de matière qui entrent et qui sortent du réacteur (ou qui s'y accumulent), pour en calculer sa productivité (en grammes de produit par litre de réacteur et par heure). En général, la première étape est obtenue en associant une équation **cinétique** pour la production de la biomasse à une équation **stœchiométrique** qui relie les principaux constituants entre eux.

## - Stœchiométrie de la photosynthèse chez *Spirulina platensis*

La stœchiométrie d'une réaction chimique ou biochimique est tout simplement l'écriture d'une relation de conservation de la masse (des éléments C,H,O,N,S,P,...) lors de cette réaction (c'est un principe universel très important qui est également utilisé pour relier les courants d'entrée-sortie du réacteur entre eux). Si l'on procède à une analyse élémentaire de la biomasse séchée de *Spirulina platensis*, on peut établir une « formule chimique moyenne » pour la bactérie, à condition de ramener le calcul à une mole (ou un atome-gramme) de carbone ; on parle de formule élémentaire C-molaire. Il suffit alors d'équilibrer l'équation stœchiométrique pour obtenir les proportions qui lient les principaux constituants entre eux, ce qui donne par exemple :



Cette relation est très pratique car si l'on connaît la vitesse de production de la biomasse  $\langle r_X \rangle$  (la cinétique), on en déduira toutes les vitesses pour tous les autres constituants à partir des rendements massiques ou molaires tirés de l'équation. On peut par exemple vérifier que si l'on consomme une mole de  $CO_2$ , on produit environ 1,4 mole d'oxygène. Ce rapport de vitesses est appelé quotient photosynthétique de la réaction ( $Q_P = 1,39/1 = 1,39$ ) et joue un rôle très important dans les processus de régénération de l'atmosphère par photosynthèse (en relation avec le quotient respiratoire du consommateur, voir le projet [BIORAT](#)). L'équation stœchiométrique, équilibrée en charges, permet aussi de constater que la photosynthèse chez *Spirulina* produit des ions  $OH^-$  qui vont alcaliniser le milieu ; il faudra donc ajouter de l'acide si l'on souhaite réguler le pH.

## - vitesse de réaction moyenne $\langle r_X \rangle$ dans le photoréacteur

Comme cela a déjà été dit plus haut, les photobioréacteurs fonctionnent généralement en condition de limitation physique par le transfert de lumière. La vitesse de réaction moyenne résultante  $\langle r_X \rangle$  est donc constante, et on l'obtient, en simplifiant un peu, en multipliant le logarithme de l'intensité incidente  $\log(I_0)$  par la surface spécifique éclairée  $a$  et par le rendement énergétique de conversion  $h$ . Ce rendement peut être calculé par une approche thermodynamique dont nous ne dirons rien de plus dans ce document. La vitesse calculée ainsi est une vitesse maximale, et l'on doit prendre garde à ce que les cellules ne manquent jamais de substrats dans le réacteur, ce qui pourrait diminuer la vitesse par apparition d'une limitation. Cela peut être le cas par exemple si l'on n'arrive pas à transférer assez efficacement le  $CO_2$  à partir de la phase gazeuse (limitation physique par le transfert), ou s'il manque des nitrates dans le milieu (limitation biologique).

## - Modèles mathématiques et leur utilisation

Les différents types de photoréacteurs déjà évoqués (cuves agitées, réacteurs tubulaires, fonctionnement continu ou discontinu) peuvent alors faire l'objet d'une modélisation mathématique à partir des « briques » cinétiques et stœchiométriques précédemment évoquées. Il suffit pour cela d'écrire des bilans de matière et d'énergie sur le réacteur, et l'on pourra prévoir l'évolution des concentrations de chaque constituant, sa productivité, l'évolution de la température etc,...

Cette modélisation mathématique est très utile pour les scientifiques car elle permet de réaliser des simulations (on calcule sur un ordinateur ce que va produire le photoréacteur). Elle est également à la base du dimensionnement et de l'optimisation des photoréacteurs, lorsque l'on cherche à concevoir un équipement qui réponde à des objectifs donnés (comme produire une certaine quantité d'oxygène pour assurer le [maintien de la vie](#) à un équipage). Enfin, on s'en sert énormément lorsque l'on souhaite développer un contrôle performant du réacteur, comme c'est le cas dans les [écosystèmes clos artificiels](#). En effet, dans ces cas, on travaille « à flux tendu » et quand on détecte un changement dans la demande en oxygène du consommateur, il faut être capable de réagir immédiatement sur le photoréacteur, et de façon adaptée à la demande. On s'appuie alors sur les calculs donnés par le modèle qui peut en quelque sorte « prévoir » le devenir du système en fonction des actions possibles envisagées. On parle alors de contrôle prédictif par modèle de connaissance, et c'est cette approche qui est utilisée notamment dans les projets [MELiSSA](#) et [BIORAT](#).

## Bibliographie et Liens

**Cornet J-F. 1998.** *Les photobioréacteurs*. Le technoscope de BIOFUTUR, mars 1998, n° 176, cahier n° 101.

- Site web du Laboratoire de Génie Chimique et Biochimique de l'Université Blaise Pascal (en cours de refonte totale) : <http://www.univ-bpclermont.fr/ubp/lgcb>
- Site web MELiSSA à l'Agence Spatiale Européenne : <http://extids.estec.esa.nl/melissa/>

et autres sites intéressants :

<http://bioreaktor.de/english/seite3.htm>

<http://www.ecn.ne/biomass/algae/index.html>

<http://www.access.wvu.edu/class/jgw/biotec/tebcwebpage/Teacher%20Taxonomy/AGRICULTURE/PHOTOBI OREACTOR.htm>

<http://www-cyanosite.bio.purdue.edu/>

<http://www.pasteur.fr/recherche/banques/PCC>