(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international

(43) Date de la publication internationale
5 août 2010 (05.08.2010)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2010/086310 A2

(51) Classification internationale des brevets : *C12M 1/00* (2006.01) *C12N 1/12* (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale : PCT/EP2010/050878

(22) Date de dépôt international : 26 janvier 2010 (26.01.2010)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité : 09-00352 27 janvier 2009 (27.01.2009) FR

(71) Déposant *(pour tous les États désignés sauf US)* : **PHOTOFUEL SAS** [FR/FR]; 12 rue de la Montagne Saint-Geneviève, F-75005 Paris (FR).

(72) Inventeur; et

(75) Inventeur/Déposant *(pour US seulement)* : **SYLVESTRE, Julien** [FR/FR]; 71 rue d'Aboukir, F-75002 Paris (FR).

(74) Mandataires : **BROCHARD, Pascale** et al.; Osha Liang, 32 avenue de l'Opéra, F-75002 Paris (FR).

(81) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible)* : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible)* : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

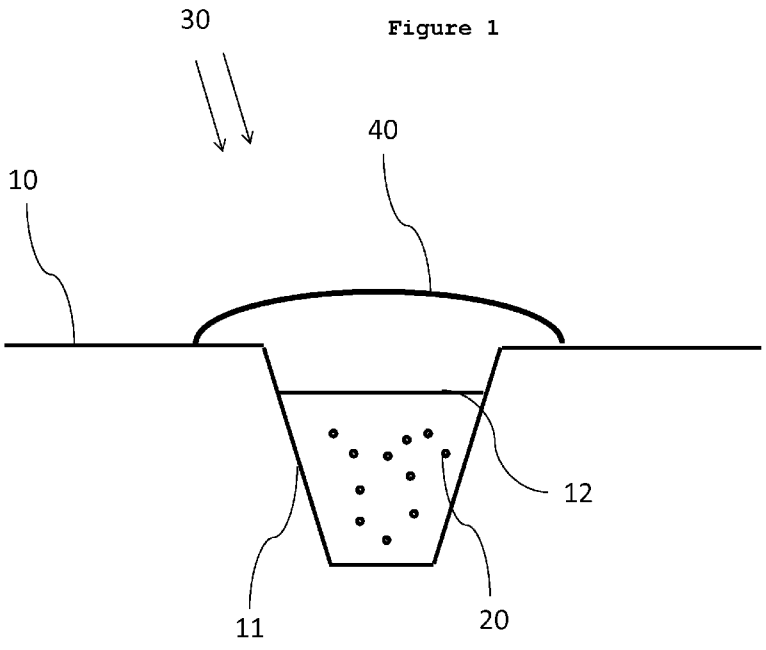
Publiée :

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport (règle 48.2.g))*

(54) **Title** : METHOD AND DEVICE FOR CULTURING ALGAE

(54) **Titre** : PROCEDE ET DISPOSITIF POUR LA CULTURE D'ALGUES

Figure 1



(57) **Abstract** : According to one aspect, the invention relates to a device for culturing algae with natural light, including an enclosure with a culturing medium and the algae to be cultured, and a substrate arranged to receive solar radiation in order to perform photoconversion of said solar radiation, the substrate including at least one luminescent compound making it possible to reemit radiation having a spectrum adapted to the optimisation of a biological parameter of interest resulting from the photosynthesis of said algae.

(57) **Abrégé** : Selon un aspect, l'invention concerne un dispositif pour la culture d'algues en lumière naturelle, comprenant une enceinte avec un milieu de culture et les algues à cultiver, et un substrat agencé pour recevoir le rayonnement solaire en vue d'une photo conversion dudit rayonnement solaire, le substrat comprenant au moins un composé luminescent permettant de réémettre un rayonnement dont le spectre est adapté à l'optimisation d'un paramètre biologique d'intérêt résultant de la photosynthèse desdites algues.

WO 2010/086310 A2

Procédé et dispositif pour la culture d'algues

Domaine de l'invention

La présente invention concerne un procédé et un dispositif pour la culture d'algues.

Etat de la technique

Dans ce document, le terme « algues » désigne, par commodité, n'importe quelle espèce d'organisme photosynthétique microscopique aquatique telle que des micro-algues, des cyanobactéries ou des angiospermes microscopiques (« micro-crops » comme les lentilles d'eau).

Ces algues peuvent être issues d'une des centaines de milliers d'espèces naturellement présentes à la surface du globe ou avoir été modifiées génétiquement par des techniques connues de l'homme de métier.

Les algues peuvent être cultivées sous forme de cultures pures (une seule espèce) ou de cultures mixtes comportant plusieurs algues d'espèces différentes, identifiées ou non.

Les algues peuvent être cultivées dans de l'eau douce, de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre, fraîche ou usée.

Les algues peuvent être cultivées pour elles-mêmes ou pour fabriquer divers composés chimiques (cellulose, sucres, alcools, lipides, protéines) en recyclant du dioxyde de carbone sous forme de matière organique via la réaction de photosynthèse. Ces composés chimiques peuvent être produits à l'intérieur des cellules d'algues ou sécrétés.

Lorsque les composés chimiques d'intérêts ne sont pas sécrétés, les algues cultivées sont séparées de l'eau qui les

contient, en continu ou par des procédés batchs, par diverses méthodes connues de l'homme de métier.

Directement, ou après conversion, certains des composés chimiques d'intérêt produits ou sécrétés peuvent être intégrés dans divers produits ou compléments pour les industries chimiques (e.g. ethanol), l'alimentation humaine ou animale (e.g. omega 3), la cosmétique et la pharmacie. Certains de ces composés chimiques peuvent être utilisés pour fabriquer des biocarburants tels que le bioéthanol, le biodiesel, et divers « designer fuels » qui peuvent être directement substitués, de manière partielle ou totale, à l'essence, au diesel ou au jet fuel utilisés dans les transports automobiles, ferroviaires, aquatiques et maritimes.

Les algues peuvent également, par divers méthodes connues de l'homme de métier, servir à la production de biogaz, de biohydrogène ou de bioélectricité

Des bioraffineries construites autour de la culture d'algues offrent ainsi plusieurs avantages importants dans les domaines de la chimie, de l'énergie, de l'environnement, de l'alimentation et de la santé par rapport aux procédés actuels reposant sur des substrats d'origine fossile.

Il y a trois façons de cultiver les algues : en absence de lumière, en présence de lumière artificielle ou en présence de lumière solaire.

Culture d'algues en hétérotrophie

La culture d'algues en absence de lumière s'apparente à de la fermentation et s'appuie donc sur des appareillages et technologies adaptées d'industries de fermentation bien établies. Cette approche présente toutefois deux inconvénients majeurs.

Tout d'abord, qualitativement, on estime qu'une faible minorité, de l'ordre de 1 à 10 % des algues naturelles peuvent être adaptées à un tel type de culture hétérotrophique.

Deuxièmement, d'un point de vue quantitatif, le substrat typiquement utilisé pour la fermentation est du sucre. Or la production mondiale de sucre annuelle, pour tous usages notamment l'alimentation et la production d'ethanol, est de 170 millions de tonnes par an soit, à 17 kJ par g, une quantité d'énergie de l'ordre de 2.9 10^18 Joules. La consommation mondiale d'énergie valant 500 exajoules (5 10^20 Joules), et sans même tenir compte des rendements non unitaires de conversion, on voit donc que cette approche hétérotrophique n'est pas en mesure de se substituer, à large échelle, aux combustibles fossiles utilisés pour produire la grande majorité de l'énergie actuellement utilisée pour les activités et productions humaines. La consommation d'énergie mondiale peut également être évaluée en tonnes d'équivalent pétrole, à 12.2 10^9 tonnes (à 45 kJ par g), ce qui encore une fois est sans commune mesure avec la totalité de sucre produit dans le monde annuellement, à 0.17 10^9 tonnes (avec une densité énergétique de seulement 17 kJ par g). Enfin, la culture d'algues en hétérotrophie suppose une étape de photosynthèse préalable permettant la fixation de matière organique (sucres ou éventuellement autres substrats) par des végétaux terrestres grâce aux végétaux terrestres. Cette étape suppose des quantités importantes d'engrais, d'eau, d'énergie, de travail humain et de sols et son bilan environnemental est très imparfait.

Culture d'algues en présence de lumière artificielle

Les microalgues sont cultivées, au laboratoire, en présence de lumière artificielle. On peut imaginer cultiver des microalgues à grande échelle en utilisant divers dispositifs intégrant des sources de lumière artificielle.

Lorsque l'objet de la culture d'algue est la production de biocarburant, il est facile de voir cependant, que le coût de cette approche est prohibitif. On se borne ici à considérer le coût marginal de l'électricité nécessaire à l'éclairage, sans prendre en compte ni les frais d'installation et de fonctionnement du dispositif de culture ni le prix des sources lumineuses et de leur remplacement. On prend un coût d'électricité peu élevé, à 5 cts / kWh, un rendement de la source de lumière artificielle de 20 %, un rendement global de la photosynthèse de 25 % avec cette source de lumière (il faut huit photons pour fixer une molécule de CH_2O), un contenu en huile des algues de 50 % (en masse). On considère que l'huile extraite des algues a une densité énergétique proche de celle du diesel, soit 12 kWh / kg. Produire 1 kg d'huile implique, dans ces conditions tout à fait optimistes, un coût marginal en électricité de

Coût = 12 * 0.05 / (0.20*0.25*0.5) = 24 € / kg

Soit plus de 20 fois le prix jamais atteint par le pétrole et ceci sans même prendre en compte tous les autres facteurs de coûts fixes et variables, qui sont naturellement très significatifs.

On observe ainsi que les cultures d'algues en présence de lumière artificielle sont réservées à la production de composés à haute valeur ajoutée, pas à la production de composés alimentaires, chimiques ou énergétiques de base.

Cultures d'algues en présence de lumière solaire

La puissance moyenne annuelle du rayonnement solaire reçu par la surface terrestre est d'environ 90 000 TW. La consommation humaine d'énergie équivaut à une puissance moyenne de l'ordre de 18 TW soit 5 000 fois moins. Il est ainsi évident que le rayonnement solaire constitue une source d'énergie primaire renouvelable qui est largement assez

abondante pour répondre à l'ensemble des besoins énergétiques de l'homme. La photosynthèse permet, avec des rendements instantanés mesurés entre 0.02 et 10 %, et plus généralement des rendements moyens observés entre 0.1 % et 2 % pour les plantes terrestres, de convertir directement l'énergie solaire en carburants et bioproduits, et donc en source d'énergie ou en composé chimique de bonne valeur car stockable et modifiable, ce que ne permettent pas les approches de type solaire thermique ou photovoltaïque, qui produisent simplement de l'électricité et de la chaleur, qui sont difficilement stockables et doivent donc être utilisées immédiatement au moment de leur production, qui ne correspond pas aux pics de consommation.

Dans le cas de la production d'huiles végétales par photosynthèse, on sait que les algues offrent des rendements surfaciques qui sont beaucoup plus élevés que les cultures terrestres traditionnelles comme le colza ou même l'huile de palme (entre 5 et 100 fois). En outre les algues n'ont pas besoin de sols agricoles, ce qui élimine les problèmes, mis en avant pour les biocarburants actuels, de compétition avec l'alimentation et d'impact environnemental négatif de modifications de l'usage des sols et de pratiques de culture telles que la déforestation. Les algues peuvent enfin permettre de recycler directement du dioxyde de carbone concentré et des eaux usées.

Ainsi, divers auteurs calculent qu'une surface non agricole (terrestre ou marine) d'une taille de l'ordre d'un petit pays européen pourrait suffire à assurer la production d'une grande partie de l'énergie et des composés chimiques et alimentaires utilisés par l'homme.

Dans un récent article (K. M. Weyer et al. « Theoretical maximum of algae oil cultivation », Bioenerg. Res. (2009) DOI 10.1007/s12155-009-9046-x), les auteurs

calculent pour la première fois de manière détaillée, le rendement surfacique annuel maximal qui peut être obtenu en cultivant des algues éclairées par de la lumière solaire. Ils parviennent à un résultat de l'ordre de 50 000 L / ha / an (maximum « pratique ») à 350 000 L / ha / an (maximum « théorique » pour lequel tous les rendements sont fixés à 100 %). Dans la discussion des différents facteurs contribuant au calcul du rendement, les auteurs en isolent trois (termes 4, 5 et 8) - l'efficacité de transmission des photons, l'efficacité d'utilisation des photons et l'efficacité d'accumulation de la biomasse - qui sont, selon eux, susceptibles d'être améliorés. Les améliorations proposées, rejoignant ainsi celles de nombreux autres auteurs du domaine, concernent la géométrie du système de culture, pour favoriser la distribution de la lumière et le choix des algues, notamment en fonction de leur tolérance des algues à des niveaux élevés d'intensité lumineuse.

Ces auteurs prennent pour acquis le deuxième terme du calcul (juste après le premier terme qui est l'énergie solaire reçue), le PAR (photosynthetically active radiation), qui est la portion du spectre solaire utilisable pour la photosynthèse, conventionnellement prise comme les longueurs d'ondes comprises entre 400 nm et 700 nm soit 45.8 % de l'énergie solaire reçue à la surface.

Il apparaît que la culture d'algues en lumière naturelle (solaire) est la seule technique présentant un potentiel de développement à grande échelle dans des conditions économiques et environnementales acceptables. Cependant, cette technique présente une limitation liée à son rendement.

Le demandeur a montré que les dispositifs de l'art antérieur travaillaient avec une utilisation sous optimale de la lumière solaire et qu'il est possible d'augmenter

significativement le rendement. Ainsi, l'invention concerne une méthode et un dispositif qui améliorent le rendement de culture des algues. Cette amélioration de rendement permet d'améliorer la viabilité économique et le bilan environnemental (analyse de cycle de vie), notamment dans le cadre des bioraffineries.

Résumé de l'invention

Selon un premier aspect, l'invention concerne un dispositif pour la culture d'algues en lumière naturelle, comprenant une enceinte avec un milieu de culture et les algues à cultiver, caractérisé en ce que le dispositif comprend en outre un substrat agencé pour recevoir le rayonnement solaire en vue d'une photoconversion dudit rayonnement solaire, le substrat comprenant au moins un composé luminescent permettant de réémettre un rayonnement dont le spectre est adapté à l'optimisation d'un paramètre biologique d'intérêt résultant de la photosynthèse desdites algues.

Selon une première variante, le substrat est interposé entre le rayonnement solaire incident et l'enceinte.

Selon une deuxième variante, l'enceinte est formée d'un bassin de culture, recouvert au moins partiellement par le substrat.

Selon une troisième variante, le substrat constitue une paroi de l'enceinte.

Avantageusement, l'enceinte est formée par un circuit de tubes dans lequel circule le milieu de culture contenant les algues en suspension.

Dans un mode de réalisation, l'enceinte est formée par un sac souple formant le substrat, réalisé en un matériau

sensiblement transparent dopé avec au moins un composé luminescent.

Selon un autre mode de réalisation, le substrat comprend des particules mises en suspension dans le milieu de culture, le(s) composé(s) luminescent(s) étant incorporé(s) dans les particules.

Préférentiellement, le substrat comprend au moins 2 composés luminescents.

Dans un mode de réalisation préféré, d'au moins un desdits composés luminescents recouvre au moins partiellement le spectre d'émission d'au moins un des dits autres composés luminescents.

Avantageusement, au moins un desdits composés luminescents présente un spectre d'absorption couvrant la bande 300 - 360 nm et un spectre d'émission couvrant la bande 340 - 400 nm.

Selon une variante, au moins un desdits composés luminescents présente une émission selon un mécanisme anti-Stokes.

Selon une variante, le dispositif intègre une source de CO_2.

Selon une variante, le dispositif comprend en outre un concentrateur de l'énergie solaire incidente.

Dans un mode de réalisation particulier, le ou lesdits composés luminescents présentent des longueurs d'onde d'absorption ou d'émission qui favorisent la photosynthèse des algues.

Selon un second aspect, l'invention concerne un procédé de fabrication d'un dispositif de culture d'algues selon le premier aspect comprenant :

- l'exposition préalable desdites algues à cultiver à différentes longueurs d'onde ;

- la mesure pour chacune desdites longueurs d'onde d'un paramètre biologique d'intérêt et la détermination pour ledit paramètre d'une ou plusieurs longueurs d'onde adaptées;

- la sélection d'un ou plusieurs composés luminescents permettant la photoconversion de la lumière solaire auxdites longueurs d'onde adaptées ;

- la réalisation d'un substrat contenant le ou lesdits composés luminescents sélectionnés.

Dans une variante, ledit paramètre biologique d'intérêt est la vitesse de croissance des algues.

Dans une autre variante, le paramètre biologique d'intérêt est la production d'huile par les algues.

Dans une autre variante, ledit paramètre biologique d'intérêt est la production d'un pigment donné par les algues.

Selon un troisième aspect, l'invention concerne un procédé pour la culture d'algues en lumière naturelle, comprenant la mise en culture des algues dans une enceinte avec un milieu de culture, caractérisé en ce qu'il comprend en outre la photoconversion de la lumière solaire au moyen d'un substrat comprenant au moins un composé luminescent permettant de réémettre un rayonnement dont le spectre est adapté aux longueurs d'onde de photosynthèse desdites algues.

Par rapport aux calculs de K.M. Weyer et al. cités plus haut, le procédé selon l'invention conduit à une augmentation de 20 % à 100 % ou plus des maximaux tant théoriques que pratiques, pour une augmentation limitée des coûts en capital et opérationnel et apporte donc un avantage économique majeur. Cette technique est compatible avec de nombreux systèmes de

culture et cumulable avec d'autres améliorations plus classiques proposées par divers auteurs, notamment l'utilisation de souches d'algues sélectionnées ou génétiquement modifiées.

Brève description des figures

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description qui suit, illustrée par les figures qui représentent :

- la figure 1, un substrat luminescent intégré à la couverture d'un bassin de culture ;
- La figure 2, un substrat luminescent intégré aux parois d'un photobioréacteur ;
- La figure 3, un substrat luminescent dispersé à l'intérieur du milieu de culture.

Description détaillée

L'invention concerne des méthodes et dispositifs de modification de la lumière solaire permettant de s'affranchir de la limite du PAR (photosynthetically active radiation) telle qu'elle que présentée ci-avant.

La déposante a montré que c'est précisément en augmentant la valeur du PAR au-delà des 45.8 % conventionnellement admis par tous les auteurs, ce qui n'est pas suggéré dans la littérature, que le procédé selon l'invention permet, avec une très grande généralité et adaptabilité et pour un coût associé limité, d'améliorer le rendement des cultures d'algues au-delà du maximum actuellement admis par les spécialistes. L'invention est applicable à un grand nombre de systèmes de culture d'algues dont les photobioréacteurs et les systèmes plus simples de type bassin.

De fait, la notion de PAR est une simplification car certaines longueurs d'ondes du PAR - comme le vert (intervalle autour de 550 nm) pour les algues vertes - ne conduisent pas à une photosynthèse efficace. Le PAR est donc une majoration de la fraction du rayonnement solaire qui est effectivement convertie. Le procédé selon l'invention permet de modifier la lumière solaire afin de limiter ces longueurs d'ondes du PAR peu efficaces au profit de longueurs d'ondes plus efficaces.

La déposante a montré qu'en modifiant spectralement et de manière fine la lumière solaire incidente pour l'adapter aux besoins photosynthétiques de l'algue ou des algues cultivées, le procédé selon l'invention apporte une amélioration originale et quantitativement importante applicable à la quasi-totalité des procédés de culture d'algues à partir de la lumière solaire décrits ou envisagés dans la littérature.

L'invention concerne, selon son acception la plus générale un dispositif pour la culture d'algues en lumière naturelle, comprenant une enceinte avec un milieu de culture et les algues à cultiver, caractérisé en ce que le dispositif comprend en outre un substrat agencé pour recevoir le rayonnement solaire en vue d'une photoconversion dudit rayonnement solaire, le substrat comprenant au moins un composé luminescent permettant de réémettre un rayonnement dont le spectre est adapté à l'optimisation d'un paramètre biologique d'intérêt résultant de la photosynthèse desdites algues.

Les composés luminescents utilisés sont de préférence des molécules organiques fluorescentes et plus préférentiellement des molécules de type « dye laser ». On choisit des molécules présentant un rendement quantique élevé (supérieur à 0.6, de préférence supérieur à 0.9), un coût

réduit et une bonne stabilité à l'exposition UV-visible (plusieurs mois, de préférence plusieurs années).

Les composés luminescents utilisés peuvent inclure des terres rares comme des sels de terbium ou d'europium.

Les composés luminescents utilisés peuvent inclure des composés inorganiques de type quantum dots.

Les composés luminescents utilisés peuvent être choisis au sein des groupes de composés suivants :

Groupe A – émission vers 340 nm

- PPO diphenyloxazole (Lambda Physic Lambdachrome LC3700)

- POPOP (Lambdachrome LC4230)

- DPS (Lambdachrome LC4090)

- QUI P-quinqaphenyl (Lambdachrome LC3690)

Groupe B – émission vers 400 – 460 nm

- 8S OB thiophenediylbis benzoxazole

- Coumarin (plusieurs references Lambdachrome)

Groupe C – émission vers 560nm émission

- hostasole 3G naphtalimide (Clariant)

- lumogen 083 perylene (BASF)

- rhodamine 110 (Lambdachrome)

Groupe D – émission vers 580-640nm

- hostazole GG thioxanthene benzanthione (Clariant)

- lumogen 305 peylene (BASF)

-rhodamine 6G ethylaminoxanthene benzoique (Lambdachrome)

Groupe E – émission vers 640-680nm

- cretsyl violet diaminobenzole

- Sublforhodamine B (Lambdachrome LC6200)

Groupe F - 700-1000nm

- rhodamine 800 (Sigma)

- Pyridine 2 (Lambdachrome LC7600)

- DOTC – HITC (Lambdachrome LC7880)

- Styril 9(Lambdachrome LC8400)

En plus des molécules citées, de nombreuses molécules de type « laser dyes » connues de l'homme de métier et notamment plusieurs molécules nommées Coumarin ou Rhodamine (divers fabricants), ainsi que les molécules de la série des Lumogen Dyes (BASF / Color Flex) sont utilisables.

De préférence, on utilise une combinaison de plusieurs substances luminescentes qui comprend une substance du groupe A telle que le PPO ou bien deux substances du groupe A comme le PPO et l'OB, ainsi qu'une substance de chacun des 1 à 3 groupes suivantes (B, C, D, E ou F).

Les concentrations utilisées varient de préférence entre 0.1 et 1000 ppm, de préférence entre 1 et 100 ppm.

De préférence, on utilise un système d'absorption - émission en série où la longueur d'onde d'émission maximale d'une substance correspond à la longueur d'onde d'absorption maximale de la substance suivante de la série. On facilite ainsi des phénomènes de FRET (fluorescence resonance energy transfer) qui sont favorables d'un point de vue énergétique. Par exemple on utilise une substance du groupe A, une substance du groupe B et une substance du groupe C.

Suivant les concentrations utilisées et suivant les caractéristiques physico-chimiques de la matrice dans laquelle les substances luminescentes sont intégrées, on peut observer l'apparition de phénomènes de type excimères (« excited dimers »), qui modifient, de manière avantageuse, les propriétés optiques des substances prises à l'état de monomères. Les concentrations favorisant l'apparition d'excimères dans une matrice données sont recherchées et peuvent être déterminées empiriquement.

De préférence, lorsqu'on utilise plusieurs substances luminescentes, les concentrations employées diminuent lorsque la longueur d'onde d'émission augmente. Cette règle de concentration non triviale s'inspire de ce qui est observé dans les phycobillisomes et elle permet de limiter les phénomènes d'auto-absorption.

Le substrat dans lequel sont intégrées les substances luminescentes est un plastique, par exemple un plastique acrylique comme le polymethylemethacrylate (PMMA) ou encore de l'ethylene vinyl acetate (EVA), de l'Apoliah (Arkema), du polyvinylidene fluoride (PVDF), du polyethylene (PE), du polycarbonate (PC).

Selon une variante, les substances luminescentes sont intégrées au sein d'une résine ou vernis qui est étalé sur des plaques ou des tubes de verre.

Selon une variante, on intègre dans le substrat des particules de TiO2 et/ou d'oxyde d'aluminium à 0.1-0.5 % massique, qui jouent le rôle de diffuseur de lumière et réflecteur UV.

Dans un mode de réalisation particulier, les substances luminescentes sont incorporées au sein de billes millimétriques de polystyrene, de PMMA ou d'un autre polymère, qui sont mises en suspension dans le milieu de culture. Avantageusement, ces billes permettent également de nettoyer les parois du récipient contenant la culture et d'éviter leur encrassement. Les billes constituent ainsi une source de lumière interne au milieu de culture et permettent de lever une limitation des dispositifs de l'art antérieur concernant la répartition de la lumière au sein du volume de culture.

Dans une variante, les dites billes millimétriques sont rendues phosphorescentes par l'emploi de substances dites à longue rémanence ($>10^{-3}$ s). Les billes phosphorescentes, qui circulent dans le milieu de culture, ont été préalablement éclairées soit par la lumière solaire, soit par un flash UV ou une autre source de lumière artificielle monochromatique à haute énergie. De telles billes peuvent être utilisées le jour comme la nuit. Elles peuvent comprendre des cristaux de ZnS avec 10-1000 ppm de dopants cuivre ou argent.

Dans une variante, l'une des substances luminescentes utilisées est choisie par l'homme de métier de façon à convertir, par un mécanisme de type anti-Stokes, une partie du rayonnement infrarouge (700-2000 nm) en rayonnement visible, de préférence en rayonnement rouge (600-700 nm).

Des avantages complémentaires apportés par le procédé selon l'invention sont décrits de façon non limitative ci-dessous :

Avantage lié à la création d'une lumière diffuse

L'utilisation de substances luminescentes selon l'invention conduit à une réémission de la lumière solaire incidente dans toutes les directions de l'espace. En pratique une substance luminescente donnée réémet la lumière incidente de manière anisotrope (avec une distribution en forme de « doughnut ») mais l'orientation de ladite substance au sein du matériau transformant la lumière, qui est elle-même aléatoire, conduit à une réémission statistiquement isotrope à 4pi stéradians. Ceci permet de transformer la lumière solaire directe incidente en une lumière diffuse. La lumière diffuse ainsi obtenue est favorable à la pousse des algues, car elle limite les phénomènes de photoinhibition.

Par ailleurs le procédé selon l'invention favorise la pousse des algues à la fois lorsqu'elles sont éclairées par une lumière solaire directe et lorsque la lumière qui les éclaire est elle-même diffuse ou rémanente, ce qui est le cas lorsque les conditions météorologiques incluent la présence de nuages et/ou de vapeur d'eau.

Avantage lié à la limitation des rayonnements ultraviolets

Le procédé selon l'invention absorbe une partie de la lumière UV du soleil (260-400 nm) qui est réémise dans des longueurs d'onde du visible (400 nm et plus). Ceci permet de limiter l'exposition des algues aux UV dont l'homme de métier sait qu'elle peut limiter la pousse des dites algues, voire, dans certains cas, conduire à des mutations qui peuvent rendre génétiquement inhomogène et finalement déstabiliser l'espèce cultivée.

Avantages thermiques

La modification de la lumière solaire réalisée par le procédé selon l'invention conduit à une modification avantageuse du profil de température auquel sont soumis les cultures d'algues. L'effet dépend du dispositif de culture choisi (photobioréacteur, serre, sac ou bassin ouvert) mais il combine, avec une plus ou moins grande intensité, d'une part une diminution de la valeur moyenne et du maximum de la température le jour et d'autre part une augmentation de la valeur moyenne et du minimum de la température la nuit. Ces deux effets thermiques augmentent la productivité moyenne des cultures d'algues. Ils permettent en outre de limiter l'occurrence de cas de températures extrêmes défavorables pouvant conduire à l'extinction de cultures d'algues ayant été exposées à des températures anormalement chaudes ou anormalement froides.

Application au cas des algues vertes, rouges, brunes et des cyanobactéries

Le procédé selon l'invention permet de modifier la lumière solaire pour l'adapter aux besoins des diverses espèces d'algues.

Ainsi les algues vertes disposent d'un appareil photosynthétique qui rend la photosynthèse particulièrement efficace en présence d'un éclairement bleu (440 nm) et rouge (680 nm). Le procédé selon l'invention permet, en utilisant une combinaison de substances luminescentes appropriées, de modifier la lumière solaire naturelle dont le spectre présente un maximum unique vers 550 nm pour obtenir une lumière dont le spectre présente deux maxima, le premier vers 440 nm et le second vers 680 nm. On utilise par exemple une substance du groupe A, une substance du groupe B et une substance du groupe D.

Contrairement aux algues vertes, les algues rouges utilisent mal la lumière bleu et la lumière rouge mais se reproduisent avec une efficacité maximale lorsqu'elles sont éclairées par de la lumière verte, autour de 560 nm. Le procédé selon l'invention permet, en utilisant une combinaison de substances luminescentes appropriées, de modifier le spectre solaire pour augmenter l'intensité de son maximum vers 550 nm et diminuer l'intensité d'une ou plusieurs autres régions du spectre. On utilise par exemple une substance du groupe A, une substance du groupe B et une substance du groupe C.

Contrairement aux algues, les cyanobactéries n'ont pas de chloroplastes. Ces cellules procaryotes disposent d'un appareil photosynthétique et d'un équipement en pigment particulier, ce qui les conduit à croître de manière optimale lorsqu'elles sont éclairées par une lumière enrichie en longueurs d'ondes comprises entre 580 et 650 nm. Le procédé selon l'invention permet d'enrichir la lumière solaire entre 580 et 650 nm par conversion des longueurs d'ondes inférieures à 580 nm (et/ou des longueurs d'ondes supérieurs à 650 nm). On utilise par exemple une substance du groupe A, une substance du groupe B, une substance du groupe E et une substance du groupe F.

Il est cependant important de noter que la relation entre équipement en pigments photosynthétiques ou pigments accessoires, spectre d'absorption de la culture et spectre d'action photosynthétique n'est pas toujours simple et bien comprise (il arrive qu'une partie des gammes de longueurs d'ondes dans lesquelles les pigments isolés et la culture d'algue absorbent efficacement ne correspondent pas à un rendement photosynthétique élevé). Une mesure empirique du spectre d'action est donc généralement préférable et présentée ci-dessous.

Un mode de réalisation privilégié est décrit ci-dessous permettant d'augmenter la productivité de la culture d'une espèce d'algue donnée.

Au-delà des caractéristiques générales indiquées plus haut, il peut être avantageux en pratique de mesurer le spectre d'action d'une espèce particulière.

Etape 0 – On choisit une espèce d'algue donnée, isolée d'un habitat naturel ou génétiquement modifiée, qu'on souhaite cultiver.

Etape 1 - On utilise une source de lumière blanche à large spectre et un monochromateur ou bien une lumière filtrée par divers filtres interférentiels et ajustée en puissance pour que chaque couleur transmise par le filtre ait la même intensité, ou bien, préférentiellement, on utilise une source de lumière colorée, par exemple des LEDs bleu, verte, rouge, etc. d'intensité identiques. On soumet ainsi la culture d'algue à différentes gammes de longueurs d'ondes.

Etape 2 - On mesure, pour chaque condition d'éclairement, l'activité photosynthétique des algues (par exemple en mesurant en continu l'oxygène produit) et/ou le dioxyde de carbone consommé) et on en déduit un spectre de la productivité moyenne (g/L/jour) en fonction de la longueur d'onde de la lumière incident.

Etape 3 - On sélectionne une combinaison de substances luminescentes afin de modifier la lumière solaire, dont le spectre est par ailleurs aisé à établir, pour la concentrer dans les longueurs d'ondes dont on vient d'observer empiriquement qu'elles conduisaient à une productivité maximale des cultures d'algues.

Etape 4 – On intègre des substances luminescentes dont la composition vient d'être déterminée à l'étape 3 au sein d'un mélange maître.

Etape 5 – On mélange ledit mélange maître, un monomère, et d'éventuels additifs connus de l'homme de métier pour fabriquer un matériau plastique.

Etape 6- On extrude ledit matériau plastique dopé et on réalise ainsi des plaques et des tubes ou des films à partir desquels on construit un photobioréacteur ou un élément de couverture qui accélère la croissance des algues choisies à l'étape 0.

Application à l'augmentation de la production d'un composé donné par une espèce d'algue

Les algues peuvent permettre la production de divers composés d'intérêt comme des pigments. On peut empiriquement, en réalisant des cultures d'algue contrôlées pour divers intervalles de longueurs d'ondes (par exemple avec douze LEDs de même puissance éclairant dans dix intervalles de longueur d'onde compris entre 350 et 950 nm : 350-400nm, 400-450nm, 450-500nm etc.), identifier un intervalle optimal de longueur d'onde qui conduit à l'obtention d'une plus grande quantité du composé d'intérêt. On adapte ensuite les compositions en substances luminescentes utilisées dans le procédé selon l'invention afin de modifier la lumière solaire pour la concentrer dans l'intervalle optimal.

Application à la production d'huile

Certaines espèces d'algues peuvent contenir une quantité importante d'huile, jusqu'à 50 % ou plus de leur poids sec. Cependant, les hommes du métier ont observé qu'en général, les conditions qui permettent à des algues de croître à une vitesse maximale sont différentes des conditions qui

leur permettent à chaque cellule d'accumuler une grande quantité de lipides. Souvent, on modifie donc, au moment opportun de la production, les conditions de culture d'une culture d'algues qui croît rapidement afin de favoriser, dans un deuxième temps, l'accumulation de lipides. Divers types de stress sont possibles, notamment un stress par privation d'azote. Le procédé selon l'invention offre la possibilité d'utiliser une modification de la lumière pour générer un stress favorisant la production de lipides. La nature du spectre Soil adapté à la génération dudit stress peut être déterminé en laboratoire par une analyse de la réponse (taux de lipides par gramme de matière sèche) d'une culture de l'algue d'intérêt exposée à différentes longueurs d'ondes de lumière artificielle. On peut ensuite soumettre, au moment opportun de la production, une culture à large échelle de l'algue d'intérêt, à une lumière solaire modifiée par le procédé selon l'invention afin d'obtenir une composition théorique proche rendre proche du spectre Soil idéal préalablement déterminé. Ceci permet à ladite culture d'accumuler une grande quantité de lipides.

Systèmes de culture hybrides

Le procédé suivant l'invention est applicable à des systèmes de culture hybrides combinant les avantages des photobioréacteurs (environnement contrôlé, haute productivité) et des bassins (coût plus réduit). Ainsi on peut dans un premier temps réaliser une pré-culture d'algue dans un photobioréacteurs équipé, ou non, de la technologie AlgoSun puis transférer cette préculture dans un bassin équipé de la technologie AlgoSun. Des portions différentes du réacteur peuvent comporter des matériaux dopés différemment.

Les exemples ci-dessous illustrent de façon non limitative des exemples de réalisation du dispositif selon l'invention.

Exemple 1 - Photobioréacteurs tubulaires

Les algues sont cultivées dans un dispositif comprenant un réseau de tubes de plastique de diamètre compris entre 5 et 20 cm et d'une longueur totale pouvant atteindre plusieurs km. Une vue en coupe d'une partie du dispositif est représentée de façon schématique sur la figure 2. Des algues 20 sont mises en culture au sein d'un photobioréacteur tubulaire éclairé par la lumière naturelle 30. La paroi 15 du photobioréacteur reçoit la lumière solaire et est composée d'un matériau qui comprend au moins en son sein un composé luminescent permettant de réémettre un rayonnement dont le spectre est adapté aux algues. Le dispositif intègre des pompes et un système d'injection de dioxyde de carbone concentré. Le plastique des tubes est dopé, avant extrusion, par une combinaison de substances luminescentes choisies de manière à modifier la lumière solaire en fonction des besoins physiologique de l'espèce d'algue considérée, tels que déterminés préalablement expérimentalement. Le polymethylmethacrylate (PMMA) est un exemple de plastique acrylique qui offre d'excellentes propriétés optiques et permet une bonne intégration des substances luminescentes et peut être utilisé pour la fabrication des tubes. On utilise une épaisseur de PMMA comprise entre 1 et 5 mm. Pour des algues vertes, on utilise par exemple la formule suivante pour des plaques de PMMA de 3mm, pour 1 kg de MMA :

- 0,44 g de PPO (Lambdachrome)
- 0,22 g d'OB
- 0,06 g de rhodamine 800 (Sigma)
- 0,12 g de cretsyl violet (Clariant).

Exemple 2 - Sacs

Une solution moins onéreuse pour cultiver des algues consiste à utiliser des sacs. Ces sacs peuvent être disposés en plein air, dans une zone close ou encore flotter sur la mer (on utilise alors de préférence des sacs semi-perméables qui peuvent laisser sortir de l'eau et échanger des nutriments avec l'eau de mer mais retiennent les algues). Le plastique composant les sacs peut être un polymère de type polyethylène-ethylène vinyl acetate (PE-EVA), Apoliah (Arkema) ou encore du PMMA. L'épaisseur des sacs est comprise entre 100 µm et 500µm. Le plastique est dopé, avant extrusion, par une combinaison de substances luminescentes choisies de manière à modifier la lumière solaire en fonction des besoins physiologiques de l'espèce d'algue considérée, tels que déterminés préalablement expérimentalement.

Exemple 3 – Abris

L'ensemble du dispositif de culture des algues, qui peut inclure des tubes, des cuves ou des panneaux, est intégré au sein d'une structure de type « abris » clos ou semi-clos qui joue un rôle positif en termes de régulation thermique, lumineuse, protection vis-à-vis de parasites ou prédateurs et des intempéries. Les parois de la serre sont composées de verre dont la face interne a été enduite d'une résine dopée par une combinaison de substances luminescentes choisies de manière à modifier la lumière solaire en fonction des besoins physiologique de l'espèce d'algue considérée, tels que déterminés préalablement expérimentalement. Alternativement, le verre enduit peut être remplacé par des plaques de PMMA dopées.

Exemple 4 – Film

Les algues sont cultivées dans un dispositif en plein air de type bassin hypodrome (« raceway ») ou de type tranchée («trough »). Une vue en coupe d'une partie d'un tel dispositif

est représentée sur la figure 1. Dans la terre 10, on creuse une tranchée 11 jouant le rôle d'enceinte éclairée par la lumière naturelle 30 au sein de laquelle des algues 20 sont mises en suspension dans un milieu aqueux de surface supérieure 12. La lumière solaire est reçue et modifiée par un film souple ou une plaque rigide 40 qui comprend au moins un composé luminescent permettant de réémettre un rayonnement dont le spectre est adapté aux algues.

Les éléments de bassin ou les tranchées sont recouverts par le film souple ou légèrement rigide, par exemple en plastique dopé par une combinaison de substance luminescentes choisies de manière à modifier la lumière solaire en fonction des besoins physiologique de l'espèce d'algue considérée, tels que déterminés préalablement expérimentalement. Le film peut être composé de PMMA, PE-EVA ou PVDF.

Exemple 5 – Billes millimétriques

La figure 3 représente une vue en coupe d'une partie d'un dispositif selon une variante. Un système clos de type photobioréacteur tubulaire 16 est éclairé par la lumière naturelle 30 pour permettre la culture d'algues 20. On dispose, au sein du milieu de culture, des particules 45 contenant au moins un composé luminescent qui émet un rayonnement dont le spectre est adapté aux algues.

Les particules sont par exemple formées de billes d'un diamètre compris entre 1 mm et 5 mm. Ces billes peuvent être des billes classiquement utilisées pour nettoyer la paroi des tubes et éviter la formation d'une pellicule d'algues adhérente à la surface des tubes et qui finirait par empêcher la pénétration de la lumière. On donne, par le procédé selon l'invention, une nouvelle fonction aux dites billes, qui sont dopées par des substances luminescentes de rémanence courte et/ou longue (substances phosphorescentes) ce dernier cas

permettant de travailler également en toute obscurité. Ainsi les billes, qui sont constamment agitées par le mouvement imposé au fluide du photobioréacteur, réalisent, au sein même du milieu de culture, une adaptation spectrale et elles constituent une source de lumière diffuse interne qui favorise la pousse des algues dans tout le volume aqueux. Les billes peuvent être fabriquées à partir de polymethylmethacrylate (PMMA), polypropylene, nylon, PVC ou polyvinylacetate. On peut utiliser des billes de polystyrène ou des billes de polymethlmethacrylate (PMMA). On peut utiliser un agent porophore afin de diminuer la densité des billes tout en créant des vacuoles de piégeage ou concentration de photons.

Bien que décrite à travers un certain nombre d'exemples de réalisation détaillés, le dispositif de détection et la méthode selon l'invention comprend différentes variantes, modifications et perfectionnements qui apparaîtront de façon évidente à l'homme de l'art, étant entendu que ces différentes variantes, modifications et perfectionnements font partie de la portée de l'invention, telle que définie par les revendications qui suivent.

Revendications

1 - Dispositif pour la culture d'algues en lumière naturelle, comprenant une enceinte avec un milieu de culture et les algues à cultiver, caractérisé en ce que le dispositif comprend en outre un substrat agencé pour recevoir le rayonnement solaire en vue d'une photoconversion dudit rayonnement solaire, le substrat comprenant au moins un composé luminescent permettant de réémettre un rayonnement dont le spectre est adapté à l'optimisation d'un paramètre biologique d'intérêt résultant de la photosynthèse desdites algues.

2 - Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit substrat est interposé entre le rayonnement solaire incident et l'enceinte.

3 - Dispositif selon la revendication 2, caractérisé en ce que l'enceinte est formée d'un bassin de culture, recouvert au moins partiellement par ledit substrat.

4 - Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit substrat constitue une paroi de l'enceinte.

5 - Dispositif selon la revendication 4, caractérisé en ce que l'enceinte est formée par un circuit de tubes dans lequel circule le milieu de culture et les algues en suspension.

6 - Dispositif selon la revendication 4, caractérisé en ce que l'enceinte est formée par un sac souple formant le substrat, réalisé en un matériau sensiblement transparent dopé avec le(s)dit(s) composé(s) luminescent(s).

7 - Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que le substrat comprend des particules

mises en suspension dans le milieu de culture, le composé luminescent étant incorporé dans lesdites particules.

8 - Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que le substrat comprend au moins 2 composés luminescents.

9 - Dispositif selon la revendication 8, caractérisé en ce que le spectre d'absorption d'au moins un desdits composés luminescents recouvre au moins partiellement le spectre d'émission d'au moins un des dits autres composés luminescents.

10 - Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'au moins un desdits composés luminescents présente un spectre d'absorption couvrant la bande 300 - 360 nm et un spectre d'émission couvrant la bande 340 - 400 nm.

11 - Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'au moins un desdits composés luminescents présente une émission selon un mécanisme anti-Stokes.

12 - Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il comprend en outre une source de CO2.

13 - Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il comprend en outre un concentrateur de l'énergie solaire incidente.

14 - Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le ou lesdits composés luminescents présentent des longueurs d'onde d'absorption ou d'émission favorisant la photosynthèse des algues.

15 - Procédé de fabrication d'un dispositif selon l'une des revendications précédentes, comprenant :

- l'exposition préalable desdites algues à cultiver à différentes longueurs d'onde ;

- la mesure pour chacune desdites longueurs d'onde d'un paramètre biologique d'intérêt et la détermination pour ledit paramètre d'une ou plusieurs longueurs d'onde adaptées;

- la sélection d'un ou plusieurs composés luminescents permettant la photoconversion de la lumière solaire auxdites longueurs d'onde adaptées ;

- la réalisation dudit substrat avec le ou lesdits composés luminescents sélectionnés.

16 - Procédé selon la revendication 15, caractérisé en ce que ledit paramètre biologique d'intérêt est la vitesse de croissance des algues.

17 - Procédé selon la revendication 15, caractérisé en ce que ledit paramètre biologique d'intérêt est la production d'huile par les algues.

18 - Procédé selon la revendication 15, caractérisé en ce que ledit paramètre biologique d'intérêt est la production d'un pigment donné par les algues.

19- Procédé pour la culture d'algues en lumière naturelle, comprenant la mise en culture des algues dans une enceinte avec un milieu de culture, caractérisé en ce qu'il comprend en outre la photoconversion de la lumière solaire au moyen d'un substrat comprenant au moins un composé luminescent permettant de réémettre un rayonnement dont le spectre est adapté aux longueurs d'onde de photosynthèse desdites algues.

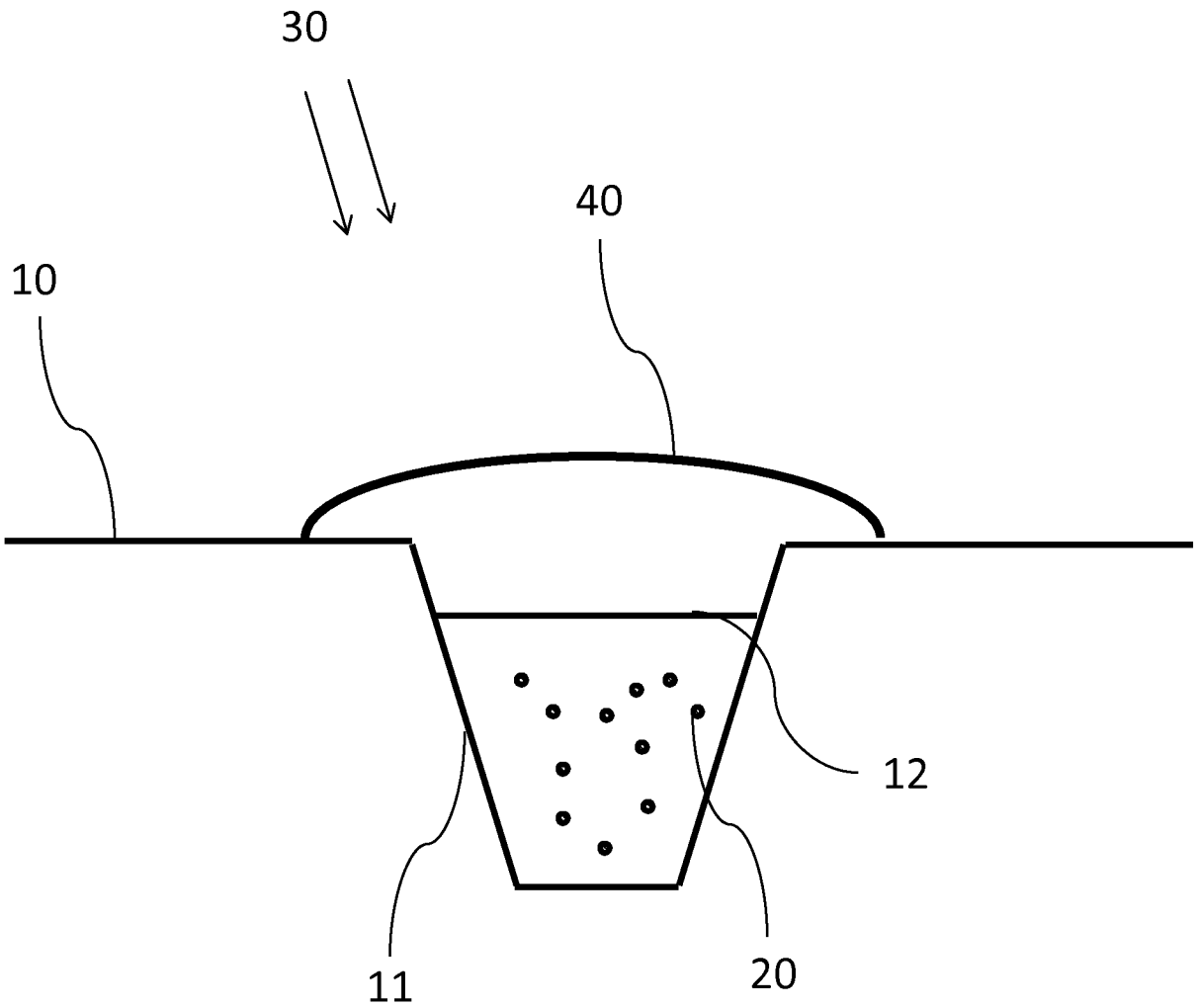


Figure 1

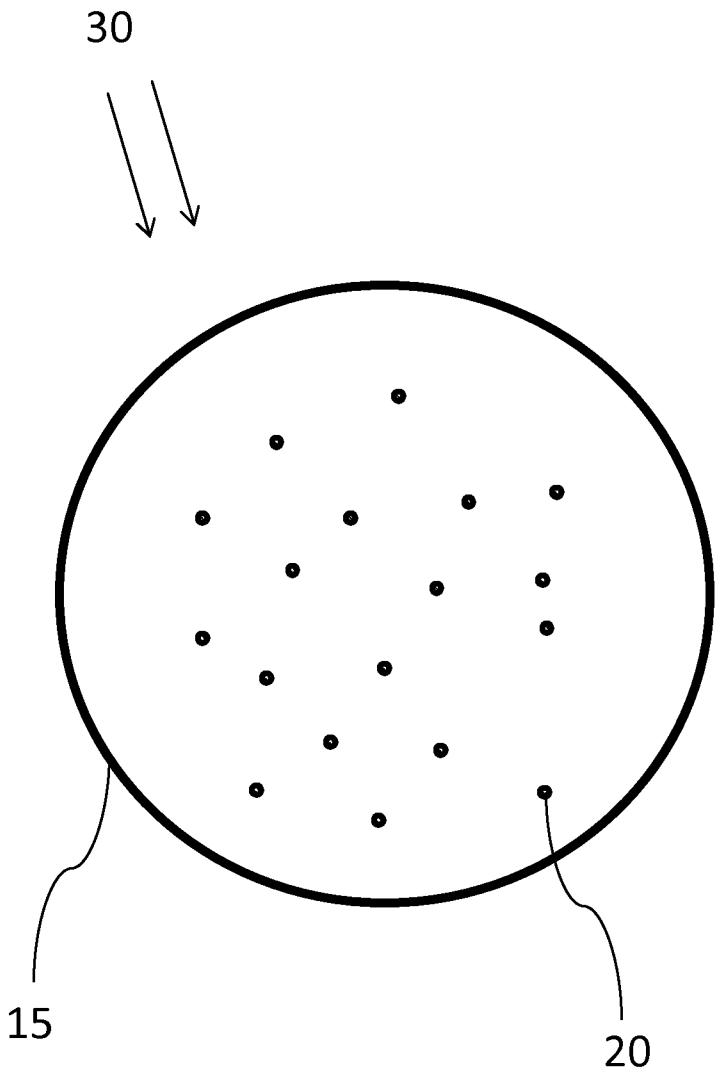


Figure 2

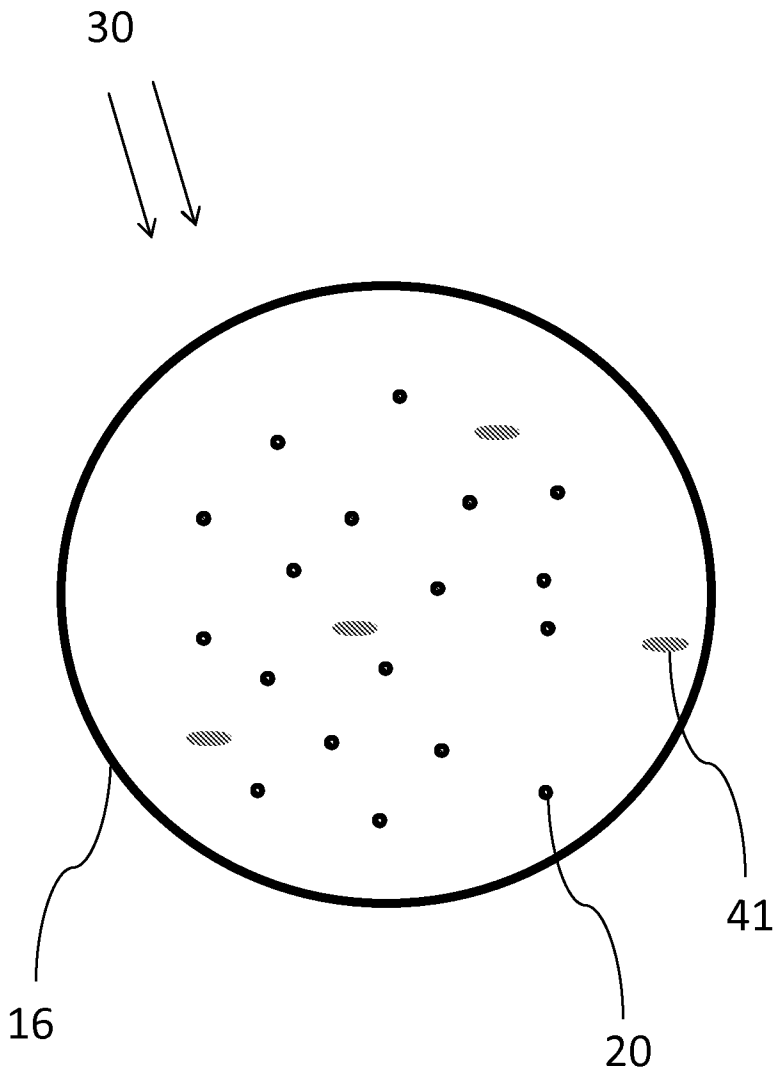


Figure 3