REACTEUR A DISPOSITIF D'ECLAIRAGE OPTIMISE

DOMAINE DE L'INVENTION

La présente invention concerne le domaine technique général des réacteurs à éclairage intégré, notamment pour la culture de micro-organismes photosensibles.

Il peut s'agir d'un bioréacteur mais aussi d'un réacteur chimique ou physico-chimique.

ARRIERE PLAN DE L'INVENTION

La notion de bioréacteur, ou réacteur biologique, désigne ici un réacteur au sein duquel se développent des phénomènes biologiques, tels qu'une croissance de cultures de micro-organismes pures ou d'un consortium de micro-organismes (notamment des microalgues), dans des domaines très variés tels que le traitement d'effluents, la production de biomasse contenant des biomolécules d'intérêt (c'est-à-dire des biomolécules que l'on sait valoriser). Cette notion englobe donc notamment les réacteurs appelés fermenteurs.

Un bioréacteur comporte typiquement une cuve (cylindrique ou parallélépipédique) contenant un milieu de culture d'espèces biologiques (levures, bactéries, champignons microscopiques, algues, cellules animales et végétales) pour :

- la production de biomasse, ou pour
- la production d'un métabolite, ou pour
- la bioconversion d'une molécule d'intérêt.

Divers types de conditions opératoires peuvent être nécessaires pour la croissance des espèces biologiques au sein d'un tel bioréacteur ; on connaît ainsi, notamment, des régimes de croissance autotrophe (ou photo-autotrophe) avec un apport de lumière (on parle aussi de photosynthèse) ou de croissance mixotrophe (avec un apport combiné de source carbonée et de lumière). Il faut noter également que la lumière peut agir sur le métabolisme des cellules en induisant ou réprimant la production de certains composés, indépendamment de la croissance et de la photosynthèse. Un apport de lumière lors de la culture peut donc être utile même lorsque les micro-organismes sont hétérotrophes.

Dans la suite, on s'intéressera plus spécifiquement aux photo-bioréacteurs, c'est-à-dire aux bioréacteurs dans lesquels un apport de lumière (en continu, de manière cyclique, ou sous forme d'impulsions) est mis en œuvre.

On a déjà proposé des photo-bioréacteurs dans lesquels l'apport en lumière est réalisé par l'intérieur de la cuve. Le document US 3 986 297 propose notamment un photo-bioréacteur dans lequel l'apport de lumière est réalisé par immersion, dans le milieu de culture, de moyens

d'illumination (tel que des lampes au xénon). Un inconvénient de cette solution est que l'efficacité du photo-bioréacteur est inversement proportionnelle aux dimensions de celui-ci. Ainsi, plus les dimensions du photo-bioréacteur augmente, plus son efficacité diminue.

On a également proposé des photo-bioréacteurs dans lesquels l'apport en lumière est réalisé par l'extérieur de la cuve. Notamment, une configuration bien maîtrisée consiste à munir la cuve de hublots permettant la pénétration d'une lumière générée depuis l'extérieur de la cuve (lumière naturelle ou artificielle). Un inconvénient d'une telle configuration est que les hublots limitent la surface d'illumination et absorbent ou réfléchissent une partie significative des photons émis par la source d'éclairage.

Que l'apport de lumière soit réalisé par l'intérieur ou par l'extérieur de la cuve, la productivité d'un photo-bioréacteur (production de biomasse par unité de volume) est directement liée à la surface spécifique de celui-ci (rapport surface éclairée sur volume de culture). Il est donc nécessaire que le photo-bioréacteur ait une grande surface spécifique éclairée.

Qu'ils soient plats ou cylindriques, un inconvénient des photo-bioréacteurs actuels est qu'ils doivent occuper une grande surface au sol pour que leur productivité soit acceptable.

Par ailleurs, quelle que soit la source de lumière choisie pour illuminer le milieu de culture (Néons, LEDs, Lumière Naturelle), son apport en énergie photonique est réalisé de manière très localisée, de sorte que :

- la majeure partie des photons émis par la source de lumière ne peuvent pas être consommée biologiquement par le micro-organisme du fait d'une surcharge en énergie,
- la dissipation de la chaleur générée par la source de lumière est mal maîtrisée,
- il est complexe et coûteux de réaliser des photo-bioréacteurs de grandes dimensions.

Un but de la présente invention est de proposer un photo-bioréacteur économique, aussi bien au niveau des investissements que des frais d'exploitation, et dont l'emprise foncière est réduite.

Un autre but de l'invention est de fournir un photo-bioréacteur de grande capacité (cuve de 1000 litres ou plus) dans lequel le rendement en quantité de photons ($\mu mol\text{-}ph\text{-}s^{-1}$) apportés par une surface lumineuse par unité de puissance (Watt) est optimisé.

BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

A cet effet, l'invention propose un réacteur incluant une cuve destinée à contenir :

- une masse à traiter, et
- au moins un dispositif d'éclairage destiné à favoriser le traitement de cette masse,

remarquable en ce que chaque dispositif d'éclairage comprend :

- un diffuseur de lumière, le diffuseur incluant au moins une plaque micro-gravée transparente à un rayonnement lumineux, ladite plaque ayant des faces arrière et avant opposées et au moins deux tranches entre les faces arrière et avant, l'aire de chaque face étant supérieure à l'aire de chaque tranche, la face arrière incluant une pluralité de micro-motifs,
- une source de lumière pour générer le rayonnement lumineux, la source de lumière étant disposée sur au moins une tranche de la plaque et étant orientée de sorte que le rayonnement lumineux qu'elle génère se propage dans la plaque.

Cette solution permet d'obtenir un photo-bioréacteur ayant de meilleurs rendements (énergétique d'une part, et en production de biomasse d'autre part) que les photo-bioréacteurs existants.

En effet, l'utilisation d'une (ou plusieurs) plaque(s) micro-gravée(s) permet la conduction homogène du rayonnement lumineux généré par la source de lumière. L'énergie photonique est guidée à travers toute la paque micro-gravée et ressort de celle-ci sur toute la surface de sa face avant, ce qui améliore le rapport surface illuminée/volume éclairé directement en contact avec le milieu de culture.

Ainsi, l'invention permet d'augmenter le rapport µmol-photons s^{-1} W^{-1} par unité de volume, ce qui assure une réduction de l'empreinte environnementale du photo-bioréacteur et diminue les coûts associés à son exploitation.

Des aspects préférés mais non limitatifs de l'ensemble selon l'invention sont les suivants :

- chaque plaque peut être sensiblement plane et comprendre quatre tranches, chaque source de lumière incluant une pluralité de diodes électroluminescentes disposées sur au moins l'une des tranches de plus petites dimensions ;
- chaque plaque peut être cylindrique et comprendre deux tranches, chaque source de lumière incluant une pluralité de diodes électroluminescentes disposées sur au moins l'une des deux tranches ;
- les diodes de la pluralité de diodes électroluminescentes peuvent être disposées sur la tranche de la plaque la plus éloignée du fond de la cuve ;
- chaque diffuseur de lumière peut comprendre une paire de plaques micro-gravées agencées de sorte que leurs faces arrière s'étendent en regard l'une de l'autre ;
- chaque diffuseur de lumière peut comprendre en outre au moins une couche de matériau réfléchissant le rayonnement lumineux, chaque couche de matériau réfléchissant s'étendant sur la face arrière d'une plaque respective ;

- chaque diffuseur de lumière peut comprendre en outre au moins une couche de transmission, chaque couche de matériau de transmission s'étendant sur la face avant d'une plaque respective ;
- le réacteur peut comprendre une pluralité de diffuseurs de lumière, deux diffuseurs de lumières adjacents étant espacés d'une distance comprise entre 2 et 10 centimètres, préférentiellement entre 4 et 8 centimètres, et encore plus préférentiellement sensiblement égale à 6 centimètres ;
- la source de lumière de chaque dispositif d'éclairage peut être adaptée pour générer un rayonnement lumineux continu ;
- le réacteur peut comprendre une pluralité de diffuseurs de lumière, deux diffuseurs de lumières adjacents étant espacés d'une distance comprise entre 8 et 150 centimètres, préférentiellement entre 10 et 50 centimètres, et encore plus préférentiellement sensiblement égale à 11 centimètres ;
- la source de lumière de chaque dispositif d'éclairage peut être adaptée pour générer un rayonnement lumineux discontinu sous forme de flashs composé d'une alternance de phases obscures et de phases éclairées, par exemple à une fréquence comprise entre 10 et 50 kHz ;
- la cuve peut avoir une contenance de 100m^3, la surface couverte par les plaques des diffuseurs de lumière étant comprise entre 2000 et 3000m^2, de préférence entre 2250 et 2750m^2, préférentiellement sensiblement égale à 2500m^2 ;
- les dispositifs d'éclairage peuvent être composés :
    - d'un premier groupe de dispositifs d'éclairage d'une première hauteur, et
    - d'un deuxième groupe de dispositifs d'éclairage d'une deuxième hauteur inférieure à la première hauteur,

  un dispositif d'éclairage du deuxième groupe étant disposé entre deux dispositifs d'éclairage successifs du premier groupe ;
- le réacteur peut comprendre en outre un système d'injection incluant une pluralité d'unités de diffusion, chaque unité de diffusion :
    - s'étendant entre deux diffuseurs de lumière adjacents, et
    - étant séparée des autres unités de diffusion par au moins deux diffuseurs de lumière successifs ;
- chaque dispositif d'éclairage peut être indépendamment raccordé à un module d'alimentation en énergie électrique de sorte que chaque dispositif d'éclairage peut être retiré individuellement du réacteur pendant le fonctionnement de celui-ci.

BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

D'autres avantages et caractéristiques du réacteur selon l'invention ressortiront mieux de la description qui va suivre de plusieurs variantes d'exécution, données à titre d'exemples non limitatifs, à partir des dessins annexés sur lesquels :

- La figure 1 est une représentation schématique en perspective d'une première variante de photo-bioréacteur selon l'invention ;
- La figure 2 est une représentation schématique en perspective d'un dispositif d'éclairage ;
- La figure 3 est une représentation schématique en coupe transversale d'un premier mode de réalisation du dispositif d'éclairage ;
- La figure 4 est une représentation schématique en coupe transversale d'un deuxième mode de réalisation du dispositif d'éclairage ;
- La figure 5 est une représentation schématique d'une variante expérimentale de photo-bioréacteur ;
- La figure 6 est une courbe illustrant le rendement en production de biomasse (en fonction de différents paramètres) obtenu à partir de la variante expérimentale de photo-bioréacteur illustrée à la figure 5 ;
- La figure 7 est une vue partielle en coupe transversale d'une deuxième variante de photo-bioréacteur ;
- La figure 8 est une courbe illustrant la concentration maximum en microalgues en fonction d'un écartement entre deux dispositifs d'éclairage adjacents ;
- La figure 9 est un schéma de principe illustrant la différence entre un éclairage continu et un éclairage discontinu ;
- La figure 10 représente des courbes de concentration en microalgues en fonction d'un écartement entre deux dispositifs d'éclairage adjacents dans le cas d'un éclairage continu d'une part et dans le cas d'un éclairage discontinu d'autre part.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

On va maintenant décrire différents exemples de photo-bioréacteurs selon l'invention en référence aux figures. Dans ces différentes figures, les éléments équivalents sont désignés par la même référence numérique.

1. Généralités

En référence à la figure 1, le bioréacteur comprend :

- Une cuve 1 destinée à recevoir une masse à traiter,

- Une pluralité de dispositifs d'éclairage 2a, 2b, et
- Un système d'injection incluant une pluralité d'unités de diffusion 3 de dioxyde de carbone (CO_2) sous forme de bulles de gaz ou sous forme d'un fluide constitué de CO_2 dissout dans un milieu aqueux.

Chaque dispositif d'éclairage est destiné à être intégré dans la cuve pour le traitement du milieu contenu dans la cuve. Ces dispositifs d'éclairage sont destinés à être totalement immergés dans le milieu de culture. Dans la suite, le bioréacteur sera décrit en référence au traitement d'une biomasse formée de micro-organismes, par exemple des microalgues. On comprend toutefois que la description qui suit s'applique également à d'autres types de réacteurs, chimiques ou physico-chimiques.

Comme illustré à la figure 1, les dispositifs d'éclairage 2a, 2b sont disposés à une distance non nulle du fond de la cuve. Les dispositifs d'éclairages 2a, 2b peuvent être de hauteurs différentes. En particulier, le bioréacteur peut comprendre :

- un premier groupe 2a de dispositifs d'éclairage ayant une première hauteur h_a, et
- un deuxième groupe 2b de dispositifs d'éclairage ayant une deuxième hauteur h_b inférieure à la première hauteur h_a,

un dispositif d'éclairage du deuxième groupe 2b étant disposé entre deux dispositifs d'éclairage successifs du premier groupe 2a. Ceci permet de favoriser le brassage et l'homogénéisation de la masse à traiter.

Pour augmenter encore le brassage et l'homogénéisation de la masse à traiter, les unités de diffusion 3 du système d'injection peuvent être disposées périodiquement en aval de chaque dispositif d'éclairage du premier groupe 2a (le réacteur étant dépourvu d'unité de diffusion 3 en aval de dispositif d'éclairage du deuxième groupe 2b). Ainsi, après avoir circulé sous le dispositif d'éclairage du premier groupe 2a, la masse à traiter est entrainée verticalement vers le haut de la cuve 1 (i.e. direction opposée au fond) par les bulles de CO_2 (ou le fluide contenant le CO_2 dissout) émises (ou émis) par les unités de diffusion 3. La masse à traiter passe au-dessus du dispositif d'éclairage du deuxième groupe 2b et retombe vers le fond de la cuve par gravité. On crée ainsi une circulation de la masse à traiter à travers la cuve, ce qui améliore le brassage et l'homogénéisation de la masse à traiter.

En variante, les dispositifs d'éclairage 2a, 2b du bioréacteur peuvent être tous de hauteur identique. Ceci permet de simplifier l'installation des dispositifs d'éclairage par un opérateur. Dans ce cas, les unités de diffusion 3 sont disposées tous les deux dispositifs d'éclairage de sorte que deux unité de diffusion 3 successives sont séparées par deux dispositifs d'éclairages 2a, 2b adjacents.

1.1. Cuve

La cuve 1 est destinée à contenir la masse à traiter. Elle comprend un fond et au moins une paroi latérale.

Dans le mode de réalisation illustré à la figure 1, la cuve 1 est sensiblement parallélépipédique. Elle est composée d'un fond, de quatre parois latérales et d'un plafond (ou couvercle) au moins partiellement amovible.

Dans d'autres modes de réalisation, la cuve 1 peut être cylindrique et comprendre une base inférieure formant fond, une base supérieure formant couvercle, et une paroi latérale entre les bases inférieure et supérieure.

Le matériau constituant les parois de la cuve 1 peut être en acier inox ou équivalent. Bien entendu, d'autres matériaux peuvent être choisis en fonction de l'application visée (Plexiglass®, Polypropylène, Béton, etc.). Dans tous les cas, la cuve est de préférence réalisée dans un matériau résistant aux produits de nettoyage (javel, peroxyde, etc.).

1.2. Dispositif d'éclairage

En référence à la figure 2, chaque dispositif d'éclairage 2a, 2b comprend :

- un (ou plusieurs) diffuseur(s) de lumière 21, et
- une (ou plusieurs) source(s) de lumière 22.

La source de lumière 22 permet la génération d'un flux lumineux. Le diffuseur de lumière 21 permet :

- de guider le flux lumineux généré par la source de lumière, et
- de le redisperser de manière homogène vers la masse à traiter.

Avantageusement, chaque source de lumière 22 peut être raccordée indépendamment à un module d'alimentation en énergie électrique. Le module permet de fournir l'énergie électrique nécessaire à la génération du flux lumineux. Le fait que chaque source de lumière soit connectée indépendamment à un module d'alimentation en énergie électrique permet de retirer individuellement chaque dispositif d'éclairage 2a, 2b du bioréacteur pendant le fonctionnement de celui-ci.

1.2.1. Diffuseur de lumière

Le diffuseur de lumière 21 comprend une (ou plusieurs) plaque(s) 211 texturée(s). Chaque plaque 211 peut être sensiblement plane et rectangulaire (adaptée dans le cas d'une cuve parallélépipédique) ou tubulaire (adaptée dans le cas d'une cuve cylindrique).

Chaque plaque 211 comprend une face arrière 2113, une face avant 2114 et :

- quatre bords latéraux (ou tranches) 2111 dans le cas d'une plaque 211 rectangulaire, ou
- deux bords latéraux (ou tranches) 2111 dans le cas d'une plaque 211 tubulaire.

Chaque bord latéral 2111 peut être poli, et au moins l'un des bords latéraux 2111 est destiné à venir en contact avec la source de lumière 22 pour permettre la transmission du flux lumineux au travers de la plaque 211.

Le matériau constituant chaque plaque 211 peut être du poly-méthacrylate de méthyle (PMMA) ou un autre matériau transparent connu de l'homme du métier qui permet à la plaque 211 de conduire – par réflexion interne totale sur ses faces avant et arrière – le flux lumineux émis par la source de lumière 22, comme par exemple :

- une autre résine méthacrylique transparente telle que le méthacrylate de méthyle, le éthacrylate d'éthyle, le méthacrylate de butyle, le méthacrylate de propyle ou d'isopropyle, ou
- une résine transparente de type polystyrène, polycarbonate, polyacrylate, ou
- un verre / une silice fondue.

1.2.1.1. Micro-motifs

En référence à la figure 3, chaque plaque 211 comprend une pluralité de micro-motifs 2112 sur sa face arrière 2113. Les micro-motifs 2112 permettent d'intercepter les rayonnements 23 du flux lumineux circulant à travers la plaque 211 et de les diriger vers la face avant 2114 de sorte à faciliter leur transmission hors de la plaque 211. Plus précisément, les rayonnements 23 qui frappent chaque micro-motif 2112 sont redispersés. Chaque rayonnement 23 est réémis sous un angle tel qu'il puisse sortir de la plaque 211 par la face avant 2114 opposée à la face arrière 2113 comportant les micro-motifs 2112.

Chaque micro-motif 2112 peut consister en une cavité – ponctuelles ou en sillon – présentant une forme choisie parmi une forme conique, une forme (poly)pyramidale, une forme quadrangulaire, ou toute autre forme connue de l'homme du métier et permettant à chaque micro-motif 2112 de dévier les rayonnements 23 du flux lumineux. Notamment dans l'exemple illustré à la figure 3, les micro-motifs 2112 consistent en de fines rainures parallèles au bord latéral 2111 en contact avec la source de lumière 22.

Bien entendu, les micro-motifs 2112 peuvent consister en des éléments de déviation autre que des cavités, tels que :

- des particules de diffusion de lumière disposées dans le matériau constituant la plaque 211, ou
- des composants de texturation de surface disposés sur la face arrière 2113, comme par exemple des structures hémisphériques émergentes, des bosses s'étendant vers l'extérieur de la face arrière 2113, des structures pyramidales émergée ou des combinaisons comprenant au moins l'une des structures précédentes.

La hauteur (i.e. dimension selon un axe perpendiculaire à la face arrière) de chaque micro-motif 2112 peut être comprise entre 0,15 et 0,5 µm, et le pas entre deux micro-motifs adjacents peut être compris entre 20 et 900 µm, et notamment supérieur ou égale à 100 µm.

Avantageusement, les micro-motifs 2112 peuvent être disposés sur la face arrière 2113 selon un espacement consécutif inversement proportionnel à l'éloignement desdits micro-motifs 2112 du bord latéral 2111 en contact avec la source de lumière 22. Un tel agencement permet d'obtenir une intensité lumineuse constante sur toute la surface de la face arrière 2113. En effet, l'intensité du flux lumineux qui pénètre dans la plaque 211 décroît en fonction de son éloignement relativement à la source de lumière 22. En faisant varier la densité de micro-motifs 2112 sur la face arrière 2113, il est possible de compenser la perte d'intensité par une densité croissante de micro-motifs 2112.

1.2.1.2. Couche réfléchissante

Le diffuseur de lumière 21 peut également comprendre une couche de matériau réfléchissant 212 le flux lumineux.

Cette couche de matériau réfléchissant 212 s'étend de préférence sur toute la face arrière 2113 de la plaque 211 incluant la pluralité de micro-motifs 2112.

La couche de matériau réfléchissant 212 peut consister en un film de matériau réfléchissant tel qu'un film métallisé d'aluminium. En variante, la couche de matériau réfléchissant 212 peut consister en une peinture en matière d'indice de réfraction inférieur à celui du matériau 211 constituant chaque plaque 21.

1.2.1.3. Couche de transmission

Le diffuseur de lumière 21 peut également comprendre une couche de transmission 213 sur la face avant 2114 de la plaque 211.

Cette couche de transmission 213 permet de favoriser la transmission des rayonnement 23 du flux lumineux vers l'extérieur de la plaque 211.

Cette couche de transmission 213 permet également de lisser l'effet d'éclairement obtenu avec le diffuseur de lumière 21.

La couche de transmission 213 permet enfin de protéger la plaque 21 contre d'éventuelles agressions mécaniques (rayures dues à un frottement, etc.).

La couche de transmission 213 peut par exemple consister en un vernis protecteur d'indice de réfraction proche de l'indice de réfraction du matériau constituant la plaque 211.

1.2.2. Source de lumière

Chaque source de lumière 22 peut comprendre une (ou plusieurs) diode(s) électroluminescente(s) (LED) 221. De préférence, chaque diode 221 est une diode électroluminescente de puissance

(HPLED), c'est-à-dire une LED de puissance supérieure à 1 Watt. Par exemple, chaque diode 221 peut être une diode électroluminescente à montage direct de puces (également connues sous le nom de LED *« COB »*, acronyme de l'expression anglosaxonne *« Chip On Board »*). Dans ce cas, la source de lumière 22 peut comporter un module de LED COB composé de plusieurs puces LED fixées à un substrat (par exemple) de céramique. Ceci permet de générer un flux lumineux plus puissant et dense.

Les diodes 221 de la source de lumière 22 peuvent être individuelles, ou être disposées *« en barrette »* ou *« en ruban »* (voir la demande de brevet FR1050015). L'utilisation de diodes disposées en ruban permet de faciliter la fabrication du dispositif d'éclairage, chaque source de lumière 22 étant destinée à venir en contact avec un bord latéral de la devant être disposé sur un bord latéral 2111 de la plaque 211 du diffuseur de lumière 21. Les diodes 221 peuvent être alimentées en énergie électrique par l'intermédiaire d'un (ou plusieurs) câble(s) de connexion relié(s) électriquement à une source d'énergie électrique.

Quel que soit l'agencement retenu, les diodes 221 de la source de lumière 22 peuvent être toutes identiques en ayant un même régime d'excitation, ou être différentes. Notamment, les diodes 221 d'une source de lumière 22 peuvent avoir :

- des régimes d'excitation distincts (par exemple régime continu pour certaines, et régime flash à une fréquence comprise entre 1 et 150 kHz pour d'autres), et/ou
- des spectres d'émission distincts (par exemple en lumière blanche pour certaines et en lumière bleu pour d'autres), etc.

Chaque source de lumière 22 peut également comprendre un (ou plusieurs) réflecteur(s) (non représenté) pour réfléchir, orienter et focaliser la lumière produite par les diodes 221.

Chaque source de lumière est destinée à venir en contact avec un bord latéral de la plaque 211 de sorte que les rayonnement 23 du flux lumineux généré par la source de lumière se propage à l'intérieur de la plaque 211. Avantageusement, les diodes 221 et le (ou les) câble(s) de connexion peuvent être noyés/moulés dans une résine pour étanchéifier chaque source de lumière.

Dans le mode de réalisation illustré à la figure 3, le dispositif d'éclairage comprend une source de lumière 22 destinée à venir en contact avec un bord latéral 2111 de la plaque 211. En variante, chaque dispositif d'éclairage peut comprendre deux sources de lumière 22 destinées à venir en contact avec un bord latéral 2111 respectif opposé de la plaque 211. En variante encore, chaque dispositif d'éclairage peut comprendre quatre sources de lumière 22 destinées à venir en contact avec un bord latéral 2111 respectif de la plaque 211.

1.3. Système d'injection

Le système d'injection permet d'alimenter le bioréacteur en nutriment, notamment en CO_2. En particulier, le système d'injection permet :

- de fournir le dioxyde de carbone nécessaire au développement de la biomasse et
- de mettre en suspension les particules supports de microorganismes contenus dans le milieu de culture de la biomasse.

L'apport de dioxyde de carbone peut être continu ou discontinu en réponse à certains critères tels que le temps ou le pH. Comme indiqué précédemment, le dioxyde de carbone peut être introduit :

- sous forme de bulles de gaz, ou
- sous forme d'une solution aqueuse pompée ou poussée dans le bioréacteur.

L'introduction de dioxyde de carbone sous forme de bulles de gaz permet une meilleure répartition du CO_2 dans la cuve.

Le système d'injection peut comprendre :

- une unité d'amenée de CO_2 – tel qu'un surpresseur (dans le cas de CO_2 gazeux) ou une pompe (de type turbine dans le cas de CO_2 fluide) – de préférence muni d'un clapet anti-retour afin d'éviter la remontée des boues ou des effluents au niveau de l'unité d'amenée de CO_2,
- d'une pluralité d'unités de diffusion 3 formant :
    - dans le cas de CO_2 gazeux, des têtes de micro-bullage pour la diffusion de bulle de différents diamètres,
    - dans le cas de CO_2 dissout dans un milieu aqueux, des buses d'éjection de fluide pour la diffusion du fluide contenant du CO_2 dissout.

Les unités de diffusions peuvent être de différents types connus de l'homme du métier, par exemple des diffuseurs en matériaux composites microporeux, à membrane (EPDM, silicone, etc., de préférence EPDM), en céramique ou à fente, etc.

Chaque unité de diffusion est de préférence disposée au voisinage immédiat du fond de la cuve. Par ailleurs, chaque unité de diffusion 3 est disposée entre deux dispositifs d'éclairage 2a, 2b adjacents, les différentes unités de diffusion 3 étant agencées de sorte que chaque unité de diffusion 3 est entourée de dispositifs d'éclairage distincts des dispositifs d'éclairage 2a, 2b entourant les autres unités de diffusion 3. En d'autres termes, chaque unité de diffusion 3 est séparée de l'unité de diffusion 3 la plus proche (ou des unités les plus proches) par deux dispositifs d'éclairage 2a, 2b.

1.4. Traitement de la biomasse

La biomasse cultivée dans le réacteur selon l'invention peut être récoltée par toute technique connue de l'homme du métier telle que les techniques de sédimentation, de filtration, de flottation ou de centrifugation.

La récolte de biomasse peut être mise en œuvre en continu ou en semi-continu, notamment dans le cas où le bioréacteur est implanté sur un site industrielle. A cet effet, le bioréacteur peut être associé à une unité de séparation – décanteur et/ou centrifugeuse et/ou filtre etc. – permettant de prélever une portion du contenu de la cuve pour séparer la biomasse du milieu de culture.

La biomasse ainsi extraite peut ensuite être conditionné (congélation sous vide, etc.) pour une utilisation ultérieure. Le milieu de culture, une fois séparé de la biomasse, peut être réintroduit dans la cuve du bioréacteur.

1.5. Autres caractéristiques du bioréacteur

Le réacteur peut également comprendre un module de contrôle incluant un (ou plusieurs) capteur(s) pour vérifier les paramètres du bioréacteur. Notamment, le module de contrôle peut comprendre :

- une (ou plusieurs) sonde(s) de pH,
- un (ou plusieurs) capteur(s) de mesure du taux de CO_2,
- un (ou plusieurs) capteur(s) de lumière,
- un (ou plusieurs) capteur(s) de $PO_{3/4}$, et/ou de NO_3, et/ou de NH_4,
- un (ou plusieurs) capteur(s) de température.

Les différents capteurs et sondes du module de contrôle permettent de maintenir des valeurs optimales pour les paramètres du bioréacteur influant sur la croissance de la biomasse.

Notamment, le module de contrôle peut adapter la quantité de CO_2 injecté dans le milieu de culture en fonction des mesures réalisées par la sonde de pH et/ou par le(s) capteur(s) de mesure du taux de CO_2, etc. Par exemple, si le taux de CO_2 mesuré est inférieur à un seuil, le module de contrôle peut commander l'injection d'une quantité supérieure de CO_2 dans la cuve (relativement à une quantité de consigne). A l'inverse, si le pH mesuré est inférieur à un seuil prédéterminé, le module de contrôle peut commander l'injection d'une quantité inférieure de CO_2 (relativement à une quantité de consigne).

De même, si la température mesurée est inférieure (respectivement supérieure) à une température seuil, le module de contrôle peut commander l'activation d'un échangeur de chaleur – tel qu'un échangeur à plaques – intégré à la cuve du bioréacteur pour chauffer (respectivement refroidir) le milieu de culture.

Également, en fonction des mesures effectuées par le (ou les) capteur(s) de $PO_{3/4}$, de NO_3, de NH_4, le module de contrôle peut adapter une quantité de nutriment (phosphore, azote, etc.)

injectée dans le milieu de culture (en agissant sur l'activation/la désactivation d'une pompe raccordée à une source de nutriments, etc.).

Enfin, la mesure d'une information représentative de la luminosité à l'intérieur du milieu de culture permet une estimation de la concentration en biomasse à l'intérieur de la cuve. Ainsi, il est possible de réguler l'étape de récolte de la biomasse. Notamment, si la mesure de lumière à l'intérieure de la cuve est représentative d'une concentration de biomasse trop faible, le module de contrôle peut suspendre la récolte de biomasse. A l'inverse, si la mesure de lumière à l'intérieure de la cuve est représentative d'une concentration de biomasse trop forte, le module de contrôle peut initier la récolte de biomasse.

2. Caractéristiques du photo-bioréacteur

2.1. Cas d'un rayonnement lumineux continu

On va maintenant décrire différents aspects relatifs à un dimensionnement du bioréacteur permettant l'utilisation optimale du flux lumineux issu des dispositifs d'éclairage. Ce dimensionnement du bioréacteur est réalisé en considérant un apport de lumière continu, c'est-à-dire en considérant que chaque source de lumière 22 génère un rayonnement lumineux continu d'intensité constante au cours du temps.

2.1.1. Modèle de captation de photons

Pour comprendre si le flux de photons issu des dispositifs d'éclairage est utilisé de manière optimale par la masse à traiter, on propose d'employer un modèle sur la captation de photons par des microalgues en fonction d'une surface d'émission et d'une géométrie du réacteur.

La représentation suivante montre les paramètres modulables pour déduire des productivités dans un photo-bioréacteur. Ici il sera préférable de réduire au maximum la fraction non éclairée du réacteur et d'augmenter la surface recevant le flux de photons.

Le modèle global du rendement surfacique d'un photo-bioréacteur est le suivant :

$$\left\langle r_X' \right\rangle_{max} \cong (1-f_d)\ \rho_M \bar{\phi}' \frac{2\alpha}{1+\alpha} a_{light} \frac{K}{\left(\frac{\bar{n}+2}{\bar{n}+1}\right)} \ln\left[1+\frac{\left(\frac{\bar{n}+2}{\bar{n}+1}\right)\bar{q}_0}{K}\right]$$

$$= (1-f_d)\ \rho_M \bar{\phi}' \left\langle A \right\rangle_{max} \frac{K}{\left(\frac{\bar{n}+2}{\bar{n}+1}\right)\bar{q}_0} \ln\left[1+\frac{\left(\frac{\bar{n}+2}{\bar{n}+1}\right)\bar{q}_0}{K}\right]$$

Où :

- f_d est la fraction volumique non éclairée par conception du réacteur (f_d = 0 si toute la surface du réacteur est éclairée) ;
- ρ_M est le rendement énergétique maximum de conversion de l'énergie lumineuse en énergie physico- chimique ;
- φ est le rendement quantique molaire de la photosynthèse ;
- α est le module de diffusion linéaire ;
- a_{light} est la surface spécifique éclairée du réacteur sur le volume ;
- K correspond à une constante de demi-saturation de la photosynthèse (dépend du micro-organisme) ;
- ň correspond au degré de collimation moyen du rayonnement Incident ;
- Q_n est la densité de flux moyenne sur la surface du photo-bioréacteur.

Les performances maximales d'un photo-bioréacteur peuvent être caractérisées par quelques simplifications des constantes dans un cas idéal. Par conséquent la production dépendra des éléments suivants :

- La fraction sombre « S_x », qui correspond au ratio volumique non éclairé (fd=0) :

$$\mathbf{Sx} = (1-fd)\ln\left(1+\frac{q}{K}\right) \quad en\ kg\ /m^2\ /J$$

Où q s'exprime en µmolphotons/s/m², et où K est la constante de demi-saturation de la photosynthèse (30000 µmol/kgx/s),

- La production surfacique « P_x » dû à la captation du flux de photons surfacique capté :

$$\mathbf{Px} = Sx * aLumiere \quad en\ kg\ /m^3\ /J\ \ Avec\ facteur\ correctif\ de\ 20\%$$

- La production volumique en fonction du flux de photons surfacique capté rapporté au volume total :

$$\mathbf{a}_{\text{Lumiere}} = \frac{Slumiere}{Vr}.$$

En appliquant les règles de calculent précédentes pour :

- une plaque d'acrylique de 0.2m de large et 0.4m de long
- une lumière incidente de 250µmol/m2/s,
- un volume total de réacteur de 0.008 m^3,
- aucune zone d'ombre (fd=0),

alors la productivité volumique théorique maximale est estimé à 100 mg/L/J, comme illustré par le tableau ci-dessous.

Cas géométrie réacteur		
Longueur	0,40	m
Largeur	0,20	m
Surface éclairée	0,08	m²
Q_n	250,00	µmol/m^2/s
K	30000,00	µmol/kg_x/s
V_r	0.008	m^3
$a_{lumiere}$	10	m^1
f_d	0,00	Nd
S_x	0,01	Kg/m^2/J
P_x	0,08	Kg/m^3/J
P_x correction	0,099585634	Kg/m^3/J
Production max théorique	**100**	**mg/L/J**

Ceci est confirmé lors d'une expérience en utilisant le réacteur illustré à la figure 5, dans lequel le dispositif d'éclairage comprend une plaque d'acrylique disposée sous le fond d'une cuve aux parois transparentes. Une production moyenne est de 102 mg/L/J sur 140 heures est obtenue (minimum : 60 mg/L/J, maximum :130 mg/L/J), comme représenté sur la figure 6.

L'ajout d'air avec 2% de CO_2 assure le brassage et apporte du carbone à la masse à traiter.

2.1.2. <u>Détermination d'une superficie optimale de plaques pour les dispositifs d'éclairage du réacteur</u>

L'objectif est de déterminer la superficie optimale de diffusion du flux lumineux pour le réacteur. Bien entendu, le nombre et la disposition des dispositifs d'éclairage peut varier en fonction de la quantité de biomasse que l'on souhaite produire.

Si l'on désire produire 1 kg de biomasse par m^3 de culture dans un volume de 100 m^3 en appliquant les formules de la modélisation globale décrite au point 2.1., il faut que les dispositifs d'éclairage

comprennent 2500 m^2 de plaques lumineuses (diffuseurs de lumière) émettant 1000 µmol/m^2/s (sources de lumière).

Ce nombre est directement lié au rendement, au volume, à la géométrie et à l'intensité lumineuse souhaités.

On obtient le tableau suivant :

Surface lumière	2 500	m^2
Q_n	**1000,00**	**µmol/m^2/s**
K	30000,00	µmol/kgx/s
V_r	100,00	m^3
a_{light}	25,00	m^1
f_d	0,00	nd
S_x	0,03	Kg/m^2/J
P_x continu	0,82	Kg/m^3/J
Rendement corrigé	**0,98**	**Kg/m^3/J**

2.1.3. <u>Détermination d'une quantité maximale de biomasse à ne pas dépasser</u>

L'objectif est de déterminer la concentration maximum à ne pas dépasser afin de ne pas avoir de zone sombre dans le milieu (i.e. maintenir un f_d=0),

On suppose un réacteur tel qu'illustré à la figure 7 et comportant :

- une cuve ayant les dimensions suivantes : 17mètres x 2mètres x 3mètres (Longueur x largeur x Hauteur en mètres), et un volume de 100 m^3
- des dispositifs d'éclairage incluant des plaques ayant pour dimensions 3 mètres x 2 mètres x 0.01 mètre (Longueur x largeur x Epaisseur).

Pour disposer d'une surface lumineuse de 2500m², le nombre de plaques doit être de 2500/(3x2) = 417 plaques, pour une épaisseur totale de 4.17 mètres (l'épaisseur de chaque plaque étant de 1 centimètre).

Afin de minimiser l'encombrement relatif à l'introduction des plaques dans la cuve, chaque dispositif d'éclairage peut comprendre deux plaques accolées par leurs faces arrière de sorte que leurs faces avant sont opposées l'une à l'autre (les faces arrière des deux plaques s'étendant en regard et étant en contact). Un exemple d'un tel dispositif d'éclairage est illustré à la figure 4. L'espacement entre les différents dispositifs d'éclairage est alors donné par la formule suivante :

$$d = (L - E_{tot}) / (½ \times Nb_{Plaques})$$

$$d = (17\text{-}4.17)/ (½ \times 417).$$

Où :

- d est la distance libre entre les faces avant de deux dispositifs d'éclairage successifs,

- L correspond à la longueur de la cuve,
- E_{tot} correspond à l'épaisseur totale des plaques des dispositifs d'éclairage (i.e. somme des épaisseurs des plaques),
- $Nb_{Plaques}$ correspond au nombre de plaques nécessaires pour disposer d'une surface lumineuse de 2500m².

Les tableaux suivants résument les différents résultats ci-dessus.

Caractéristique réacteur	
Longueur - m	17
Largeur - m	2
Profondeur - m	3
Volume - m3	100

Caractéristiques des plaques	
Nombre de plaques simple	417
Epaisseur « *½e* » d'une plaque - m	0,01
Epaisseur totale - m	4,17
Ecartement « *D* » entre les faces arrière de deux dispositifs d'éclairage successifs - m	0,08
Espace libre « *d* » entre plaques - m	0,06

Pour ne pas avoir de zone sombre dans le milieu (i.e. maintenir un f_d=0), il est nécessaire de disposer d'un flux de photons (F) suffisant jusqu'à la zone mitoyenne (B) entre deux dispositifs d'éclairage adjacents.

L'intensité lumineuse en fonction de la distance Z peut s'exprimer à partir de la formule suivante :

$$I(z)=I_0 \cdot e^{-ka \cdot B \cdot z}$$

Où :

- I_0 correspond à la lumière incidente,
- K_a est un coefficient d'absorption,
- B correspond à la concentration en biomasse,
- Z correspond à la longueur de la cuve.

La figure 8 illustre la concentration maximum en microalgues en fonction d'un écartement entre deux dispositifs d'éclairage adjacents. Si l'on considère qu'à partir de 50 µmol/m²/s, la quantité de lumière est insuffisante pour avoir des rendements satisfaisants, il est possible de déterminer la concentration maximale à ne pas dépasser.

Dans le cas du dispositif illustré à la figure 7 (et considérant un espace libre « *d* » de 6 centimètres entre les dispositifs d'éclairage), avec une zone mitoyenne B située à 0.03 mètres de chaque dispositif d'éclairage, la concentration maximale à ne pas franchir est de 1.5 g/L.

Cette concentration peut être mesurée via des capteurs de matières en suspension tels que : 6131 Blue-Green Algae Sensor ou ALS-OD4.

2.1.4. Détermination d'une charge en CO_2

La quantité de CO_2 doit être procuré de manière à correspondre à la proportion de photons apportés (Apporter autant de CO_2 que de photons apportés par le réacteur).

Par conséquent, le débit du mix (Air/CO_2) doit être ajusté au choix lumineux sélectionné.

Ici pour 1 kg/m^3/J il faut 90% de CO_2 avec un débit de 4.77 m^3/h.

Cas Condition de culture CO2		
CO2 entrée	90,00%	%
Débit	4,77	m^3/h
Charge CO2	202,38	Kg CO2/J
Assimilation	2,059	$kgCO_2/kg_{biomasse}$
Production max	98,30	Kg_{algue}/J
Volume	100,00	m^3
Rendement max	**0,983**	**kg/m^3/J**

2.1.5. Spécificité des plaques

L'homme du métier saura choisir le bon type de plaque pour chaque diffuseur de lumière. Il priorisera :

- Le type de gravure (type V...) qui permet de transmettre au mieux les photons sur l'ensemble de la plaque,
- Le matériau avec le meilleur taux de propagation de la lumière pour le panneau de transmission qui reçoit les gravures (acrylique, polycarbonate...),
- Une matière de réflexion optimale pour obtenir la luminosité la plus forte,
- Le matériau le plus efficace pour l'homogénéisation du flux de photons.

L'homme du métier choisira le positionnement des LEDs sur un, deux, trois ou quatre côtés de chaque plaque, ainsi que la forme (rectangle, carré, cylindrique) de chaque plaque selon les conditions de culture. Il privilégiera les LEDs les plus uniformes afin de combler l'ensemble de la tranche de la plaque gravée.

2.2. Cas d'un rayonnement lumineux discontinu

On va maintenant décrire différents aspects relatifs à un dimensionnement du bioréacteur en considérant un apport de lumière discontinu, c'est-à-dire en considérant que chaque source de lumière 22 génère un rayonnement lumineux discontinu composé d'une alternance rapprochée

de phases obscures et de phases éclairées (flashs), par exemple à une fréquence comprise entre 10 et 50 kHz.

A titre indicatif, la figure 9 illustre la différence entre un éclairage discontinu 31 et un éclairage continu 32.

Un tel apport de lumière discontinu permet en effet d'agir positivement sur le rendement des cultures en termes de biomasse. Comme illustré ci-après, le passage d'un apport de lumière continu à un apport de lumière discontinu permet d'augmenter la distance entre deux diffuseurs de lumières 21 adjacents (comprise entre 2 et 10 centimètres, préférentiellement entre 4 et 8 centimètres, et encore plus préférentiellement sensiblement égale à 6 centimètres), tout en maintenant les autres paramètres identiques à ceux calculés précédemment.

2.2.1. Calcul d'une distance optimale entre dispositifs d'éclairage adjacents

Soit un système doté d'une intensité moyenne en continue de 1000 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$ au niveau des diffuseurs de lumière 21.

Lorsque cette intensité moyenne (en continue) est paramétrée en *« flashs »* tout en maintenant une irradiance moyenne de 1000 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$, il est alors possible d'obtenir des vagues de flash de 10000 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$:

- Le temps de cycle t_{cycle} est tel que :

  $t_{cycle} = t_{light} + t_{dark}$ (s) / ou la fréquence (Hz)

  où t_{light} correspond à une phase éclairée et t_{dark} correspond à une phase obscure ;
- La fraction lumineuse ϕ est telle que : $\phi = (t_{light} / (t_{light} + t_{dark}))$
- Irradiance intégrée : $I_m = I_f \cdot \phi$

  avec $\phi = 10\%$;

  $I_m = 1000\ \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$

  $I_m = I_f \cdot \phi\ \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$

  $I_f = 10000\ \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$

Cette vague de photons permet d'augmenter la distance d'entrée des photons dans le milieu, et donc d'augmenter la distance entre les diffuseurs de lumière 21 avec une concentration en biomasse identique.

Comme il ressort de la figure 10 illustrant des courbes de concentration 33, 34 en microalgues en fonction d'un écartement entre deux dispositifs d'éclairage adjacents :

- dans le cas d'un éclairage continu d'une part (courbe référencée 33), et
- dans le cas d'un éclairage discontinu (courbe référencée 34) d'autre part,

la distance mitoyenne peut alors être étendue à 0.055 mètres en flash avec une concentration de 1.5 g/L. En d'autres termes, les dispositifs d'éclairage peuvent être agencés de sorte que la distance entre deux diffuseurs de lumières 21 adjacents soit sensiblement égale à 11 centimètres.

3. Autres modes de réalisation

Dans la description qui précède, différentes variantes de bioréacteurs ont été décrits, notamment des bioréacteurs destinés à des applications industrielles permettant le traitement des gaz émis. Bien entendu, les enseignements de la présente invention ne se limitent pas à des bioréacteurs de grandes dimensions destinés à des applications industrielles.

En particulier, dans une variante de réalisation, le bioréacteur peut être de dimensions plus faibles. Par exemple, le bioréacteur peut comprendre :

- une cuve de parois transparentes ou translucides :
    - de longueur comprise entre 1 et 10 mètres,
    - de largeur comprise entre 50 centimètres et 5 mètres,
    - d'épaisseur comprise entre 4 et 30 centimètres,
- un unique dispositif d'éclairage intégré dans la cuve,
- un système d'injection incluant une (ou plusieurs) unités de diffusion.

Un tel bioréacteur peut notamment être utilisé dans des applications urbaines pour remplacer certains panneaux existants tel qu'une (ou plusieurs) paroi(s) d'un Abribus®, ou de tout au type d'aubette.

Bien entendu, la forme de la cuve n'est pas nécessairement parallélépipédique, et dépend de l'application visée (forme cylindrique, etc.). De même, pour certaines applications les parois de la cuve peuvent ne pas être transparente ou translucide.

Dans tous les cas, le dispositif d'éclairage est de préférence disposé dans la cuve de sorte à s'étendre :

- parallèlement aux parois latérales de la cuve de plus grandes dimensions, (incluant un diffuseur de lumière composée paire de plaques, et
- à égale distance desdites parois latérales de plus grandes dimensions.

Un tel dispositif d'éclairage comprend un diffuseur de lumière composé de préférence d'une paire de plaques micro-gravée accolées par leurs faces arrières, lesdites plaques ayant sensiblement les mêmes formes et dimensions que les parois latérales de plus grandes dimensions de la cuve (dimensions plaque = 90-100% dimensions paroi latérale de plus grandes dimensions). Le dispositif d'éclairage comprend également une source de lumière tel que décrit précédemment.

De préférence, les dimensions de la cuve sont adaptées de sorte que l'éclairement de la masse à traiter par le dispositif d'éclairage soit optimal. Notamment, la distance séparant :

- le diffuseur de lumière et
- chaque paroi latérale de plus grandes dimensions de la cuve

peut être comprises entre 1 et 15 centimètres, préférentiellement entre 2 et 10 centimètres, et encore plus préférentiellement entre 3 et 6 centimètres.

4. Conclusions

La solution décrite précédemment permet d'augmenter les rendements énergétiques et en production de biomasse du réacteur, notamment grâce à une conduction homogène de la lumière, et à un dimensionnement optimal des différents composants du réacteur en fonction de la quantité maximale de biomasse souhaitée dans le réacteur.

Ceci est valable pour des cultures en mixotrophie, en autotrophie sur des organismes photosynthétiques mais également pour des cultures en mixotrophie à dominante hétérotrophe où la lumière n'est pas importante pour l'activité photosynthétique mais par exemple pour l'induction de molécules d'intérêt comme des pigments (WO2017050917), et/ou de l'huile.

L'invention présentée ci-dessus a de nombreuses applications, et peut par exemple être utilisée pour réaliser un puits de carbone permettant, par absorption du carbone contenu dans l'atmosphère (monoxyde/dioxyde de carbone), de réduire la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique.

Le lecteur aura compris que de nombreuses modifications peuvent être apportées à l'invention décrite précédemment sans sortir matériellement des nouveaux enseignements et des avantages décrits ici.

Par exemple, dans la description qui précède, le dispositif d'éclairage et de chauffage était intégré dans un réacteur incluant un ensemble tournant destiné à assurer un brassage de cette masse de micro-organismes. Il est bien évident pour l'homme du métier que le dispositif d'éclairage et de chauffage décrit précédemment pourrait être intégré dans un réacteur dépourvu d'ensemble tournant.

Par conséquent, toutes les modifications de ce type sont destinées à être incorporées à l'intérieur de la portée des revendications jointes.