

①② **BREVET D'INVENTION** **B1**

⑤④ REACTEUR A DIODES LUMINEUSES.

②② Date de dépôt : 25.01.23.

③③ Priorité :

⑥③ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

☐ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *CarbonWorks Société par actions
simplifiée — FR.*

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 26.07.24 Bulletin 24/30.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 28.02.25 Bulletin 25/09.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦② Inventeur(s) : BOUDIER Philippe.

⑦③ Titulaire(s) : CarbonWorks Société par actions
simplifiée.

⑦④ Mandataire(s) : ICOSA.



Description

Titre de l'invention : REACTEUR A DIODES LUMINEUSES

DOMAINE DE L'INVENTION.

[0001] La présente invention concerne le domaine technique général des réacteurs à éclairage intégré, notamment pour la culture de micro-organismes photosynthétiques.

ARRIERE PLAN DE L'INVENTION.

[0002] La notion de bioréacteur désigne ici un réacteur au sein duquel se développent des phénomènes biologiques, tels qu'une croissance de cultures d'un seul type 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) et/ou de produits métabolites.

[0003] 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.

[0004] 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 photoautotrophe) avec un apport de lumière (on parle aussi de photosynthèse). 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.

[0005] 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.

[0006] 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.

[0007] 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.

[0008] Que l'apport de lumière soit réalisé par l'intérieur ou par l'extérieur de la cuve, la productivité d'un photo-bioréacteur 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.

[0009] 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.

[0010] 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.

[0011] 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.

[0012] 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 ($\mu\text{mol-ph-s}^{-1}$) apportés par une surface lumineuse par unité de puissance (Watt) est optimisé.

BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION.

[0013] A cet effet, l'invention propose un réacteur incluant :

- une cuve destinée à contenir une masse à traiter, la cuve comprenant une paroi inférieure formant fond, une paroi supérieure opposée à la paroi inférieure, et au moins une paroi latérale entre les parois inférieure et supérieure,
- un ensemble de dispositifs d'éclairage flexibles contenu dans la cuve et destiné à favoriser le traitement de la masse,
- au moins un module d'alimentation en énergie électrique connecté à chaque dispositif d'éclairage,

remarquable en ce que chaque dispositif d'éclairage flexible comprend :

- un cadre périphérique composé :
 - de deux bordures longitudinales flexibles, et
 - de deux bordures transversales,

chaque bordure transversale s'étendant entre une paire d'extrémités libres respective des bordures longitudinales, et

- une nappe centrale flexible sur les bords de laquelle est monté le cadre périphérique, la nappe centrale flexible incluant :
 - au moins une plaque flexible,
 - une couche de revêtement flexible transparente au rayonnement lumineux, ladite couche de revêtement s'étendant sur la plaque flexible,
 - un groupe de diodes lumineuses s'étendant entre la plaque flexible et la couche de revêtement flexible, lesdites diodes lumineuses étant orientées de sorte à générer le rayonnement lumineux dans une direction opposée à la plaque flexible.

[0014] Cette solution permet d'obtenir un photo-bioréacteur plus ergonomique dans lequel l'extraction des dispositifs d'éclairage est facilitée. En effet, la flexibilité de chaque dispositif d'éclairage permet de l'extraire en le déplaçant selon une direction horizontale au-dessus de la cuve, par exemple en le faisant circuler sur des rouleaux d'un convoyeur à rouleau positionné au-dessus de la cuve. Il est ainsi possible de réduire la hauteur nécessaire pour extraire ledit (ou lesdits) dispositif(s) d'éclairage de la cuve par exemple dans le cadre d'une opération de maintenance.

[0015] Cette solution permet également 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.

[0016] En effet, la flexibilité de chaque dispositif d'éclairage permet de le conformer à la géométrie du photo-bioréacteur, et ainsi de maximiser le rapport surface illuminée/volume éclairé directement en contact avec le milieu de culture.

[0017] Par ailleurs, la flexibilité de la (ou des) plaque(s) permet d'améliorer la cinétique de déplacement du milieu dans certaines zones du photo-bioréacteur, notamment en limitant la formation de flux secondaires circulaires autour d'un flux principal d'écoulement du milieu, comme il sera décrit plus en détails dans la suite en référence aux figures.

[0018] Des aspects préférés mais non limitatifs de l'ensemble selon l'invention sont les suivants :

- chaque diode lumineuse peut être une diode électroluminescente organique flexible (OLED), chaque diode lumineuse étant en contact avec une diode lumineuse adjacente ;

- chaque diode lumineuse peut être choisie parmi une diode électro-luminescente conventionnelle (LED), ou une mini diode électro-luminescente (mini LED), les diodes lumineuses étant espacées les unes des autres d'une distance supérieure ou égale à 50µm ;
- chaque bordure transversale peut être flexible de sorte que le cadre périphérique est flexible selon deux directions orthogonales ;
- chaque bordure transversale peut être rigide de sorte que le cadre périphérique est flexible selon une unique direction parallèle aux bordures longitudinales ;
- chaque bordure transversale peut inclure une armature rigide et un brin rigide de longueur inférieure à l'armature rigide, l'armature rigide et le brin étant reliés par une liaison pivot de sorte que le brin est apte à pivoter relativement à l'armature ;
- chaque bordure flexible peut comprendre une succession de segments rigides raccordés entre eux par des liaisons pivot de sorte que chaque segment est apte à pivoter relativement à un segment adjacent ;
- chaque bordure flexible peut consister en un boudin réalisé dans un matériau identique à un matériau constituant la plaque flexible ;
- ledit et au moins un dispositif d'éclairage peut être de forme parallélépipédique, le réacteur incluant une structure support rigide comportant des logements, chaque logement étant destiné à recevoir un dispositif d'éclairage flexible respectif et étant configuré de sorte à recourber le dispositif d'éclairage dans la cuve ;
- chaque diode lumineuse peut comprendre un empilement de structures, chaque structure étant adaptée pour émettre un rayonnement lumineux dans une gamme de longueurs d'onde respective ;
- le réacteur peut également comprendre au moins un contrôleur (6) configuré pour piloter ledit et au moins un module d'alimentation (5) en énergie électrique ;
- ledit et au moins un contrôleur peut être configuré pour contrôler une variation d'énergie fournie par ledit et au moins un module d'alimentation afin de modifier au cours du temps le spectre d'émission dudit et au moins un dispositif d'éclairage ;
- ledit et au moins un contrôleur peut être configuré pour :
 - contrôler l'activation continue dudit et au moins un module d'alimentation en énergie électrique de sorte que ledit et au moins un dispositif d'éclairage (2a, 2b) génère un rayonnement lumineux continu,
 - contrôler l'activation discontinue dudit et au moins un module

d'alimentation en énergie électrique de sorte que ledit et au moins un dispositif d'éclairage (2a, 2b) génère un rayonnement lumineux discontinu sous forme de flashes composé d'une alternance de phases obscures et de phases éclairées, par exemple à une fréquence comprise entre 10 et 50 kHz ;

- le matériau constituant ladite couche de revêtement peut être du verre souple ;
- le matériau constituant la couche de revêtement peut être une résine synthétique ou semi-synthétique choisie parmi les résines (méth)acryliques réticulées, les résines de styrène réticulées, les résines de polyuréthane, les résines de polyester, les résines de silicone, les résines fluorées, les résines préparées à partir de substances inorganiques telles que la silice, le carbonate de calcium et le sulfate de baryum ;
- au moins deux diodes lumineuses de la pluralité de diodes lumineuses peuvent être de tailles différentes ;
- la pluralité de diodes lumineuses peut comprendre :
 - au moins une diode lumineuse à émission ultraviolet, et/ou
 - au moins une diode lumineuse phosphorescente.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES.

[0019] 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 :

- [Fig.1] est une représentation schématique en perspective d'un exemple de bioréacteur ;
- [Fig.2] est une représentation schématique d'un premier exemple d'une nappe centrale d'un dispositif d'éclairage ;
- [Fig.3] est une représentation schématique en coupe transversale d'un exemple de structure de diode lumineuse ;
- [Fig.4] est une représentation schématique de la répartition lumineuse de la lumière émise par une diode électroluminescente conventionnelle (LED) ;
- [Fig.5] est une représentation schématique de la répartition lumineuse de la lumière émise par une diode électroluminescente organique (OLED) ;
- [Fig.6] est une représentation schématique d'un deuxième exemple de nappe centrale d'un dispositif d'éclairage ;
- [Fig.7] est une représentation d'un troisième exemple de nappe centrale d'un dispositif d'éclairage ;
- [Fig.8] est une représentation schématique en coupe transversale d'un bioréacteur de l'art antérieur ;
- [Fig.9] est une représentation schématique partielle d'un écoulement dans le

bioréacteur illustré à la [Fig.8] ;

- [Fig.10] est une représentation schématique en coupe transversale d'une variante de réalisation d'un bioréacteur selon l'invention ;
- [Fig.11] est une représentation schématique d'un système de maintenance de bioréacteur selon l'invention ;
- [Fig.12] est une représentation schématique d'une autre variante de réalisation du bioréacteur selon l'invention ;
- [Fig.13] est un graphique représentant la productivité d'une chlorelle dans la variante de réalisation du bioréacteur illustrée à la [Fig.12] ;
- [Fig.14] est une courbe illustrant la concentration maximum en microalgues en fonction d'un écartement entre deux dispositifs d'éclairage adjacents ;
- [Fig.15] est un schéma de principe illustrant la différence entre un éclairage continu et un éclairage discontinu ;
- [Fig.16] 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,
- [Fig.17] est une représentation schématique en vue de face d'un dispositif d'éclairage,
- [Fig.18] est une représentation schématique en vue de côté d'une bordure de cadre périphérique,
- [Fig.19] est une représentation schématique en vue de dessus d'une bordure de cadre périphérique.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION.

[0020] 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.

[0021] *1. Généralités*

[0022] En référence à la [Fig.1], le bioréacteur peut comprendre :

- une cuve 1 destinée à recevoir une masse à traiter,
- une pluralité de dispositifs d'éclairage 2a-2g,
- une pluralité d'unités de diffusion 3 de dioxyde de carbone (CO₂) sous forme de bulles de gaz ou sous forme d'un fluide constitué de CO₂ dissout dans un milieu aqueux,
- un module d'alimentation 5 en énergie électrique,
- un contrôleur 6 permettant de piloter la pluralité de dispositifs d'éclairage 2a-2g, la pluralité d'unités de diffusion 3, et le module d'alimentation en énergie électrique 5.

- [0023] Chaque dispositif d'éclairage est destiné à être intégré dans la cuve 1 pour le traitement d'un milieu de culture 4 contenu dans la cuve 1. Ces dispositifs d'éclairage 2a-2g sont destinés à être totalement immergés dans le milieu de culture 4. Les dispositifs d'éclairages 2a-2g peuvent être de hauteurs différentes. En variante, les dispositifs d'éclairage 2a-2g peuvent être tous de hauteur identique. Ceci permet de simplifier l'installation des dispositifs d'éclairage par un opérateur.
- [0024] 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 du domaine de la microbiologie.
- [0025] Dans le mode de réalisation illustré à la [Fig.1], le bioréacteur comprend :
- un premier groupe 2a, 2c, 2e, 2g de dispositifs d'éclairage disposés à une distance non nulle du fond de la cuve, et
 - un deuxième groupe 2b, 2d, 2f de dispositifs d'éclairage en contact avec le fond de la cuve.
- [0026] Pour augmenter le brassage et l'homogénéisation de la masse à traiter, les unités de diffusion 3 peuvent être disposées tous les deux dispositifs d'éclairage de sorte que deux unités de diffusion 3 successives sont séparées par deux dispositifs d'éclairages adjacents.
- [0027] Notamment et en référence à la [Fig.1], les unités de diffusion 3 du système d'injection peuvent être disposées périodiquement en aval de chaque dispositif d'éclairage du premier groupe 2a, 2c, 2e, 2g (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, 2c, 2e, 2g, la masse à traiter est entraînée verticalement vers le haut de la cuve 1 (i.e. direction opposée au fond) par les bulles de CO₂ (ou le fluide contenant le CO₂ 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, 2d, 2f et retombe vers le fond de la cuve 1 par gravité. On crée ainsi une circulation de la masse à traiter à travers la cuve 1, ce qui améliore le brassage et l'homogénéisation de la masse à traiter.
- [0028] Le module d'alimentation 5 permet d'alimenter chaque dispositif d'éclairage 2a-2g en énergie électrique. En particulier, chaque dispositif d'éclairage 2a-2g est relié électriquement au module d'alimentation 5 par l'intermédiaire d'un (ou plusieurs) câble(s) de connexion électriquement conducteur(s). L'énergie électrique fournie par le module d'alimentation 5 est alors convertie en rayonnement lumineux par chaque dispositif d'éclairage 2a-2g pour illuminer le milieu de culture 4.
- [0029] Le contrôleur 6 permet de piloter le bioréacteur. Notamment, le contrôleur 6 permet de piloter le module d'alimentation en énergie électrique pour faire varier :

- le (ou les) régime(s) d'excitation de chaque dispositif d'éclairage (par exemple régime continu pour certains dispositifs d'éclairage, et régime flash à une fréquence comprise entre 1 et 150 kHz pour d'autres dispositifs d'éclairage), et/ou
- le (ou les) spectre(s) d'émission de chaque dispositif d'éclairage (par exemple en lumière blanche pour certains dispositifs d'éclairage et en lumière bleue pour d'autres dispositifs d'éclairage), etc.

[0030] Le lecteur appréciera qu'au sein d'un même dispositif d'éclairage, différents régimes d'excitation et/ou spectres d'émission peuvent être mis en œuvre, comme il sera décrit plus en détails dans la suite.

[0031] 2. Cuve

[0032] La cuve 1 est destinée à contenir le milieu de culture 4. Elle comprend un fond et au moins une paroi latérale.

[0033] Dans le mode de réalisation illustré à la [Fig.1], la cuve 1 est sensiblement parallélépipédique. Elle est composée d'un fond, de quatre parois latérales et d'un couvercle au moins partiellement amovible.

[0034] 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.

[0035] 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.).

[0036] 3. Dispositif d'éclairage

[0037] Chaque dispositif d'éclairage est flexible. Le caractère flexible de chaque dispositif d'éclairage permet de le conformer à la forme de la cuve, par exemple en le recourbant (totalement ou partiellement) dans le cas d'une cuve cylindrique.

[0038] Dans le cadre de la présente invention, un composant est dit « flexible » lorsqu'il est constitué dans un matériau ayant des propriétés mécaniques permettant une déformation élastique dudit composant.

[0039] Le matériau flexible peut par exemple avoir :

- un module d'élasticité supérieure à 0.05 Mpa, par exemple compris entre 0.1 Mpa et 300 GPa, et
- une limite à la rupture supérieure à 100 MPa, par exemple compris entre 200 MPa et 5GPa.

[0040] La flexibilité est en outre obtenue grâce à la géométrie du dispositif d'éclairage 2a-2g, en particulier son épaisseur.

[0041] Comme illustré à la [Fig.17], le dispositif d'éclairage 2 flexible comporte :

- un cadre périphérique 51, et
- une nappe centrale 52.

[0042] Comme il sera décrit plus en détail dans la suite, le cadre 51 et la nappe 52 sont flexibles selon au moins une direction.

[0043] *3.1. Cadre périphérique*

[0044] Le cadre périphérique 51 permet de supporter la nappe centrale 52. Comme illustré à la [Fig.17], le cadre périphérique 51 comprend :

- deux bordures longitudinales 511 s'étendant parallèlement l'une à l'autre, et
- deux bordures transversales 512 s'étendant parallèlement aux bordures longitudinales 511,

chaque bordure transversale 511 s'étendant entre une paire d'extrémités libres respective des bordures longitudinales 512.

[0045] Les bordures 511, 512 du cadre périphérique 51 constituent des renforts pour la nappe 52 centrale. Notamment, elles permettent de protéger la nappe 52 centrale lors de la manipulation du dispositif d'éclairage 2, et limite ainsi les risques de dégradation de la nappe 52 centrale.

[0046] Par ailleurs les bordures 511, 512 peuvent permettre de contraindre la nappe 52 selon une forme souhaitée en l'absence de sollicitation extérieure. Par exemple, dans le mode de réalisation illustré à la [Fig.17], les bordures 511, 512 permettent de conformer la nappe 52 centrale dans un plan lorsque le dispositif d'éclairage est suspendu (et qu'aucune force n'est appliquée sur les bordures pour courber le dispositif d'éclairage).

[0047] A cet effet, les bordures peuvent être rigides ou présenter une flexibilité non nulle. Pour contraindre la forme de la nappe lorsque sa flexibilité est non nulle, chaque bordure 511, 512 présente un coefficient de raideur supérieur au coefficient de raideur de la nappe centrale 52. Dans la suite, on qualifiera de « bordure flexible » chaque bordure 511, 512 de flexibilité non-nulle, même si le coefficient de raideur de ladite bordure est supérieur au coefficient de raideur de la nappe 52 centrale.

[0048] Dans certains modes de réalisation, les quatre bordures 511, 512 sont flexibles. Dans ce cas, le cadre périphérique 51 est flexible selon deux directions orthogonales D1, D2.

[0049] Dans d'autres modes de réalisation, uniquement deux bordures 511 parallèles (par exemple les bordures longitudinales) sont flexibles, les deux autres bordures 512 (par exemple les bordures transversales) étant rigides. Dans ce cas, le cadre périphérique 51 est flexible selon une unique direction. Le fait que le cadre périphérique 52 soit flexible uniquement selon une direction permet d'améliorer sa tenue (maintien en forme) dans une direction orthogonale à son déplacement lorsque le dispositif d'éclairage est manipulé, par exemple dans le cadre d'une opération de maintenance.

[0050] Chaque bordure 511 peut être rigide sur une partie seulement de sa longueur. Par exemple, dans le mode de réalisation illustré à la [Fig.19], chaque bordure transversale

512 est composée d'une armature rigide 512' et d'un brin 512'' de longueur inférieure à l'armature rigide 512', l'armature rigide 512' et le brin 512'' étant reliés par une liaison pivot 512''' de sorte que le brin 512'' peut se déplacer en rotation relativement à l'armature rigide 512'. Ceci permet de créer une ailette (formant déflecteur) au niveau d'un bord transversal du dispositif d'éclairage 2, par exemple pour améliorer le brassage de la masse à traiter, etc.

[0051] En référence à la [Fig.18], chaque bordure flexible 511 peut consister en une succession de segments rigides 513 raccordés entre eux par des liaisons pivot 514 permettant à chaque segment de pivoter autour d'un axe de la liaison pivot relativement à l'un au moins des segments qui lui sont adjacents. Ceci permet de recourber l'extrémité du dispositif d'éclairage pour le conformer à la géométrie du photo-bioréacteur, comme il sera décrit plus en détails dans la suite en référence aux figures 8 à 10. En variante, chaque bordure flexible peut consister en un boudin réalisé dans le même matériau que la plaque. Ceci permet de simplifier la conception de chaque dispositif d'éclairage. Notamment le matériau constituant chaque bordure flexible peut être du poly-méthacrylate de méthyle (PMMA), ou une résine méthacrylique (telle que le méthacrylate de méthyle, le éthacrylate d'éthyle, le méthacrylate de butyle, le méthacrylate de propyle ou d'isopropyle), ou une résine de type polystyrène, polycarbonate, polyacrylate.

[0052] Avantagusement, une structure support rigide (non représentée) comportant des logements dans chacun desquels sont logés un dispositif d'éclairage flexible respectif peut être prévue dans la cuve.

[0053] Une telle structure support – dont chaque logement peut être défini par un (ou plusieurs) rail(s) de guidage dans lequel (lesquels) le dispositif d'éclairage associé est apte à coulisser – permet de conformer le dispositif d'éclairage flexible afin de recourber son extrémité dans le photo-bioréacteur.

[0054] 3.2. Nappe centrale

[0055] En référence aux figures 2, 6 et 7, la nappe 52 du dispositif d'éclairage 2 comprend :

- une plaque 21 flexible, et
- au moins une diode lumineuse 22, 22a, 22b, 22c montée(s) sur la (ou les) plaque(s) 21 flexible(s).

[0056] Par exemple dans le mode de réalisation illustré à la [Fig.2], le dispositif d'éclairage 2 comprend une unique diode lumineuse 22 (par exemple d'une superficie de 6m²).

[0057] En variante et comme illustré aux figures 6 et 7, chaque dispositif d'éclairage 2 comprend une pluralité de diodes lumineuses 22, 22a, 22b, 22c (ayant chacune une superficie comprise entre 0.01 m² et 6m²).

[0058] Chaque diode lumineuse 22, 22a, 22b, 22c peut être collée sur la plaque flexible 21.

[0059] En variante, chaque diode lumineuse 22, 22a, 22b, 22c peut être feuilletée sur la

plaque flexible 21 à l'aide d'un intercalaire de feuilletage.

[0060] 3.2.1. Plaque flexible

[0061] Chaque plaque 21 flexible peut être sensiblement rectangulaire. Toutefois, chaque plaque 21 peut présenter une autre forme.

[0062] Le matériau constituant chaque plaque 21 peut être du poly-méthacrylate de méthyle (PMMA) ou un autre matériau transparent connu de l'homme du métier qui permet à la plaque 21 de conduire – par transmission entre ses faces avant et arrière – le flux lumineux émis par la (ou les) diode(s) lumineuse(s), comme par exemple :

- une autre résine méthacrylique transparente telle que le méthacrylate de méthyle, le méthacrylate 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.

[0063] En variante, le matériau constituant chaque plaque 21 peut être un métal.

[0064] Dans certaines variantes de réalisation, la plaque peut comprendre une couche de matériau réfléchissant le flux lumineux généré par la (ou les) diode(s) lumineuse(s). Cette couche de matériau réfléchissant s'étend de préférence entre la plaque 21 et la (ou les) diode(s) lumineuse(s). Elle permet de réfléchir, orienter et focaliser la lumière produite par la (ou les) diode(s) lumineuse(s). La couche de matériau réfléchissant peut consister en un film de matériau réfléchissant tel qu'un film métallisé d'aluminium, ou une peinture.

[0065] 3.2.2. Diode lumineuse

[0066] 3.2.2.1. Structure

[0067] Chaque diode lumineuse comporte une (ou plusieurs) couche(s) de matériau(x) électroluminescent(s) encadrée(s) par deux électrodes :

- l'une des électrodes – appelée anode – est agencée sous la (ou chaque) couche de matériau électroluminescent, et
- l'autre des électrodes – appelée cathode – est agencée sur la (ou chaque) couche de matériau électroluminescent à l'opposé de l'anode.

[0068] Il sera entendu dans la suite que lorsqu'une couche A est mentionnée comme étant « *sur* » (respectivement « *sous* ») une couche B, celle-ci peut être directement sur (respectivement sous) la couche B, ou peut être située au-dessus (respectivement au-dessous) de la couche B et séparée de ladite couche B par une ou plusieurs couches intermédiaires. Par ailleurs, il sera entendu que lorsqu'une couche A est mentionnée comme étant « *sur* » (respectivement « *sous* ») une couche B, celle-ci peut recouvrir totalement ou partiellement la couche B (respectivement être recouverte totalement ou partiellement par la couche B).

[0069] Chaque diode lumineuse émet de la lumière par électroluminescence en utilisant

l'énergie de recombinaison de trous injectés depuis l'anode et d'électrons injectés depuis la cathode.

[0070] Avantageusement l'anode et la cathode peuvent être constituées dans un matériau transparent, de sorte que les photons émis traversent chaque électrode pour fournir de la lumière en dehors de la diode lumineuse par ses deux faces.

[0071] En référence à la [Fig.3], on a illustré un exemple de structure pour chaque diode électroluminescente. Cette structure comprend :

- une première électrode 221 en contact avec la plaque flexible 21,
- une unité d'émission rouge 222 directement sur la première électrode 221 et recouverte d'une gamme chimique qui émet dans le rouge,
- une deuxième électrode 223 directement sur l'unité d'émission rouge 222,
- une unité d'émission verte 224 directement sur la deuxième électrode 223 et recouverte d'une gamme chimique qui émet dans le vert,
- une troisième électrode 225 directement sur l'unité d'émission verte 224,
- une unité d'émission bleue 226 directement sur la troisième électrode 225 et recouverte d'une gamme chimique qui émet dans le bleu,
- une quatrième électrode 227 directement sur l'unité d'émission bleue 226.

[0072] Le fait d'empiler plusieurs unités d'émission 222, 224, 226 permet de pouvoir faire varier le spectre d'émission du rayonnement lumineux émis par la diode lumineuse.

[0073] Plus précisément, avec une telle structure la couleur des rayonnements lumineux émis par la diode lumineuse peut être modifiée pour la rendre particulièrement adaptée à une méthode de maturation ou de de croissance spécifique, comme il sera décrit plus en détails dans la suite.

[0074] Chaque diode lumineuse 22, 22a, 22b, 22c peut être choisie parmi :

- une Diode Electro-Luminescente conventionnelle DEL (ou « *LED* » selon l'acronyme anglo-saxon « *Light-Emitting Diode* »),
- une Diode Electro-Luminescente organique DELO flexible (ou « *OLED* » selon l'acronyme anglo-saxon « *Organic Light-Emitting Diode* »),ou
- une mini Diode Electro-Luminescente (ou « *mini LED* » selon l'acronyme anglo-saxon « *Mini Light-Emitting Diode* »).

[0075] Le caractère flexible des diodes lumineuses de type OLED permet de conserver la flexibilité des dispositifs d'éclairage même lorsque les diodes lumineuses de type OLED (disposées sur la plaque flexible) sont en contact les unes avec les autres.

[0076] Lorsque les diodes lumineuses sont d'un type autre qu'une OLED, celles-ci sont espacées les unes des autres d'une distance suffisante pour permettre de plier le dispositif d'éclairage selon un angle supérieur ou égal à 60°, préférentiellement selon un angle supérieur ou égal à 90°, plus préférentiellement selon un angle supérieur ou égal à 120°, et encore plus préférentiellement selon un angle égal à 180°. Notamment,

les diodes lumineuses peuvent être espacées les unes des autres d'une distance supérieure ou égale à 50µm.

[0077] L'utilisation de diodes lumineuses de type mini LED permet de disposer de sources lumineuses plus petites que les diodes lumineuses de type LED conventionnelles (taille inférieure à 500 µm), ce qui permet d'augmenter le nombre de sources lumineuses par unité de surface (amélioration de la luminosité et du contraste), et de réduire l'épaisseur des dispositifs d'éclairage.

[0078] 3.2.2.2. Avantage associé à l'utilisation d'OLED

[0079] Comme illustré aux figures 4 et 5, l'utilisation de diodes lumineuses de type OLED 22 flexibles permet d'augmenter l'homogénéité de la lumière 228 émise par le dispositif d'éclairage selon l'invention en comparaison à la lumière 92 émise par une diode lumineuse de type LED 91 conventionnelle.

[0080] En particulier :

- l'angle incident 2α de la lumière 92 émise par une diode lumineuse de type LED 91 est de 120° , comme illustré à la [Fig.4], tandis que
- l'angle incident 2α de la lumière 228 émise par une diode lumineuse de type OLED flexible est de 178° , comme illustré à la [Fig.5].

[0081] Ainsi, l'utilisation de diodes lumineuses de type OLED assure une meilleure homogénéité de la lumière, et permet d'optimiser le volume éclairé dans le bioréacteur.

[0082] 3.2.3. Couche de revêtement extérieur

[0083] En référence à la [Fig.3], chaque dispositif d'éclairage 2 peut optionnellement comprendre une couche de revêtement 23 externe recouvrant la (ou les) diode(s) lumineuse(s) et éventuellement la (ou les) plaque(s) 21 flexible(s).

[0084] Cette couche de revêtement 23 permet de protéger la (ou les) diode(s) lumineuse(s) et la (ou les) plaque(s) 21 contre d'éventuelles agressions mécaniques (rayures dues à un frottement, etc.). Elle permet en outre d'assurer l'étanchéité du dispositif d'éclairage.

[0085] Dans certaines variantes de réalisation, la couche de revêtement 23 permet également d'améliorer la diffusion de la lumière émise par la (ou les) diode(s) lumineuse(s). En effet, lorsque la lumière est appliquée sur un matériau, une partie de la lumière se réfléchit, une partie est absorbée et une autre partie est transmise au travers. Ces paramètres peuvent être déterminées par l'homme du métier à l'aide de méthodes classiques de photométries et d'optiques. Dans le cadre de la présente invention, la couche de revêtement externe 23 peut être une couche de transmission permettant de favoriser la transmission des rayonnements lumineux émis par la (ou les) diode(s) lumineuse(s) vers l'extérieur. Notamment, le matériau constituant la couche de revêtement 23 peut être une résine incluant des particules transparentes, en particulier une résine thermoplastique. Dans ce dernier cas, la résine être une résine synthétique ou semi-synthétique et être choisie parmi les résines (méth)acryliques réticulées, les

résines de styrène réticulées, les résines de polyuréthane, les résines de polyester, les résines de silicone, les résines fluorées, les résines préparées à partir de substances inorganiques telles que la silice, le carbonate de calcium et le sulfate de baryum. Parmi ces résines, les résines synthétiques sont préférées, en particulier, les résines (méth)acryliques réticulées, les résines de styrène réticulées, les résines de copolymères (méth)acrylique - styrène réticulé et les résines de silicone sont préférées. Les résines (méth)acryliques réticulées, les résines de styrène réticulées et leurs copolymères sont tout particulièrement préférés car il est possible d'éviter leur décoloration par les rayons ultraviolets notamment par des procédés de réticulation. Ces dernières présentent donc une meilleure durée de vie que les autres résines. De préférence, la couche de revêtement 23 comprend un matériau diffusant ayant une / transmittance de préférence d'au moins 90 %, encore préférentiellement d'au moins 95%, toujours encore préférentiellement comprise entre 95% et 98%.

- [0086] De préférence, lorsque la couche de revêtement a pour fonction d'améliorer la diffusion de la lumière émise par la (ou les) diode(s) lumineuse(s), celle-ci est configurée pour que la lumière émise par le dispositif lumineux ait un degré de dispersion de préférence supérieur ou égal à 170° , encore préférentiellement supérieur ou égal à 175° , toujours encore préférentiellement comprise entre 175° et 180° .
- [0087] Avantageusement, la couche de revêtement 23 peut également avoir une fonction de filtrage des longueurs d'ondes de la lumière émise par le dispositif d'éclairage. Notamment le matériau constituant la couche de revêtement peut être choisi pour permettre la transmission des rayonnements lumineux dont les longueurs d'onde sont comprises entre 380nm et 800 nm, de préférence entre 400 nm et 720 nm, encore plus préférentiellement entre 420 et 690 nm.
- [0088] De préférence, l'épaisseur de la couche de revêtement 23 est comprise entre 0,1 mm et 5,0 mm, préférentiellement comprise entre 0,5 mm à 3,0 mm, encore plus préférentiellement comprise entre 0,5 mm et 2,0 mm. Pour une même épaisseur, un dispositif d'éclairage selon l'invention comprenant une couche de revêtement 23 en matériau diffusant flexible tel que défini ci-dessus, présente une meilleure capacité de diffusion que les dispositifs lumineux de l'art antérieur et donc un meilleur rendement W/Lumen/unité de surface. Ainsi, pour un rendement en biomasse de microorganisme équivalent, un procédé de culture utilisant un bioréacteur comprenant un dispositif d'éclairage selon l'invention exigera moins d'énergie électrique. Par ailleurs, le dispositif d'éclairage décrit ci-dessus est plus sûr car il ne nécessite que de faibles voltages.
- [0089] La couche de revêtement 23 peut également être constituée dans un matériau (ou être recouverte d'un matériau) limitant sa salissure (notamment en empêchant le dépôt de microalgues sur sa surface). La couche de revêtement 23 peut par exemple consister en

un verre souple de type Corning (d'épaisseur comprise entre 0.1mm à 0.7mm). Un tel revêtement étanche en verre permet en outre un meilleur échange de la chaleur émise par la (ou les) diode(s) lumineuse(s) vers le milieu de culture (ce qui peut favoriser sa croissance de microorganismes contenus dans le milieu de culture 4). Un tel revêtement étanche en verre constitue en outre une meilleure barrière aux gaz injectés dans le bioréacteur.

[0090] 3.2.4. Exemples de dispositif d'éclairage

[0091] En référence aux figures 6 et 7, d'autres exemples de dispositif d'éclairage sont illustrés.

[0092] Dans ces modes de réalisation, la nappe centrale du dispositif d'éclairage 2 comprend une plaque flexible 21 et une pluralité de diodes lumineuses 22, 22a, 22b, 22c montées sur la plaque flexible 21.

[0093] L'utilisation d'une pluralité de diodes lumineuses 22, 22a, 22b, 22c permet d'améliorer la modularité du dispositif d'éclairage 2, et notamment de faire varier sa taille et ses dimensions afin de les adapter à la taille et aux dimensions de la cuve 1.

[0094] Dans le mode de réalisation illustré à la [Fig.6], les diodes lumineuses sont de taille identique, et de structure identique.

[0095] En variante, les diodes lumineuses peuvent être de taille et/ou de type (LED, OLED, mini LED), et/ou de structure différentes, comme illustré à la [Fig.7].

[0096] Par exemple, chaque dispositif d'éclairage 2 peut comprendre :

- une (ou plusieurs) diode(s) lumineuse(s) fluorescente(s) 22a,
- une (ou plusieurs) diode(s) lumineuse(s) à émission ultraviolet 22b (par exemple « UVOLED », acronyme de l'expression anglo-saxonne « Ultra-Violet Organic Light-Emitting Diodes »), et/ou
- une (ou plusieurs) diode(s) lumineuse(s) phosphorescente(s) 22c (par exemple « PHOLED », acronyme de l'expression anglo-saxonne « Phosphorescent Organic Light-Emitting Diodes »).

[0097] La présence d'une (ou plusieurs) diode(s) lumineuse(s) à émission ultraviolet 22b permet l'émission d'un rayonnement UV-C pour stériliser le milieu de culture, et/ou éliminer une culture contaminée dans un compartiment du bioréacteur et/ou provoquer un stress métabolique du milieu de culture.

[0098] 3.2.5. Avantages du dispositif d'éclairage selon l'invention

[0099] Le caractère flexible du dispositif d'éclairage permet de délimiter un chemin de circulation pour le milieu de culture dans lequel :

- les pertes de charge dans le flux de circulation du milieu de culture sont réduites,
- les zones non éclairées le long de ce chemin de circulation sont limitées.

[0100] Ces phénomènes vont maintenant être présenté en référence aux figures 8 à 10 pour

permettre à l'homme du métier de mieux comprendre les avantages associés à l'utilisation de dispositif d'éclairage flexible.

[0101] En référence à la [Fig.8], lorsque des dispositifs d'éclairage 7a-7i non flexibles sont intégrés dans une cuve 1 parallélépipédique (du type comprenant un fond, quatre parois latérales et un couvercle), ceux-ci sont classiquement disposés transversalement à la longueur de la cuve, et décalés verticalement pour venir en contact successivement avec le couvercle et le fond de la cuve 1. Ainsi :

- un dispositif d'éclairage 7b, 7d, 7f, 7h en contact avec le fond de la cuve 1 est adjacent à deux dispositifs d'éclairage 7a, 7c, 7e, 7g, 7i en contact avec le couvercle de la cuve 1,
- un dispositif d'éclairage 7a, 7c, 7e, 7g, 7i en contact avec le couvercle de la cuve 1 est entouré par deux dispositifs d'éclairage 7b, 7d, 7f, 7h en contact avec le fond de la cuve 1.

[0102] Ceci permet de délimiter un chemin de circulation en créneau pour le milieu de culture 4.

[0103] Or une telle forme en créneau induit la présence de « zone d'ombre » 8 le long du chemin de circulation, à savoir de zones au niveau desquelles le milieu de culture 4 n'est pas (ou pas suffisamment) éclairé.

[0104] Par ailleurs, cette forme en créneau induit des pertes de charge. En particulier et comme illustré à la [Fig.9], lors du passage entre deux créneaux successifs du chemin de circulation, l'écoulement (ou flux) principal F_p du milieu de culture se subdivise, chaque subdivision formant un flux secondaire circulaire F_s qui se recombine avec l'écoulement principal F_p , puis se subdivise à nouveau et ainsi de suite. Cette succession de subdivisions et de recombinaisons des flux secondaires F_s avec l'écoulement principal F_p induit des pertes de charge.

[0105] La flexibilité des dispositifs d'éclairage 2a-2j selon l'invention permet de recourber l'extrémité du dispositif d'éclairage afin de former un chemin d'accès composé d'une succession de segments arrondis à leurs extrémités, comme illustré à la [Fig.10].

[0106] Il est ainsi possible d'éclairer le milieu à la jonction entre deux segments successifs, ce qui réduit les « zones d'ombres » le long du chemin de circulation.

[0107] Par ailleurs, la forme arrondie en U (obtenue en recourbant l'extrémité des dispositifs d'éclairage successifs) permet de limiter les pertes de charge à la jonction entre deux segments successifs.

[0108] 3.3. Module d'alimentation en énergie électrique et Contrôleur

[0109] Comme indiqué précédemment, le module d'alimentation 5 illustré aux figures 1 et 2 permet de fournir l'énergie électrique nécessaire à la génération d'un rayonnement lumineux par chaque diode lumineuse 22, 22a, 22b, 22c.

[0110] Chaque dispositif d'éclairage 2 peut être raccordée indépendamment au module

d'alimentation 5 en énergie électrique. Ceci permet de retirer individuellement chaque dispositif d'éclairage 2 du bioréacteur pendant le fonctionnement de celui-ci.

- [0111] Lorsque le dispositif d'éclairage comprend une pluralité de diodes lumineuses, chaque diode lumineuse peut être individuellement raccordée au module d'alimentation 5. Plus précisément, le module d'alimentation 5 est connecté électriquement aux électrodes de chaque diode lumineuse. Ceci permet de contrôler individuellement le rayonnement lumineux émis par chaque diode lumineuse.
- [0112] A cet effet, le module d'alimentation 5 est en communication (avec ou sans fil) avec le contrôleur 6 qui est configuré pour émettre des signaux de commande permettant notamment :
- d'activer/désactiver sélectivement chaque diode lumineuse du dispositif d'éclairage, par exemple en fonction d'un taux de remplissage du bioréacteur ; il est ainsi possible d'optimiser l'efficacité du bioréacteur ainsi que sa montée en puissance électrique,
 - de définir individuellement le régime d'excitation (régime continu ou flash) de chaque diode lumineuse.
- [0113] Par ailleurs, la présence d'un contrôleur connecté aux diodes lumineuses permet de détecter un éventuel défaut d'une (ou de plusieurs) diode(s) lumineuse(s). Cette détection permet de localiser la (ou les) diode(s) lumineuse(s) défectueuses afin de la (ou les) remplacer le cas échéant.
- [0114] Lorsque la (ou les) diode(s) lumineuse(s) du dispositif d'éclairage flexible présente(nt) la structure illustrée à la [Fig.3], le contrôleur 6 et le module d'alimentation 5 permettent en outre de définir individuellement le spectre d'émission (lumière blanche, bleu, rouge, verte, etc.) de chaque diode lumineuse.
- [0115] En effet, dans ce cas, le module d'alimentation 5 est raccordé électriquement aux première, deuxième, troisième et quatrième électrodes 221, 223, 225, 227. Pour faire varier le spectre d'émission de chaque diode lumineuse, le contrôleur 6 contrôle la quantité d'énergie électrique fournie par le module d'alimentation 5 à chacune des première deuxième, troisième et quatrième électrodes 221, 223, 225, 227, afin de moduler l'intensité du rayonnement émis par chaque unité d'émission 222, 224, 226 respective. En se mélangeant, les rayonnements lumineux rouge, vert et bleu émis par les unités d'émission permettent alors d'obtenir un spectre spécifique (lumière blanche, jaune, violette, etc.) adapté à une application donnée.
- [0116] Par exemple la croissance d'une microalgue de type *Oscillatoria* sp est plus rapide dans le cas d'un rayonnement lumineux dont les longueurs d'onde sont comprises dans un spectre bleu. De même, les pigments de chlorophylle et de caroténoïde sont eux observés à forte concentration dans des rayonnements lumineux bleus. Pour induire l'émission d'une lumière bleue par une diode lumineuse, le contrôleur 6 commande au

module d'alimentation 5 d'alimenter uniquement en énergie électrique les troisième et quatrième électrodes 225, 227 entre lesquelles s'étend l'unité d'émission bleue 226.

- [0117] La croissance d'une microalgue de type *Ankistrodesmus* est quant à elle plus rapide dans le cas d'un rayonnement lumineux vert. Pour induire l'émission d'une lumière verte par une diode lumineuse, le contrôleur 6 commande au module d'alimentation 5 de n'alimenter en énergie électrique que les deuxième et troisième électrodes 223, 225 entre lesquelles s'étend l'unité d'émission verte 224.
- [0118] L'accumulation de lipides est élevée dans un rayonnement lumineux de couleur jaune par rapport aux autres rayonnements lumineux chez *Ankistrodesmus*. Pour induire l'émission d'une lumière jaune par une diode lumineuse, le contrôleur 6 commande au module d'alimentation 5 d'alimenter uniquement en énergie électrique les première deuxième et troisième électrodes 221, 223, 225 entre lesquelles s'étendent les unités d'émission rouge et verte 222, 224. Le mélange des rayonnements lumineux rouge et vert issus des unités d'émission rouge et verte 222, 224 produit alors une lumière jaune.
- [0119] Il est également possible de privilégier l'émission de rayonnement lumineux dans le spectre ultraviolet afin de stimuler la production de vitamine, notamment la vitamine D3.
- [0120] Ainsi, la combinaison d'une diode lumineuse incluant un empilement de structures 222, 224, 226, d'un module d'alimentation 5 (raccordé à la diode lumineuse) et d'un contrôleur 6 (pilotant le module d'alimentation 5) permet de moduler le spectre d'émission de la diode lumineuse.
- [0121] Avantageusement cette modulation du spectre d'émission de la diode lumineuse peut varier au cours du temps, pour s'adapter à des conditions de croissance de biomasse et/ou de stress et/ou de production de métabolites.
- [0122] Par exemple, un utilisateur du bioréacteur selon l'invention peut :
- à un stade initial, moduler le spectre d'émission des diodes lumineuses de sorte à induire l'émission de rayonnements lumineux de couleur bleue afin d'augmenter la croissance de microalgues, puis
 - à un stade ultérieur, modifier le spectre d'émission des diodes lumineuses de sorte à induire l'émission de rayonnements lumineux de couleur jaune afin d'augmenter l'accumulation de lipides par les microalgues.
- [0123] *3.4. Unité de diffusion*
- [0124] Les unités de diffusion 3 illustrées à la [Fig.1] permettent d'alimenter le bioréacteur en nutriment, notamment en CO₂.
- [0125] En particulier, les unités de diffusion 3 permettent :
- de fournir le dioxyde de carbone nécessaire au développement du milieu de culture 4, et

- de mettre en suspension les particules supports de microorganismes contenus dans le milieu de culture.
- [0126] L'apport de dioxyde de carbone peut être continu ou discontinu en réponse à certains critères tels que le temps ou le pH. 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.
- [0127] L'introduction de dioxyde de carbone sous forme de bulles de gaz permet une meilleure répartition du CO₂ dans la cuve 1.
- [0128] Les unités de diffusion 3 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. :
- dans le cas de CO₂ gazeux, les unités de diffusion 3 peuvent consister en des têtes de micro-bulage pour la diffusion de bulle de différents diamètres,
 - dans le cas de CO₂ dissout dans un milieu aqueux, les unités de diffusion 3 peuvent consister en des buses d'éjection de fluide pour la diffusion du fluide contenant du CO₂ dissout.
- [0129] Les unités de diffusion 3 peuvent également comprendre un contacteur membranaire. Un contacteur membranaire est un dispositif comprenant au moins deux circuits de circulation de fluides séparés par une membrane de transfert. Les fluides circulants dans ledit contacteur membranaire sont aussi désignés sous le nom de fluide(s) de circulation. Le contacteur membranaire comprend ainsi un premier circuit de circulation d'un premier fluide de circulation pour l'alimentation en dioxyde de carbone (CO₂), appelé fluide d'alimentation en CO₂ en contact avec une première face de la membrane de transfert, et un deuxième circuit de circulation d'un deuxième fluide de circulation pour la réception du CO₂, appelé fluide de réception en CO₂, en contact avec la deuxième face de la membrane de transfert. Chaque circuit de circulation de fluide est indépendant l'un de l'autre, et peuvent être fermé ou ouvert. Un tel contacteur membranaire associé à un réacteur est notamment décrit dans la demande internationale PCT/EP2022/087329.
- [0130] Chaque unité de diffusion 3 est de préférence disposée au voisinage immédiat du fond de la cuve 1. 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.
- [0131] Les unités de diffusion 3 sont connectées à une unité d'amenée de CO₂ – tel qu'un surpresseur (dans le cas de CO₂ gazeux) ou une pompe (de type turbine dans le cas de

CO₂ 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 CO₂. Une telle unité d'amenée de CO₂ est connue de l'homme du métier et ne sera pas décrite plus en détails dans la suite.

[0132] 4. Système de maintenance

[0133] Le caractère flexible du (ou des) dispositif(s) d'éclairage contenu(s) dans la cuve permet également de faciliter la maintenance du bioréacteur selon l'invention.

[0134] En référence à la [Fig.11], un exemple de système de maintenance est illustré. Ce système comprend :

- une grue montée sur un châssis fixe ou mobile, et
- un outil de préhension 100 (crochet, grappin, ou analogue) monté à l'extrémité libre de la grue,
- une pluralité de rouleaux de guidage 101, 102 pour le déplacement par roulement de chaque dispositif d'éclairage 2.

[0135] Chaque dispositif d'éclairage 2 comprend un élément de saisie (telle qu'une cavité) destiné à coopérer avec l'outil de préhension 100 du système de maintenance. Le principe de fonctionnement du système de maintenance est le suivant.

[0136] Dans une première étape, l'outil de préhension 100 est fixé à l'élément de saisie du dispositif d'éclairage 2. Une fois fixé, l'outil de préhension 100 est déplacé dans une direction verticale vers l'extérieur de la cuve 1.

[0137] Dans une deuxième étape, l'outil de préhension 100 est déplacé horizontalement entre un rouleau inférieur 101 et un rouleau supérieur 103 de la pluralité de rouleaux de guidage 101, 102 disposés au-dessus de la cuve 1. Le dispositif d'éclairage 2 se courbe à 90°. Une partie supérieure du dispositif d'éclairage 2 (située entre le rouleau inférieur 101 et un bord supérieur du dispositif d'éclairage 2) se déplace alors dans une direction horizontale, tandis qu'une partie inférieure (située entre le rouleau inférieur 101 et un bord inférieur du dispositif d'éclairage 2) se déplace verticalement vers le haut.

[0138] Dans une troisième étape, lorsque la totalité du dispositif d'éclairage 2 s'étend horizontalement entre la pluralité de rouleaux de guidage 101, 102, l'outil de préhension 100 est immobilisé.

[0139] Ainsi, le caractère flexible du (ou des) dispositif(s) d'éclairage 2 permet de réduire la hauteur nécessaire pour extraire ledit (ou lesdits) dispositif(s) d'éclairage 2 de la cuve 1 pour la mise en œuvre d'une opération de maintenance.

[0140] 5. Caractéristiques du photo-bioréacteur

[0141] On va maintenant décrire différents aspects relatifs à un dimensionnement du bio-réacteur permettant l'utilisation optimale du flux lumineux issu des dispositifs d'éclairage.

[0142] 5.1. Modèle de captation de photons

[0143] 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.

[0144] 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.

[0145] Le modèle global du rendement surfacique d'un photo-bioréacteur est le suivant :

[0146]

$$\begin{aligned} \langle r_x \rangle_{\max} &= (1-f_d) \rho_M \bar{\varphi} \frac{2\alpha}{1+\alpha} a_{\text{light}} \frac{K}{\left(\frac{\bar{n}+2}{\bar{n}+1}\right)} \ln \left[1 + \frac{\left(\frac{\bar{n}+2}{\bar{n}+1}\right) \bar{q}_0}{K} \right] \\ &= (1-f_d) \rho_M \bar{\varphi} (A)_{\max} \frac{K}{\left(\frac{\bar{n}+2}{\bar{n}+1}\right) \bar{q}_0} \ln \left[1 + \frac{\left(\frac{\bar{n}+2}{\bar{n}+1}\right) \bar{q}_0}{K} \right] \end{aligned}$$

[0147] 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 volume,
- K correspond à une constante de demi-saturation de la photosynthèse (dépend du micro-organisme),
- $\bar{n}$ correspond au degré de collimation moyen du rayonnement incident,
- $\bar{q}_0$ est la densité de flux moyenne de photon sur la surface du bioréacteur.

[0148] Les performances maximales d'un photo-bioréacteur peuvent être caractérisées par quelques simplifications des constantes dans un cas idéal.

[0149] Par conséquent la production dépendra des éléments suivants :

- La fraction sombre « S_x », qui correspond au ratio volumique non éclairé ($f_d=0$) : $S_x = (1-f_d) \ln(1+q/K)$ en $\text{kg/m}^2/\text{J}$
- Où q est la densité de flux moyenne de photon sur la surface du bioréacteur (s'exprime en $\mu\text{molphotons/s/m}^2$), et où K est la constante de demi-saturation de la photosynthèse ($30000 \mu\text{mol/kgx/s}$),
- La production surfacique « P_x » dû à la captation du flux de photons

surfacique capté : $P_x = S_x * a_{\text{Lumière}}$ en $\text{kg/m}^3/\text{J}$ avec facteur correctif de 20%

- La production volumique en fonction du flux de photons surfacique capté rapporté au volume total : $a_{\text{Lumière}} = S_{\text{Lumière}}/V_r$, où V_r est le volume du bio-réacteur.

[0150] En appliquant les règles de calcul précédentes pour :

- une plaque d'acrylique de 0.1m de large et 0.1m de long
- une lumière incidente de $350\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$,
- 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 139 mg/L/J , comme illustré par le tableau ci-dessous.

[0151] [Tableaux1]

Cas géométrie réacteur		
Longueur	0,40	m
Largeur	0,20	m
Surface éclairée	0,08	m^2
Qn	350,00	$\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$
K	30000,00	$\mu\text{mol/kgx/s}$
Vr	0.008	m^3
A lumiere	10	m^1
fd	0,00	nd
Sx	0,01	$\text{Kg/m}^2/\text{J}$
Px	0,08	$\text{Kg/m}^3/\text{J}$
Px correction	0,13918963	$\text{Kg/m}^3/\text{J}$
Production max théorique	139	mg/L/J

[0152] Ceci est confirmé lors d'une expérience en utilisant le bioréacteur illustré à la [Fig.12] qui comprend une cuve 1 parallélépipédique, huit dispositifs d'éclairage de 0,1 m de cotés (0.01 m^2) et incluant chacun une WOLED (White OLED) mis en contact sur cinq faces de la cuve.

[0153] Une production moyenne de 172 mg/L/J sur 55 heures (minimum : 100 mg/L/J , maximum : 230 mg/L/J) est obtenue, comme illustré sur la [Fig.13] qui représente un

graphique récapitulatif de la productivité d'une chlorelle dans le bioréacteur illustré à la [Fig.12].

[0154] L'ajout d'air avec 2% de CO₂ assure le brassage et apporte du carbone.

[0155] 5.2. Détermination de la quantité de dispositifs d'éclairage optimale

[0156] 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.

[0157] Pour produire 711 mg/L/J de biomasse par m³ de culture dans un volume de 1 m³, en appliquant les formules de la modélisation globale décrite ci-dessus, 24 m² de dispositifs d'éclairage émettant 750 µmol/m²/s sont nécessaires.

[0158] Ce nombre est directement lié au rendement, volume, géométrie et intensité lumineuse souhaités.

[0159] On obtient le tableau suivant :

[0160] [Tableaux2]

Cas géométrie réacteur		
Surface Colonne Ext	24,00	M ²
Q _n	750,00	µmol/m ² /s
K	30000,00	µmol/kgx/s
V _r	1,00	m ³
a _{light}	24	m ¹
f _d	0,00	Nd
S _x	0,02	Kg/m ² /J
P _x continu	0,59	Kg/m ³ /J
P _x continu correction rdt	0,71114724 3	Kg/m ³ /J
Production max théorique	711	mg/L/J

[0161] 5.3. Détermination d'une quantité maximale de biomasse à ne pas dépasser

[0162] L'objectif est de déterminer la concentration maximum de biomasse à ne pas dépasser afin de ne pas avoir de zone sombre dans le milieu (i.e. maintenir un f_d=0),

[0163] Dans la suite, on considère un bioréacteur ayant une cuve présentant les dimensions suivantes : 1 mètre x 1 mètre x 1 mètre (L*I*H en mètres). Le volume de la cuve est donc de 1 m³

[0164] On suppose également que chaque dispositif d'éclairage a des dimensions de 1 mètre

par côté et émet sur ses deux faces. La surface émettrice de chaque dispositif d'éclairage est donc de 2 m².

[0165] [Tableaux3]

Caractéristique réacteur	
Longueur - m	1
Largeur - m	1
Profondeur - m	1
Volume - m ³	1

[0166] L'espacement entre les différents dispositifs d'éclairage est alors donné par la formule suivante :

[0167] $D = (L - E_{\text{tot}}) / (\frac{1}{2} \times \text{Nb}_{\text{Plaques}}) = (1 - 0,06) / (\frac{1}{2} \times 12)$, et $d_{\text{libre}} = D - \text{épaisseur d'un dispositif d'éclairage}$

[0168] Avec :

- L : Largeur d'un dispositif d'éclairage ;
- E_{tot} : Epaisseur totale ;
- Nb : nombre de dispositifs d'éclairage ;
- D : Distance entre deux dispositifs d'éclairage,
- d : espace libre en deux dispositifs d'éclairage.

[0169] [Tableaux4]

Caractéristiques des plaques	
Nombre de dispositif d'éclairage simple	12
Epaisseur « $\frac{1}{2}e$ » d'un dispositif d'éclairage - m	0,005
Epaisseur totale - m	0,06
Ecartement « D » entre les faces arrière de deux dispositifs d'éclairage successifs - m	0,156
Espace libre « d » entre dispositifs d'éclairage - m	0,145

[0170] Dans le cas où les dispositifs d'éclairage ont des dimensions de 1*1 mètre, il faut douze dispositifs d'éclairage dans le bioréacteur.

- [0171] En les disposants en sandwich, l'épaisseur totale des dispositifs d'éclairage mesure 0,06 mètres.
- [0172] Les dispositifs d'éclairage sont placés tous les 0,156 m dans le milieu et avec un espace libre de 0,145 m.
- [0173] Il faut déterminer la concentration maximum qu'il ne faut pas dépasser afin de ne pas avoir de zone sombre dans le milieu de culture et de maintenir un $f_d=0$ soit un flux de photons suffisant jusqu'à la zone mitoyenne.
- [0174] Idéalement il ne faudra pas dépasser une concentration de 0.3 g/L/J, comme illustré sur la [Fig.14] représentant une concentration maximum en microalgues en fonction de l'écartement entre dispositifs d'éclairage adjacents.
- [0175] L'intensité lumineuse en fonction de la distance Z peut s'exprimer à partir de la formule suivante : $I(z)=I_0 \bullet e^{-k_a \bullet B \bullet z}$
- [0176] 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.
- [0177] Si l'on considère qu'à partir de 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, la quantité de lumière est insuffisante pour avoir des rendements suffisants, il est possible de déterminer la concentration maximale à ne pas dépasser.
- [0178] Ici avec 0.03 mètres (dus aux dispositifs d'éclairage placés en sandwich) la concentration maximale à ne pas franchir est de 1.5 g/L.
- [0179] 5.4. Homogénéité de la lumière
- [0180] L'homogénéité de la lumière issue d'un dispositif d'éclairage incluant une OLED est supérieure ou égale à 99%, assurant un meilleur rendement qu'un dispositif d'éclairage incluant une LED.
- [0181] Une plaque de pmma dotées de prismes à une capacité de diffusion de 70% à 90% en fonction de l'épaisseur et de la quantité de LEDs placées sur les côtés.
- [0182] La quantité d'énergie à envoyer à la surface est donc moindre dans le cas d'un dispositif d'éclairage incluant une OLED.
- [0183] Pour un rendement en biomasse par unité de volume équivalent, il faudra injecter entre 10 et 30% plus d'énergie électrique dans le cas d'un dispositif d'éclairage incluant une LED.
- [0184] 5.5. Volume utile du bioréacteur
- [0185] Le volume utile du bioréacteur est plus important (avantage économique) avec un dispositif d'éclairage incluant un dispositif d'éclairage flexible.
- [0186] Cette utilisation de dispositif d'éclairage flexible permet d'optimiser le volume utile du réacteur de deux à seize fois, étant donné que :

- l'épaisseur d'une plaque de pmma ou de polycarbonate peut mesurer 0.01 m et 0.08 m, et que
- l'épaisseur d'un dispositif d'éclairage flexible de 0.005 m.

[0187] 5.6. Angle incident

[0188] L'homogénéité de la lumière par l'angle incident des couches d'OLEDs de 178° en opposition à des LEDs de 120°.

[0189] Cela assure une meilleure homogénéité de la lumière dans le bioréacteur.

[0190] On préfère utiliser une OLED ayant un angle le plus large possible : supérieur à 120°.

[0191] En effet il est difficile d'obtenir un angle supérieur à 120° avec des LEDs. Cela réduit d'autant le volume de culture optimisé pour la culture de microalgue.

[0192] Cet angle permet une amélioration de la couverture du volume éclairé de 20% par rapport à une plaque LED classique avec une puissance de 700 µE et 0.1 g/L de concentration algale.

[0193] Le volume éclairé est donc défini par la formule suivante : Volume éclairé = $((\pi \alpha^2)/360^\circ) * L * n_{\text{Côtés}} + (L * l * h) * n_{\text{faces}}$ en m³.

[0194] Le tableau ci-dessous propose une comparaison des volumes éclairés avec une diode de type LED classique et diode de type OLED.

[0195] [Tableaux5]

Cas LEDs													
r	0,385	0,195	0,13	0,1	0,08	0,065	0,055	0,05	0,045	0,04	0,035	0,03	0,03
Angle alpha	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Volume totale - m3	1,391	0,549	0,331	0,242	0,187	0,148	0,123	0,110	0,098	0,087	0,075	0,064	0,064
Cas OLEDs													
r	0,385	0,195	0,13	0,1	0,08	0,065	0,055	0,05	0,045	0,04	0,035	0,03	0,03
Angle alpha	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88
Volume totale - m3	1,68	0,62	0,36	0,26	0,20	0,16	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07
Gain % OLEDs VS LEDs	20,83	13,53	9,99	8,08	6,70	5,59	4,82	4,42	4,02	3,61	3,19	2,76	2,76

[0196] 5.7. Possibilité de faire varier la distance entre les dispositifs d'éclairage en fonction du flux de lumière en continue ou flash

[0197] On va maintenant décrire différents aspects relatifs à un dimensionnement du bio-réacteur en considérant un apport de lumière discontinu, c'est-à-dire en considérant que chaque dispositif d'éclairage génère un rayonnement lumineux discontinu composé d'une alternance rapprochée de phases obscures et de phases éclairées (flashes), par exemple à une fréquence comprise entre 10 et 50 kHz.

[0198] Soit un système doté d'une intensité moyenne en continue de $1000 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ au niveau des dispositifs d'éclairage.

[0199] Lorsque cette intensité moyenne en continue est ensuite paramétré en flash tout en maintenant une irradiance moyenne de $1000 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ il est alors possible d'obtenir des vagues de flash de $10000 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

[0200] A titre indicatif, la [Fig.15] illustre la différence entre un éclairage discontinu 31 et un éclairage continu 32 :

- le temps de cycle est donné par la formule suivante : $t_{\text{cycle}} = t_{\text{light}} + t_{\text{dark}} \text{ (s)}$

/ ou la fréquence (Hz)

- la fraction lumineuse est donnée par la formule suivante : $\phi : (t_{light} / (t_{light} + t_{dark}))$
- l'irradiance intégrée est donnée par la formule suivante : $I_m = I_f \cdot \phi$

[0201] Avec :

- $\phi = 10\%$;
- $I_m = 1000 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$,
- $I_m = I_f \cdot \phi \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$,
- $I_f = 10000 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

[0202] Cette vague de photons permet d'augmenter la distance d'entrée des photons dans le milieu et donc d'augmenter la distance entre les dispositifs d'éclairage avec une concentration en biomasse identique.

[0203] En effet, comme illustré à la [Fig.16], le passage d'un apport de lumière continu à un apport de lumière discontinu permet d'augmenter la distance entre deux dispositifs d'éclairage adjacents tout en maintenant les autres paramètres identiques.

[0204] En référence à la [Fig.16], la distance entre deux dispositifs d'éclairage adjacents peut être étendue à 0.055 mètres en flash avec une concentration de 1.5 g/L.

[0205] 6. Conclusions

[0206] La solution décrite précédemment présente de nombreux avantages :

- l'hydraulique du photo-bioréacteur via des dispositifs d'éclairage flexibles est améliorée, notamment grâce à une optimisation du flux de circulation du milieu de culture dans certaines zones du photo-bioréacteur,
- la maintenance du photo-bioréacteur est facilitée grâce à la flexibilité des dispositifs d'éclairage,
- le volume utile du photo-bioréacteur est plus important (avantage économique) en comparaison aux solutions d'éclairage existantes,
- la flexibilité des dispositifs d'éclairage à OLED permet également d'apporter plus de lumière dans des zones mortes du photo-bioréacteur,
- l'utilisation d'une plaque et d'une couche de revêtement externe en verres minces permet
 - de diminuer l'effet de collage (« fouling ») des microalgues sur les dispositifs d'éclairage,
 - une meilleure insulation des composants électroniques entre eux, limitant les risques électriques,
 - une meilleure transmittance optique,
 - une meilleure stabilité chimique,
 - une meilleure barrière aux gaz injectés dans le photo-bioréacteur,
 - un meilleur échange des calories générées par les diodes lumineuses

des dispositifs d'éclairage,
en comparaison à une couche de revêtement extérieur de pmma ou de polycarbonate.

[0207] 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.

Revendications

[Revendication 1]

Réacteur incluant :

- une cuve (1) destinée à contenir une masse à traiter, la cuve (1) comprenant une paroi inférieure formant fond, une paroi supérieure opposée à la paroi inférieure, et au moins une paroi latérale entre les parois inférieure et supérieure,
- un ensemble de dispositifs d'éclairage flexibles contenu dans la cuve et destiné à favoriser le traitement de la masse,
- au moins un module d'alimentation en énergie électrique connecté à chaque dispositif d'éclairage,

caractérisé en ce que chaque dispositif d'éclairage flexible comprend :

- un cadre périphérique composé :
 - de deux bordures longitudinales flexibles, et
 - de deux bordures transversales,

chaque bordure transversale s'étendant entre une paire d'extrémités libres respective des bordures longitudinales, et

- une nappe (52) centrale flexible sur les bords de laquelle est monté le cadre périphérique, la nappe (52) centrale flexible incluant :
 - au moins une plaque flexible (21),
 - une couche de revêtement flexible (23) transparente au rayonnement lumineux, ladite couche de revêtement s'étendant sur la plaque flexible,
 - un groupe de diodes lumineuses (22, 22a, 22b, 22c) s'étendant entre la plaque flexible et la couche de revêtement flexible, lesdites diodes lumineuses étant orientées de sorte à générer le rayonnement lumineux dans une direction opposée à la plaque flexible.

[Revendication 2]

Réacteur selon la revendication 1, **dans lequel** chaque diode lumineuse est une diode électroluminescente organique flexible (OLED), chaque diode lumineuse étant en contact avec une diode lumineuse adjacente.

[Revendication 3]

Réacteur selon la revendication 1, **dans lequel** chaque diode lumineuse

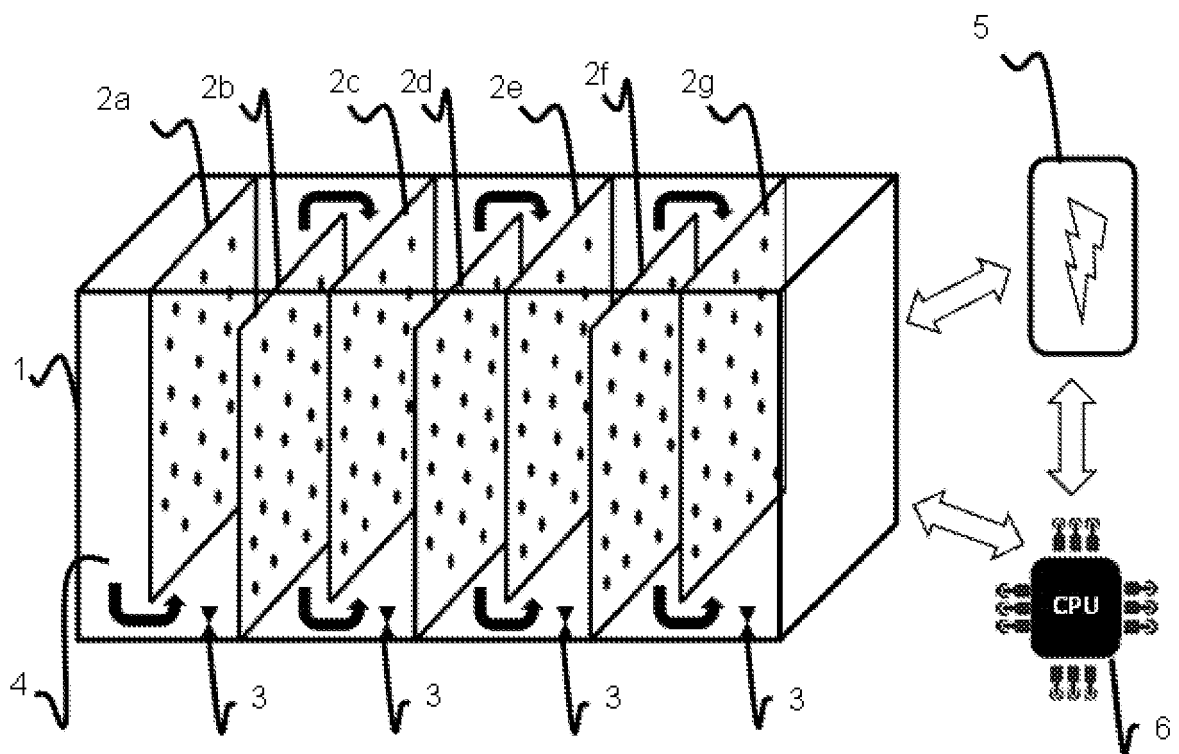
est choisie parmi une diode électro-luminescente conventionnelle (LED), ou une mini diode électro-luminescente (mini LED), les diodes lumineuses étant espacées les unes des autres d'une distance supérieure ou égale à 50µm.

- [Revendication 4] Réacteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, **dans lequel** chaque bordure transversale est flexible de sorte que le cadre périphérique est flexible selon deux directions orthogonales (D1, D2).
- [Revendication 5] Réacteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, **dans lequel** chaque bordure transversale est rigide de sorte que le cadre périphérique est flexible selon une unique direction (D1) parallèle aux bordures longitudinales.
- [Revendication 6] Réacteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, **dans lequel** chaque bordure transversale inclut une armature rigide (512') et un brin rigide (512'') de longueur inférieure à l'armature rigide (512'), l'armature rigide (512') et le brin (512'') étant reliés par une liaison pivot de sorte que le brin (512'') est apte à pivoter relativement à l'armature (512').
- [Revendication 7] Réacteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, **dans lequel** chaque bordure flexible comprend une succession de segments rigides (513) raccordés entre eux par des liaisons pivot (514) de sorte que chaque segment est apte à pivoter relativement à un segment adjacent.
- [Revendication 8] Réacteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, **dans lequel** chaque bordure flexible consiste en un boudin réalisé dans un matériau identique à un matériau constituant la plaque flexible.
- [Revendication 9] Réacteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, **dans lequel** ledit et au moins un dispositif d'éclairage est de forme parallélépipédique, le réacteur incluant une structure support rigide comportant des logements, chaque logement étant destiné à recevoir un dispositif d'éclairage flexible respectif et étant configuré de sorte à recourber le dispositif d'éclairage dans la cuve.
- [Revendication 10] Réacteur selon l'une des revendications 1 à 9, **dans lequel** chaque diode lumineuse comprend un empilement de structures (222, 224, 226), chaque structure étant adaptée pour émettre un rayonnement lumineux dans une gamme de longueurs d'onde respective.
- [Revendication 11] Réacteur selon la revendication 10, **lequel** comprend en outre au moins un contrôleur (6) configuré pour piloter ledit et au moins un module d'alimentation (5) en énergie électrique.
- [Revendication 12] Réacteur selon la revendication 11, **dans lequel** ledit et au moins un

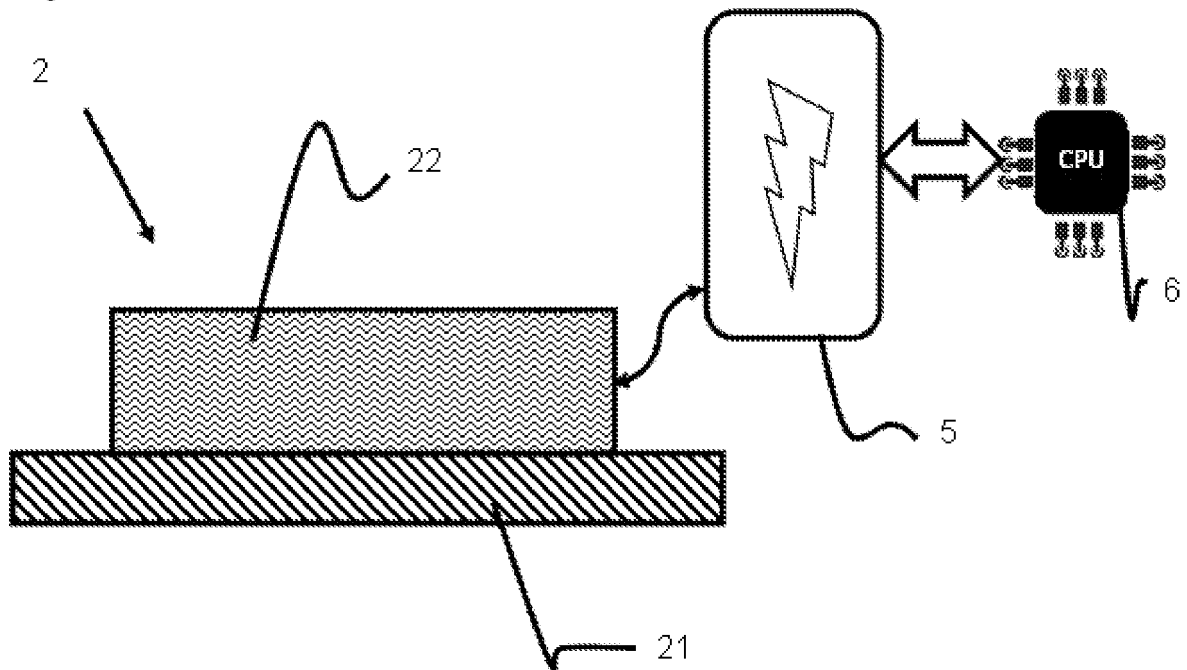
contrôleur (6) est configuré pour contrôler une variation d'énergie fournie par ledit et au moins un module d'alimentation (5) afin de modifier au cours du temps le spectre d'émission dudit et au moins un dispositif d'éclairage (2, 2a-2j).

- [Revendication 13] Réacteur selon l'une quelconque des revendications 11 ou 12, ***dans lequel*** ledit et au moins un contrôleur est configuré pour :
- contrôler l'activation continue dudit et au moins un module d'alimentation en énergie électrique de sorte que ledit et au moins un dispositif d'éclairage (2a, 2b) génère un rayonnement lumineux continu,
 - contrôler l'activation discontinue dudit et au moins un module d'alimentation en énergie électrique de sorte que ledit et au moins un dispositif d'éclairage (2a, 2b) génère un rayonnement lumineux discontinu sous forme de flashes composé d'une alternance de phases obscures et de phases éclairées, par exemple à une fréquence comprise entre 10 et 50 kHz.
- [Revendication 14] Réacteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, ***dans lequel*** le matériau constituant ladite couche de revêtement est du verre souple.
- [Revendication 15] Réacteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, ***dans lequel*** le matériau constituant la couche de revêtement est une résine synthétique ou semi-synthétique choisie parmi les résines (méth)acryliques réticulées, les résines de styrène réticulées, les résines de polyuréthane, les résines de polyester, les résines de silicone, les résines fluorées, les résines préparées à partir de substances inorganiques telles que la silice, le carbonate de calcium et le sulfate de baryum.
- [Revendication 16] Réacteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 15, ***dans lequel*** au moins deux diodes lumineuses de la pluralité de diodes lumineuses sont de tailles différentes.
- [Revendication 17] Réacteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 16, dans lequel la pluralité de diodes lumineuses comprend :
- au moins une diode lumineuse à émission ultraviolet (22b), et/ou
 - au moins une diode lumineuse phosphorescente (22c).

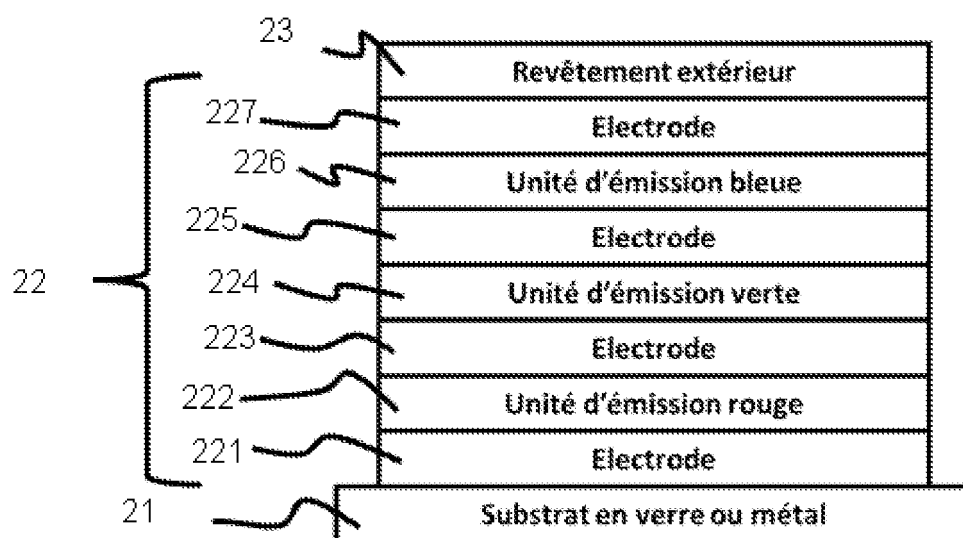
[Fig. 1]



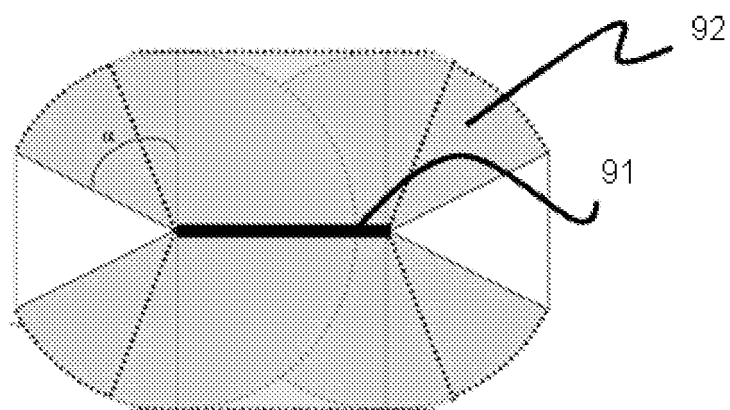
[Fig. 2]



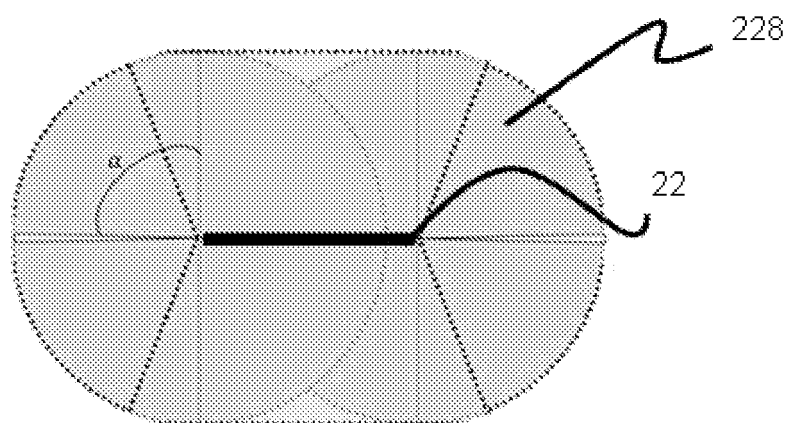
[Fig. 3]



[Fig. 4]

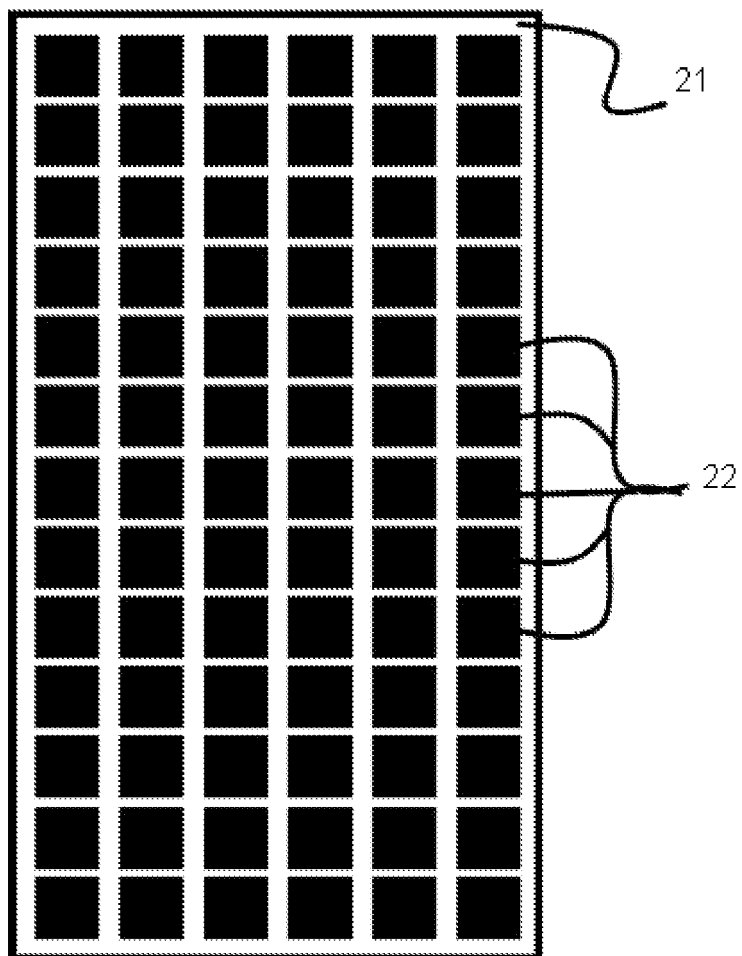


[Fig. 5]



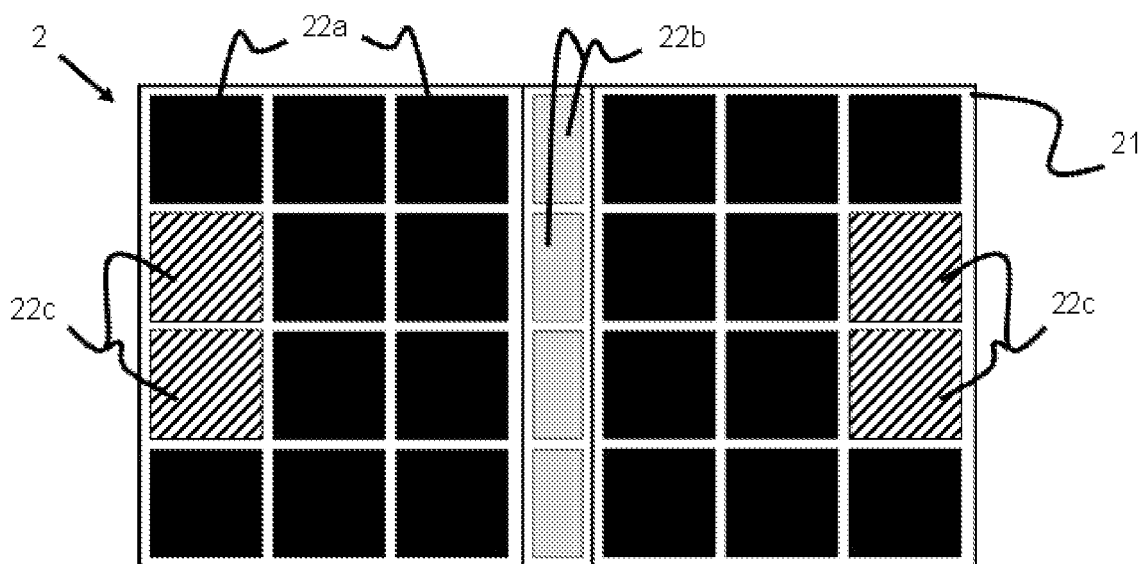
[Fig. 6]

2

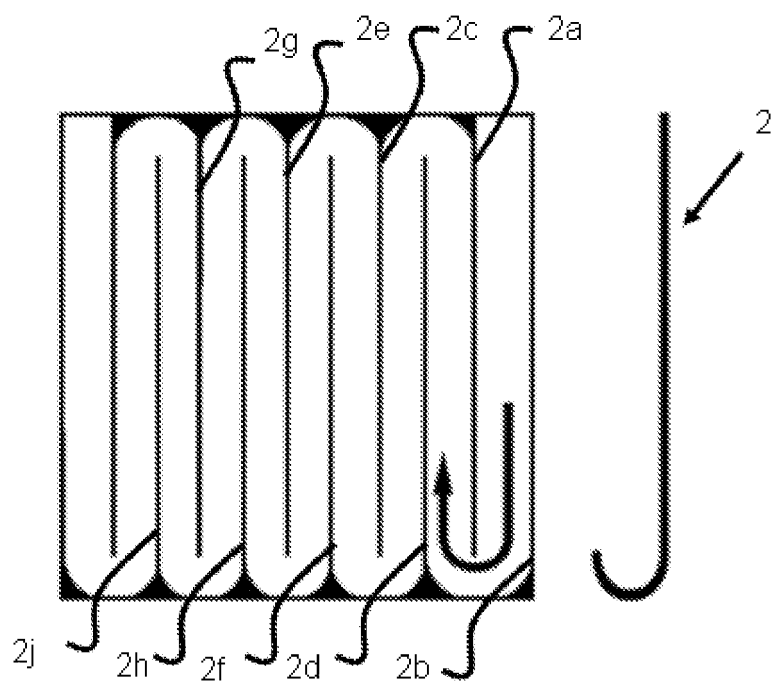


[Fig. 7]

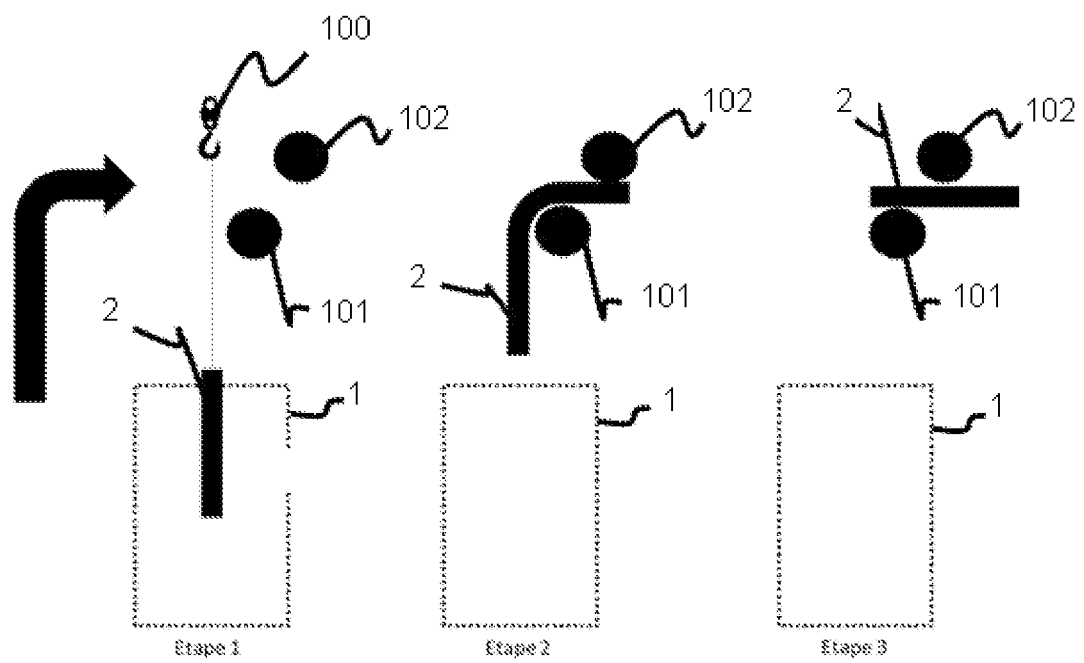
2



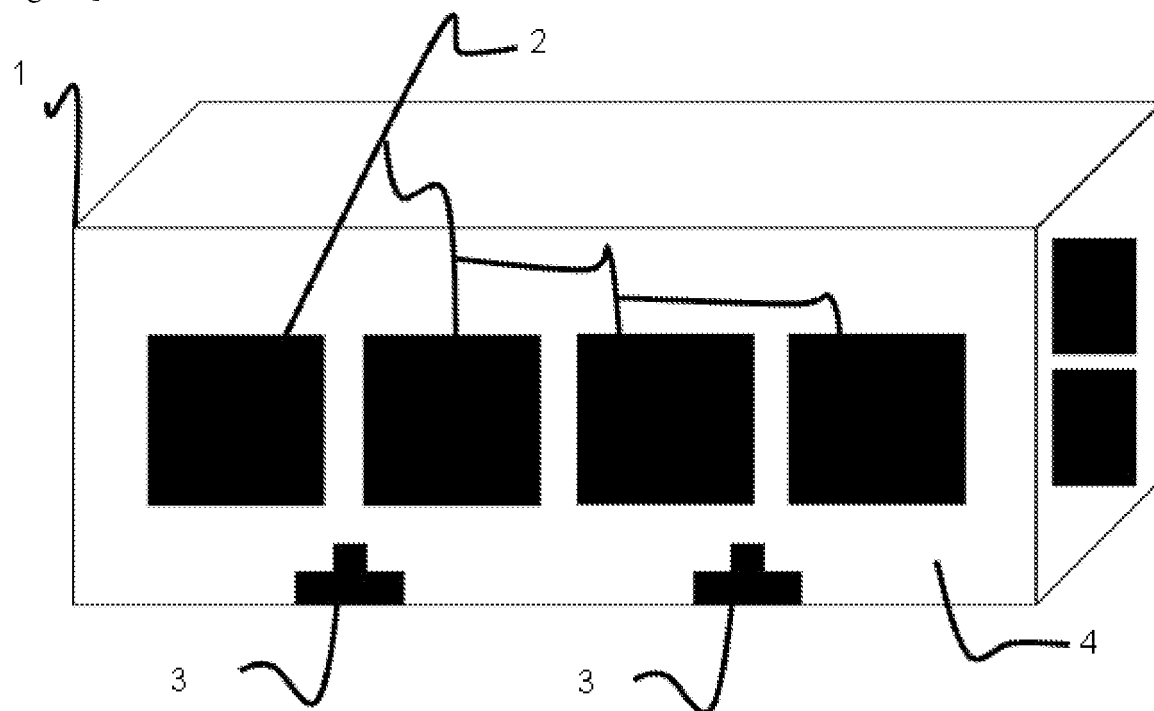
[Fig. 10]



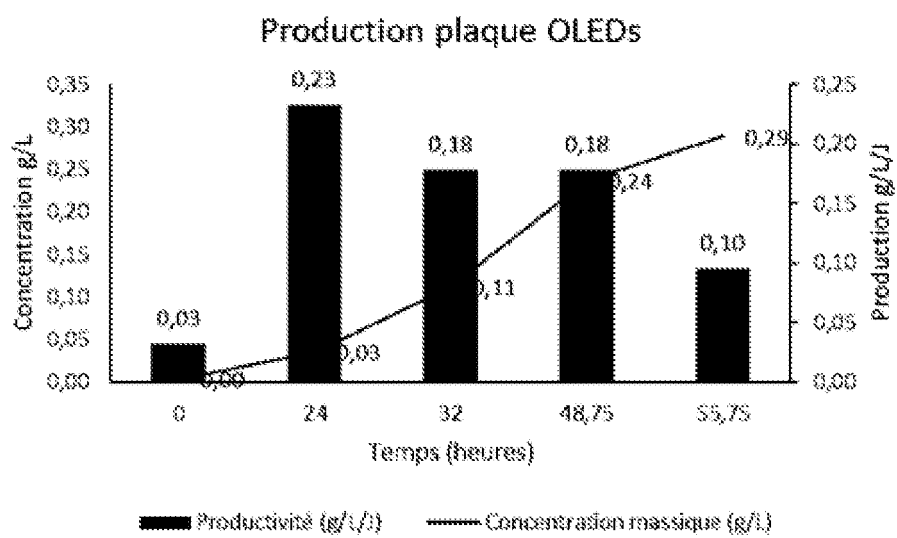
[Fig. 11]



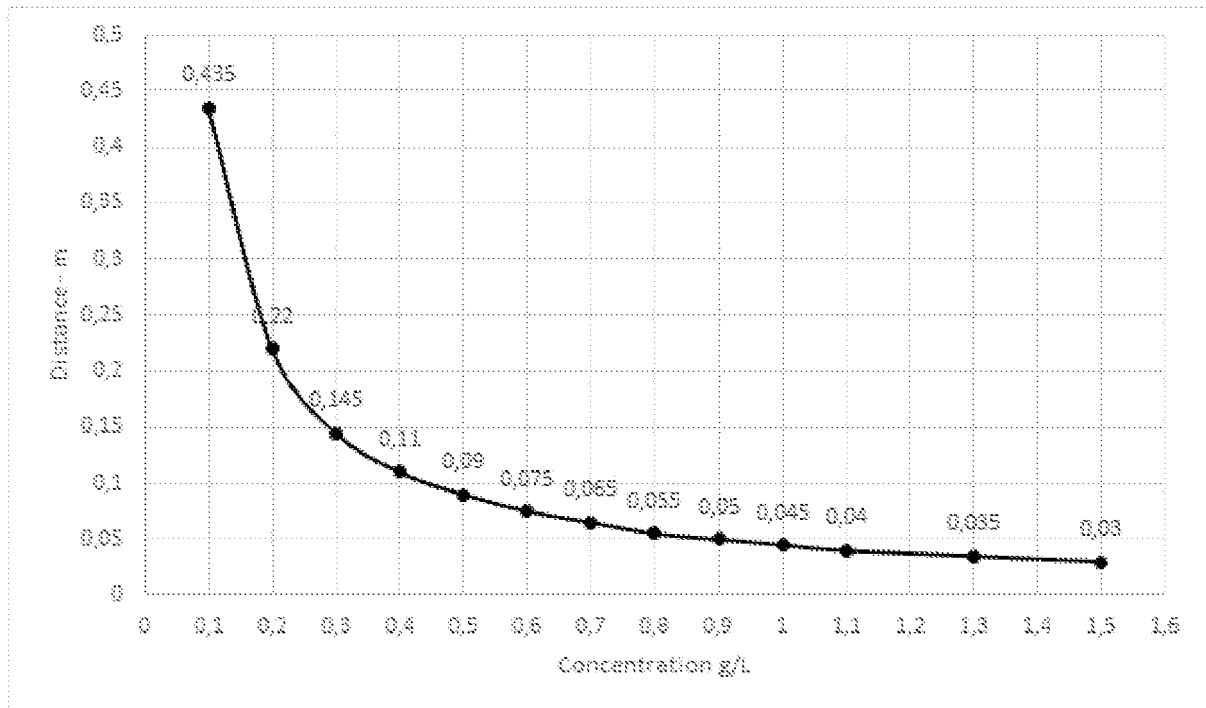
[Fig. 12]



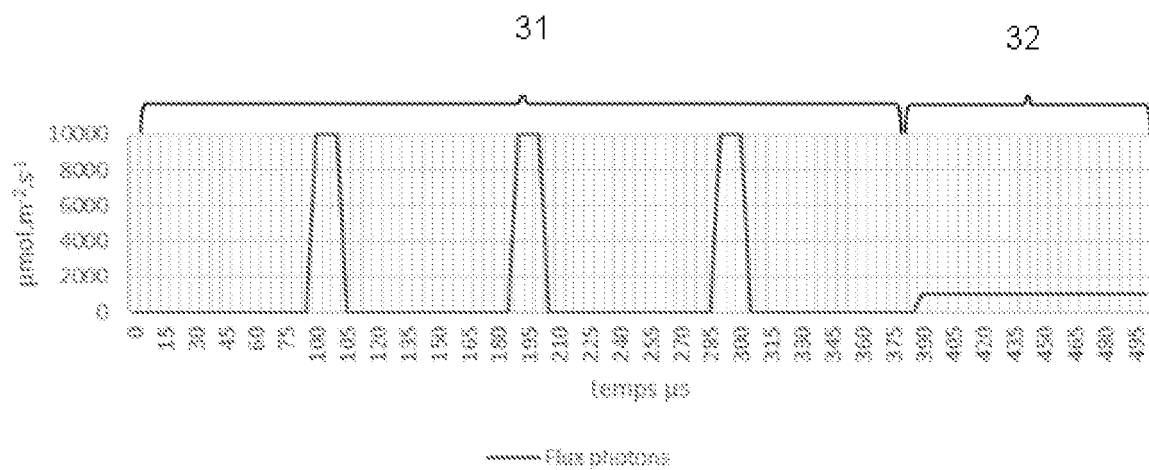
[Fig. 13]



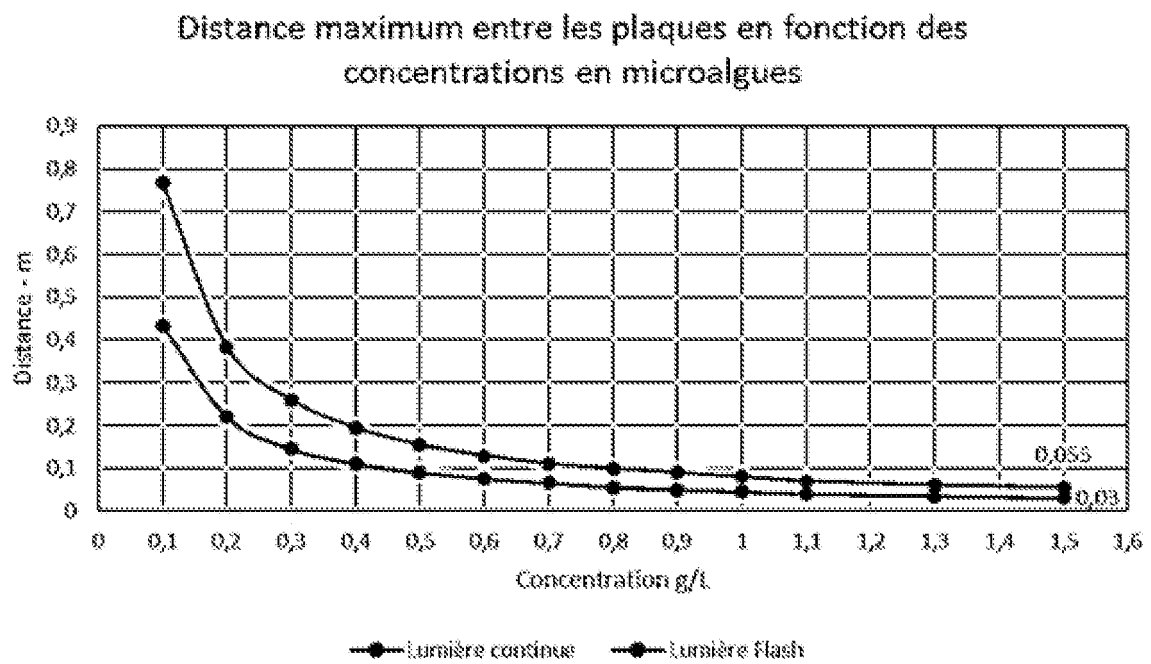
[Fig. 14]



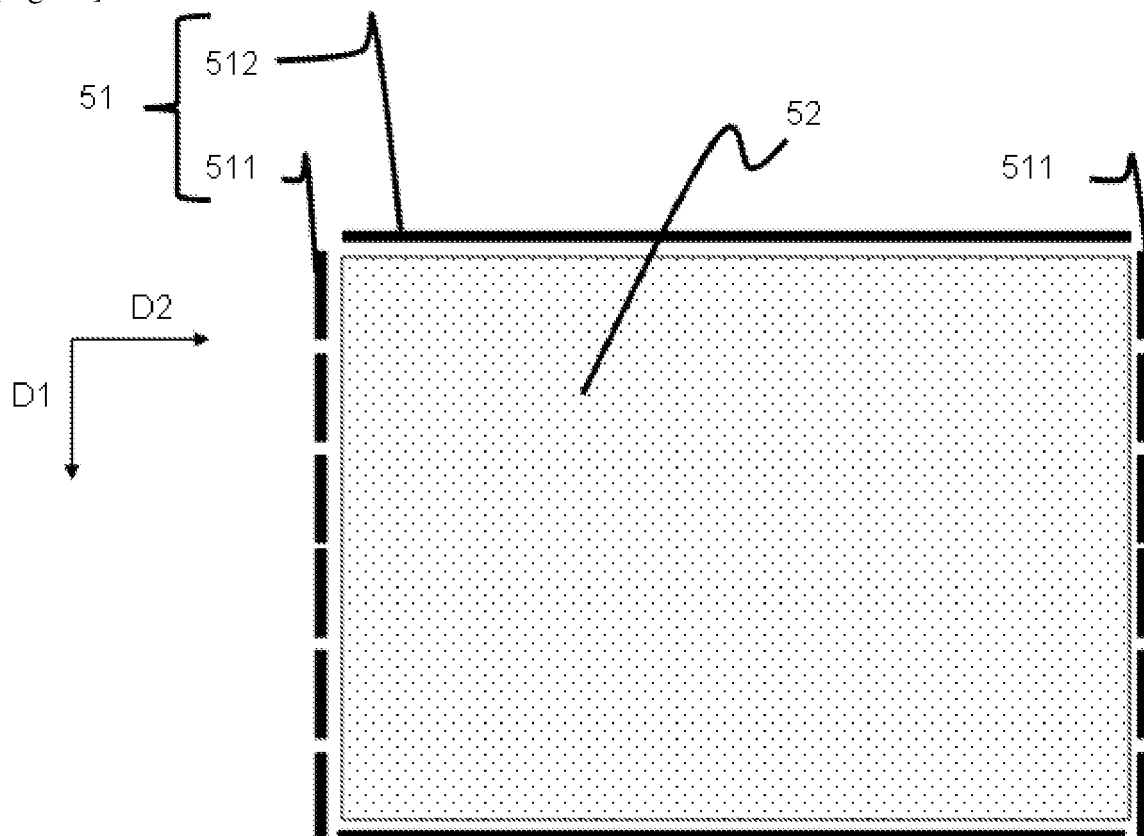
[Fig. 15]



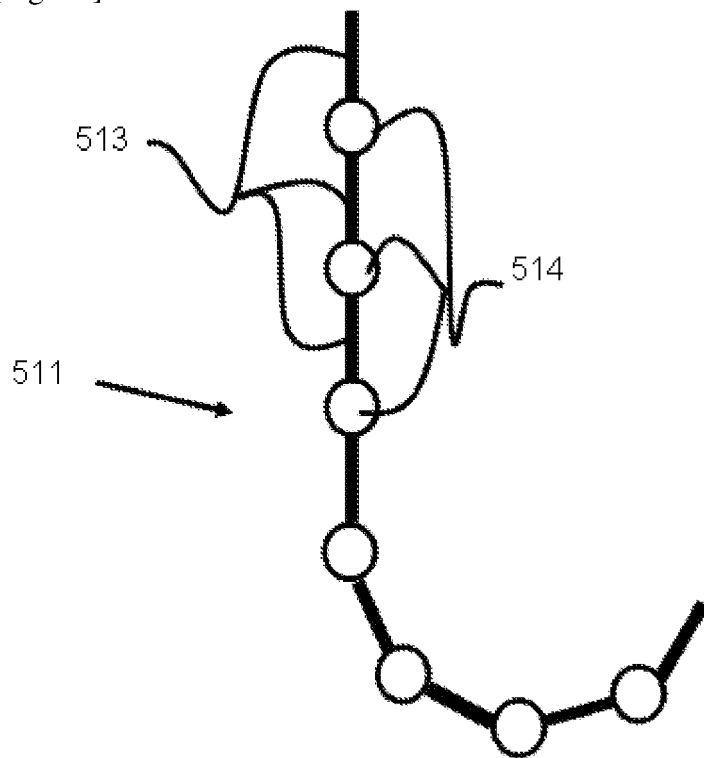
[Fig. 16]



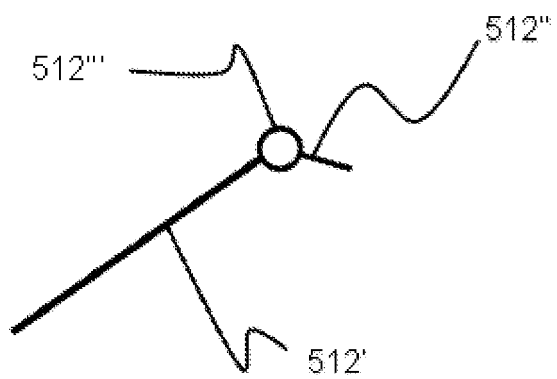
[Fig. 17]



[Fig. 18]



[Fig. 19]



RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☐ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☒ Le demandeur a maintenu les revendications.

☐ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

**1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN
CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION**

NEANT

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN
TECHNOLOGIQUE GENERAL**

KR 2009 0055169 A (INHA IND PARTNERSHIP
INST [KR]) 2 juin 2009 (2009-06-02)

WO 2019/175906 A1 (SAGANATURA EHF [IS])
19 septembre 2019 (2019-09-19)

WO 2017/019984 A1 (AVESPA HOLDINGS LLC
[US]) 2 février 2017 (2017-02-02)

WO 2008/151376 A1 (STROUD ROGER [AU])
18 décembre 2008 (2008-12-18)

WO 2021/160776 A1 (FERMENTALG [FR])
19 août 2021 (2021-08-19)

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND
DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT