

(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
19 mars 2020 (19.03.2020)



(10) Numéro de publication internationale
WO 2020/053527 A1

(51) Classification internationale des brevets :

C25B 1/10 (2006.01) C25B 9/08 (2006.01)
C25B 3/00 (2006.01) C25B 11/04 (2006.01)
C25B 3/04 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/FR2019/052108

(22) Date de dépôt international :

12 septembre 2019 (12.09.2019)

(25) Langue de dépôt :

français

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

1858237 13 septembre 2018 (13.09.2018) FR

(71) Déposant : INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES POUR L'ENVIRONNEMENT ET L'AGRICULTURE (IRSTEA) [FR/FR] ; 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030, 92761 ANTONY CEDEX (FR).

(72) Inventeurs : BOUCHEZ, Théodore ; 5 rue de la Loutre, 91630 VILLEMORISON (FR). TIAN, Jianghao ; 17 Avenue Nationale, 91300 MASSY (FR).

(74) Mandataire : LE CLOIREC, Claudine et al. ; IPSILON, 3, rue Edouard Nignon, 44300 Nantes (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, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,

(54) Title: BIO-ELECTROCHEMICAL REACTOR COMPRISING A BIOANODE AND AN ABIOTIC ANODE, AND USE THEREOF FOR MICROBIAL ELECTROSYNTHESIS

(54) Titre : RÉACTEUR BIO-ÉLECTROCHIMIQUE COMPORTANT UNE BIO-ANODE ET UNE ANODE ABIOTIQUE ET SON UTILISATION POUR L'ÉLECTROSYNTHÈSE MICROBIENNE

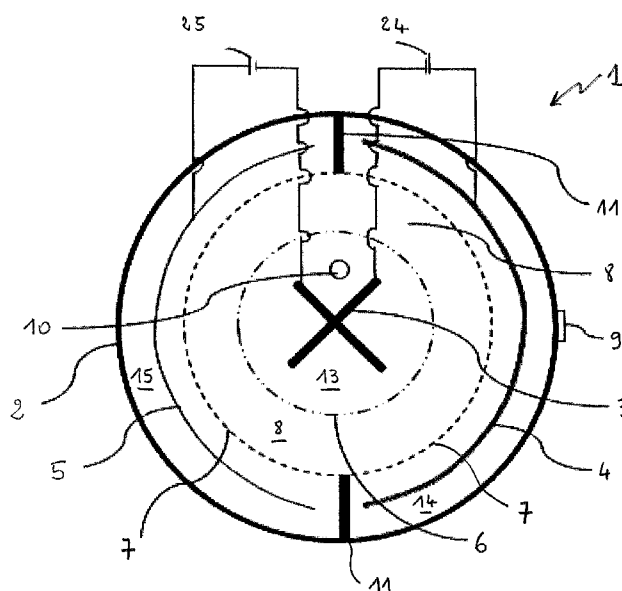


Fig.1

(57) Abstract: Bio-electrochemical reactor (1) comprising at least one bio-anode (4) and at least one bio-cathode (3) which are immersed in an electrolyte containing micro-organisms in an anode compartment (14), referred to as the first compartment, and in a cathode compartment (13), respectively, the anode and cathode compartments being separated by at least one ion exchange membrane, the first anode compartment (14) comprising a port (9) for introducing organic carbon-containing substrate, a first potential difference (24) being applied, during operation, between the bio-anode (4) and the bio-cathode (3). The reactor comprises a second anode compartment (15)

HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, 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, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, 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, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

- avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2(h))

containing an electrolyte which is devoid of electro-active micro-organisms and in which an abiotic anode (5) is immersed, a second potential difference (25) being able to be applied, during operation, between the abiotic anode and the bio-cathode. Use for microbial electrosynthesis from bio-waste.

(57) Abrégé : Réacteur (1) bio-électrochimique comportant au moins une bio-anode(4) et au moins une bio-cathode(3) immergées dans un électrolyte contenant des microorganismes respectivement dans un compartiment anodique(14), dénommé premier compartiment, et dans un compartiment cathodique(13), les compartiments anodique et cathodique étant séparés par au moins une membrane échangeuse d'ions, le premier compartiment anodique (14) comportant un port (9) d'introduction de substrat carboné organique, une première différence de potentiel (24) étant appliquée, en fonctionnement, entre la bio-anode (4) et la bio-cathode(3). Le réacteur comporte un second compartiment anodique (15) renfermant un électrolyte, dépourvu de microorganismes électro-actifs, dans lequel plonge une anode abiotique(5), une seconde différence de potentiel (25) pouvant être appliquée, en fonctionnement entre l'anode abiotique et la bio-cathode. Utilisation pour l'électrosynthèse microbienne à partir de bio-déchets.

Réacteur bio-électrochimique comportant une bio-anode et une anode abiotique et son utilisation pour l'électrosynthèse microbienne

5

DOMAINE DE L'INVENTION

La présente invention concerne le domaine bio-électrochimique, et concerne plus particulièrement les systèmes et les procédés de synthèse électrochimique mettant en œuvre des réacteurs bio-électrochimiques c'est-à-dire des dispositifs électrochimiques dont les électrodes, appelées bio-électrodes, sont au contact de microorganismes.

ETAT DE LA TECHNIQUE

Ces réacteurs de synthèses bio-électrochimiques permettent notamment, à partir de déchets organiques, de produire des molécules organiques telles que des acides organiques et/ou des alcools.

En particulier, il a été mis au point récemment un tel dispositif bio-électrochimique, qui comporte à la fois une bio-anode et une bio-cathode, l'électrolyte du compartiment anodique ainsi que l'électrolyte du compartiment cathodique renfermant des microorganismes électro-actifs (WO2016/051064). Dans ce dispositif, l'activité de la bio-cathode est optimisée en vue de la production d'espèces chimiques particulières dans l'électrolyte, tels que des acides acétique, lactique et/ou propionique ou des alcools. Ces synthèses de molécules organiques par voie microbienne (dénommées électrosynthèses microbiennes) sont réalisées grâce à des bactéries électro-actives présentes à la surface de l'électrode ou dans le catholyte.

Un des problèmes actuels à résoudre est d'améliorer la fiabilité et durabilité de ces dispositifs bio-électrochimiques, en vue d'applications au stade industriel. Plus particulièrement, dans ces procédés d'électrosynthèse microbienne, le courant électrique est produit à partir de biodéchets, par oxydation des molécules organiques de ces déchets à la bio-anode. Ces procédés présentent

un double intérêt, à la fois économique et écologique pour le traitement des biodéchets.

Cependant un des inconvénients est la dépendance de la disponibilité de ces biodéchets et la fluctuation de leur teneur en carbone organique. Une baisse de la DCO (Demande Chimique en Oxygène) de ces biodéchets conduit à une baisse du rendement de la cellule d'électrosynthèse microbienne.

BUTS DE L'INVENTION

Le but principal de l'invention est donc de proposer un moyen de lutter contre ces fluctuations de l'activité électrochimique du réacteur bio-électrochimique.

Un autre but de l'invention est de proposer un dispositif simple permettant de pallier les diminutions d'activité électrochimique du réacteur bio-électrochimique, de préférence inclus dans ledit réacteur et ne nécessitant pas de manipulations complexes de l'opérateur.

Un autre but de l'invention est de proposer un réacteur bio-électrochimique pouvant être opéré à grande échelle pour des applications au stade industriel.

Un autre but de l'invention est de proposer un réacteur bio-électrochimique, comportant une bio-anode et une bio-cathode, pouvant être utilisé en tant que réacteur d'électrosynthèse microbienne permettant d'optimiser encore la récupération des molécules organiques synthétisées, telles que des acides carboxyliques.

DESCRIPTION DE L'INVENTION

A cet effet la présente invention concerne un réacteur bio-électrochimique comportant au moins une bio-anode et au moins une bio-cathode immergées dans un électrolyte contenant des microorganismes respectivement dans un compartiment anodique, dénommé premier compartiment, et dans un compartiment cathodique, les compartiments anodique et cathodique étant séparés par au moins une membrane échangeuse d'ions, le premier compartiment anodique comportant un port d'introduction de substrat carboné

organique, une première différence de potentiel étant appliquée, en fonctionnement, entre la bio-anode et la bio-cathode, caractérisé en ce qu'il comporte un second compartiment anodique renfermant un électrolyte, dépourvu de microorganismes électro-actifs, dans lequel plonge
5 une anode abiotique, une seconde différence de potentiel pouvant être appliquée, en fonctionnement entre l'anode abiotique et la bio-cathode.

Au sens de l'invention, une «bio-électrode» («bio-anode» ou «bio-cathode») est une électrode recouverte au moins en partie d'un biofilm bactérien comprenant
10 des organismes électro-actifs, c'est-à-dire recouverte au moins sur une partie de sa surface immergée dans l'électrolyte par un biofilm bactérien. Selon un mode de réalisation, la totalité de la surface immergée de la bio-électrode est recouverte de biofilm. Alternativement, selon un autre mode de réalisation, une partie seulement de la surface de la bio-électrode est recouverte de biofilm.
15 Dans ce dernier mode de réalisation, la surface recouverte de biofilm est suffisante pour générer l'activité recherchée, notamment dans le cas d'une oxydation de déchets organiques ou d'une synthèse bio-électrochimique.

Selon la présente invention, l'ajout de cette électrode auxiliaire, l'anode
20 abiotique, dans un second compartiment anodique, permet, lors d'un déficit en matière organique dans l'alimentation en substrat dans le premier compartiment anodique, de réaliser une oxydation de l'eau, ou de tout autre électrolyte, par application d'une seconde différence de potentiel entre ladite anode abiotique et la bio-cathode, c'est-à-dire sans arrêter le fonctionnement du réacteur bio-
25 électrochimique.

De manière avantageuse, le second compartiment anodique est séparé du compartiment cathodique par au moins une membrane échangeuse d'ions.

30 Selon un mode de réalisation préféré, les premier et second compartiments anodiques sont séparés du compartiment cathodique par, en allant de l'anode ou la bio-anode vers la bio-cathode, une membrane échangeuse de cations et une membrane échangeuse d'anions, lesdites membranes échangeuses de

cations et d'anions étant séparées l'une de l'autre par un compartiment intermembranaire de collecte des molécules produites par le réacteur en fonctionnement.

- 5 Ledit compartiment intermembranaire est avantageusement un compartiment unique, c'est-à-dire un compartiment commun disposé entre, d'une part, la ou les membranes cationiques des deux compartiments anodiques et, d'autre part, la membrane anionique du compartiment cathodique.
- 10 Ainsi, lors de l'électrolyse de l'eau dans le second compartiment anodique, des protons sont générés. Ces protons peuvent ensuite migrer vers le compartiment intermembranaire via la membrane échangeuse de cations, contribuer ainsi à l'acidification de ce compartiment et augmenter la proportion d'acides carboxyliques non ionisés qui est la forme intéressante en vue d'une
- 15 valorisation. Ainsi le réacteur selon l'invention permet d'optimiser la récupération des acides carboxyliques sous forme non dissociée dans le compartiment intermembranaire.

- Le second compartiment anodique abiotique peut présenter un pH très acide
- 20 sans risque de désactiver les microorganismes électro-actifs du premier compartiment anodique. L'acidité du second compartiment anodique est d'ailleurs entretenue par l'activité de l'anode abiotique qui génère des protons.

- Dans le cas où le réacteur selon l'invention est un réacteur d'électrosynthèse
- 25 microbienne, il comprend une anode non-biologique, dénommée anode abiotique, ainsi qu'une bio-anode qui est le support pour des bactéries électro-actives. Ces bactéries sont capables de dégrader des déchets organiques solubilisés et ainsi produire du courant électrique sur la bio-anode. D'autres bactéries électro-actives sur la bio-cathode du réacteur sont aptes à utiliser ce
- 30 courant pour réduire le CO₂ en acides organiques sous forme d'anions, tel que par exemple de réduire le CO₂ en acétate. Les acides organiques synthétisés à la bio-cathode sous forme anionique, migrent au travers de la membrane anionique vers ledit compartiment intermembranaire. L'anode abiotique permet

ainsi d'offrir des électrons à la bio-cathode avec la bio-anode, de continuer à produire du courant en carence de déchet organique, ainsi que de produire l'acidité dans le compartiment intermembranaire pour faciliter l'extraction des molécules produites par la bio-cathode (notamment des acides carboxyliques sous forme non-ionisée).

Selon un mode de réalisation avantageux, le réacteur peut se présenter sous une forme cylindrique, la bio-cathode étant disposée au centre du cylindre et étant entourée par, en allant vers l'extérieur, la membrane échangeuse d'anions, le compartiment intermembranaire et la membrane échangeuse de cations, les premier et second compartiments anodiques occupant chacun une portion de l'espace annulaire entourant la membrane échangeuse de cations, et étant séparés l'un de l'autre par une paroi étanche.

Par paroi étanche on entend ici une paroi séparatrice étanche à tout fluide, ne laissant passer ni les gaz, ni les liquides.

Cette disposition particulière cylindrique présente l'avantage d'un réacteur compact, les compartiments anodiques entourant le compartiment intermembranaire, lui-même entourant le compartiment cathodique. Une telle géométrie permet également de réaliser des réacteurs où le volume des compartiments anodiques est bien supérieur à celui du compartiment cathodique.

De préférence, le second compartiment anodique (aussi dénommé compartiment abiotique) présente un volume inférieur ou égal au premier compartiment anodique (aussi dénommé compartiment biotique). Un volume inférieur permet au pH du compartiment abiotique de descendre plus rapidement lorsqu'un courant circule entre l'anode abiotique et la cathode et de maximiser le transfert des protons vers le compartiment inter-membranaire.

Le compartiment cathodique comporte avantageusement un port d'injection de CO₂ ou de substances carbonées, telles que l'acétate, le propionate, le

bicarbonate, l'acide carbonique, le syngas, l'éthanol, ou un mélange de celles-ci.

Le compartiment intermembranaire comporte avantageusement un port de
5 soutirage des molécules synthétisées.

Selon des modes de réalisation préférés du réacteur selon l'invention :

- les électrolytes du compartiment cathodique et du premier compartiment
anodique comprennent des solutions présentant un pH compris entre 5
et 9,
- 10 –l'électrolyte du second compartiment anodique comprend une solution
saline présentant un pH inférieur ou égal à 4.;
- les électrolytes du compartiment cathodique et du premier compartiment
anodique présentent une conductivité comprise entre 0,1 S/m et 10 S/m,
de préférence entre 0,5 S/m et 4 S/m ;
- 15 –le compartiment intermembranaire et le second compartiment anodique
renferment des solutions salines de conductivité supérieure à 1 S/m, de
préférence supérieure à 5 S/m.

Ainsi, les conditions de fonctionnement peuvent être différentes d'un
20 compartiment anodique à l'autre. De plus, il n'est pas nécessaire d'avoir des
anodes amovibles (c'est-à-dire remplacer une bio-anode par une anode
abiotique ou inversement) pour passer d'un mode de fonctionnement biotique à
un mode de fonctionnement abiotique, ou inversement.

25 La présente invention concerne également l'utilisation du réacteur tel que décrit
ci-dessus, pour l'électrosynthèse d'acides organiques et/ou d'alcools à partir de
déchets organiques hydrolysés.

L'invention concerne également un procédé d'électrosynthèse microbienne au
30 moyen du réacteur tel que décrit ci-dessus, comprenant, de manière alternée
ou simultanée à l'application d'une différence de potentiel entre la bio-anode et
la bio-cathode, l'application d'une différence de potentiel entre l'anode abiotique
et la bio-cathode, la différence de potentiel appliquée entre l'anode abiotique et

la bio-cathode étant supérieure à la différence de potentiel appliquée entre la bio-anode et la bio-cathode.

En particulier la différence de potentiel appliquée entre l'anode abiotique et la bio-cathode est avantageusement comprise entre 0,1 V et 5 V et la différence de potentiel appliquée entre la bio-anode et la bio-cathode est comprise entre 0,1 V et 3 V.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront dans la description ci-dessous d'exemples de réalisation, non limitatifs, en référence aux schémas annexés, dans lesquels :

La figure 1 est une vue de dessus schématique d'un exemple de réalisation du réacteur bio-électrochimique selon l'invention ;

La figure 2 est une vue en coupe du réacteur de la figure 1 ;

La figure 3 est un diagramme montrant le potentiel à la bio-cathode et la production d'acide acétique en fonction du temps au moyen du réacteur bio-électrochimique selon l'invention.

20

DESCRIPTION DETAILLEE

Un exemple de réacteur bio-électrochimique selon l'invention est schématisé sur les figures 1 et 2 annexées.

Le réacteur 1, tel que visible sur la figure 1, se présente sous une forme cylindrique fermé par une paroi externe 2. Il renferme, en son centre, une cathode 3 logée dans un compartiment cathodique 13 également cylindrique équipé d'un port 10 d'injection en CO₂.

Autour de ce compartiment cathodique 13, est disposé un compartiment intermembranaire 8 unique qui est séparé du compartiment cathodique 13 par une membrane échangeuse d'anions 6. Le compartiment intermembranaire 8 est entouré par les deux compartiments anodiques : d'une part, le compartiment

anodique 14 (premier compartiment anodique) renfermant une anode biotique ou bio-anode 4, et d'autre part, le compartiment anodique 15 (second compartiment anodique) renfermant l'anode abiotique 5. Ces deux compartiments anodiques 14, 15 sont séparés du compartiment
5 intermembranaire 8 par une membrane échangeuse de cations 7. L'ensemble des deux compartiments anodiques 14, 15 présente une forme annulaire entourant le compartiment intermembranaire commun et sont séparés l'un de l'autre par des parois séparatrices 11, étanches aux gaz et aux liquides.

10 Le compartiment anodique 14 renfermant la bio-anode 4 est équipé d'un port 9 d'injection de substrat carboné organique.

En fonctionnement, une première différence de potentiel 24 est appliquée entre la cathode 3 et la bio-anode 4, et une seconde différence de potentiel 25 peut
15 être appliquée, en cas de nécessité, entre la cathode 3 et l'anode abiotique 5.

Sur l'exemple représenté à la figure 1, les deux compartiments anodiques 14 et 15 ont des volumes identiques. En variante, selon la disposition des parois séparatrices 11, le volume du second compartiment anodique 15 peut être
20 inférieur à celui du premier compartiment anodique 14.

L'ensemble du réacteur est fermé par un couvercle non représenté.

Exemple de réalisation

25

Un réacteur tel que décrit aux figures 1 et 2 est mis en œuvre avec les conditions de fonctionnement suivantes :

L'anode abiotique 5 est immergée dans une solution aqueuse saline dont la
30 conductivité est supérieure à 1 S/m. Tous les sels minéraux peuvent être utilisés sauf les chlorures, pour éviter la production de gaz chlore. Dans l'exemple présenté ici l'électrolyte est une solution de sulfate de sodium Na_2SO_4 saturée, en présence d'acide sulfurique. Le pH est de 0.

La bio-anode 4 est immergée dans un électrolyte aqueux dont la conductivité est comprise entre 0,5 et 4 S/m et dont le pH est compris entre 5 et 9. L'électrolyte peut être composé d'un milieu de culture bactérienne à base de tampon phosphate, et referme au moins une source de carbone organique, qui
5 peut être un bio-déchets. L'électrolyte de la bio-anode 4 est, dans l'exemple présenté ici, composé de 12,5 g/L de $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 3 g/L de KH_2PO_4 , 0,5 g/L de NaCl , 1 g/L de NH_4Cl et 30 g/L de NaHCO_3 , avec des injections quotidiennes de 10 à 20 mL d'hydrolysats de bio-déchets à environ 120 g de
10 DCO (demande chimique en oxygène) par litre.

Le compartiment intermembranaire 8 renferme une solution aqueuse saline dont la conductivité est supérieure à 1 S/m. Tous les sels minéraux ou organiques peuvent être utilisés. Dans l'exemple, l'électrolyte du compartiment
15 inter-membranaire est composé de 35 g/L de KCl et 32,6 g/L de KH_2PO_4 .

Le compartiment intermembranaire 8 renferme une solution saline dont la conductivité est supérieure à 1 S/m. Tous les sels minéraux ou organiques peuvent être utilisés. Dans l'exemple, l'électrolyte du compartiment inter-
20 membranaire est composé de 35 g/L de KCl et 32,6 g/L de KH_2PO_4 .

La bio-cathode 3 est immergée dans une solution saline dont la conductivité est comprise entre 0,5 et 4 S/m et dont le pH est compris entre 5 et 9. La solution saline peut être composée d'un milieu de culture bactérienne à base de tampon
25 phosphate, (ici milieu BMP modifié avec 30 g/L de NaHCO_3) et est alimentée avec du CO_2 , selon un débit de préférence supérieur à 0,5 mL/jour.

La différence de potentiel (ddp) 25 entre l'anode abiotique 5 et la bio-cathode 3 était ici de 3V et la ddp 24 entre l'anode biotique 4 et la bio-cathode 3 de 1V.

30

Dans ces conditions de fonctionnement, la courbe présentée à la figure 3 montre qu'une concentration en acide acétique importante, atteignant près de 30 g/L après 25 jours de fonctionnement a pu être obtenue.

REVENDEICATIONS

1. Réacteur (1) bio-électrochimique comportant au moins une bio-anode (4) et
5 au moins une bio-cathode (3) immergées dans un électrolyte contenant des
microorganismes respectivement dans un compartiment anodique (14),
dénommé premier compartiment, et dans un compartiment cathodique (13), les
compartiments anodique et cathodique étant séparés par au moins une
membrane échangeuse d'ions, le premier compartiment anodique (14)
10 comportant un port (9) d'introduction de substrat carboné organique, une
première différence de potentiel (24) étant appliquée, en fonctionnement, entre
la bio-anode (4) et la bio-cathode (3),
caractérisé en ce qu'il comporte un second compartiment anodique (15)
renfermant un électrolyte, dépourvu de microorganismes électro-actifs, dans
15 lequel plonge une anode abiotique (5), une seconde différence de potentiel (25)
pouvant être appliquée, en fonctionnement entre l'anode abiotique et la bio-
cathode.
2. Réacteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le second
20 compartiment anodique (15) est séparé du compartiment cathodique (18) par
au moins une membrane échangeuse d'ions.
3. Réacteur selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2, caractérisé en
ce que les premier et second compartiments anodiques sont séparés du
25 compartiment cathodique (13) par, en allant de l'anode abiotique ou la bio-
anode vers la bio-cathode (3), une membrane échangeuse de cations (7) et une
membrane échangeuse d'anions (6), lesdites membranes échangeuses de
cations et d'anions étant séparées l'une de l'autre par un compartiment
intermembranaire (8) de collecte des molécules produites par le réacteur en
30 fonctionnement.
4. Réacteur selon la revendication 3, caractérisé en ce que ledit compartiment
intermembranaire est un compartiment unique.

5. Réacteur selon la revendication 3 ou 4, caractérisée en ce qu'il se présente sous une forme cylindrique, la bio-cathode (3) étant disposée au centre du cylindre et étant entourée par, en allant vers l'extérieur, la membrane échangeuse d'anions (6), le compartiment intermembranaire (8) et la membrane échangeuse de cations (7), les premier et second compartiments anodiques occupant chacun une portion de l'espace annulaire entourant la membrane échangeuse de cations, et étant séparés l'un de l'autre par une paroi étanche.
6. Réacteur selon l'une quelconque des revendications 3 ou 5, caractérisé en ce que le compartiment cathodique comporte un port (10) d'injection de CO₂ ou de substances organiques carbonées et le compartiment intermembranaire (8) un port de soutirage des molécules synthétisées.
7. Réacteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le second compartiment anodique (15) présente un volume inférieur ou égal au premier compartiment anodique (14).
8. Réacteur selon l'une quelconque des revendications 3 à 7, caractérisé en ce que les électrolytes du compartiment cathodique (13) et du premier compartiment anodique (14) comprennent des solutions présentant un pH compris entre 5 et 9, l'électrolyte du second compartiment anodique comprenant une solution saline présentant un pH inférieur ou égal à 4.
9. Réacteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les électrolytes du compartiment cathodique (13) et du premier compartiment anodique (14) présentent une conductivité comprise entre 0,1 S/m et 10 S/m, de préférence entre 0,5 S/m et 4 S/m.
10. Réacteur selon l'une quelconque des revendications 4 à 9, caractérisé en ce que le compartiment intermembranaire (8) et le second compartiment

12

anodique (15) renferment des solutions salines de conductivité supérieure à 1 S/m, de préférence supérieure à 5 S/m.

11. Utilisation du réacteur selon l'une quelconque des revendications
5 précédentes pour l'électrosynthèse d'acides organiques et/ou d'alcools à partir de déchets organiques hydrolysés.

12. Procédé d'électrosynthèse microbienne au moyen du réacteur selon l'une
quelconque des revendications précédentes, comprenant, de manière alternée
10 ou simultanée à l'application d'une différence de potentiel entre la bio-anode et la bio-cathode, l'application d'une différence de potentiel entre l'anode abiotique et la bio-cathode, la différence de potentiel appliquée entre l'anode abiotique et la bio-cathode étant supérieure à la différence de potentiel appliquée entre la bio-anode et la bio-cathode.

15

13. Procédé selon la revendication 12, caractérisé en ce que la différence de
potentiel appliquée entre l'anode abiotique et la bio-cathode est comprise entre
0,1 V et 5 V et la différence de potentiel appliquée entre la bio-anode et la bio-
cathode est comprise entre 0,1 V et 3 V.

20

1/3

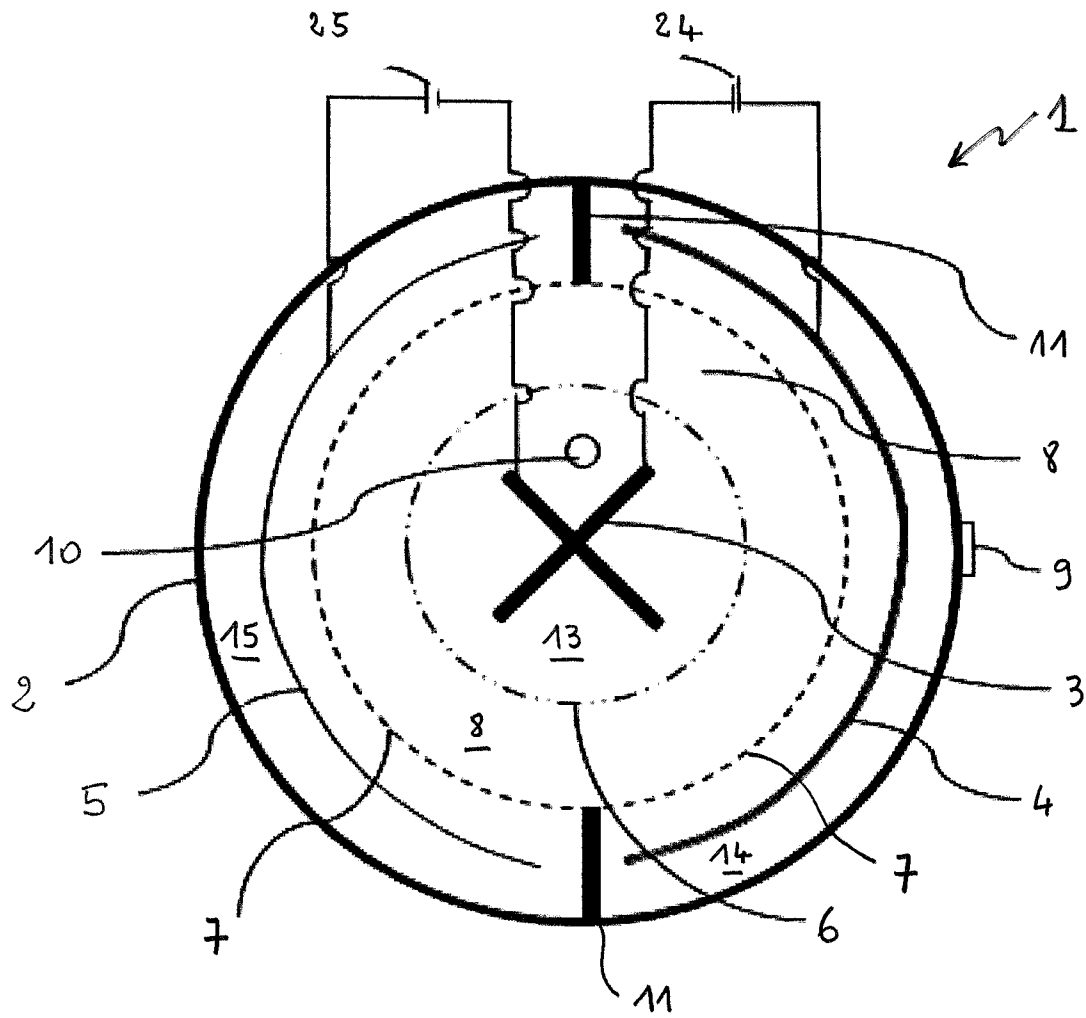


Fig.1

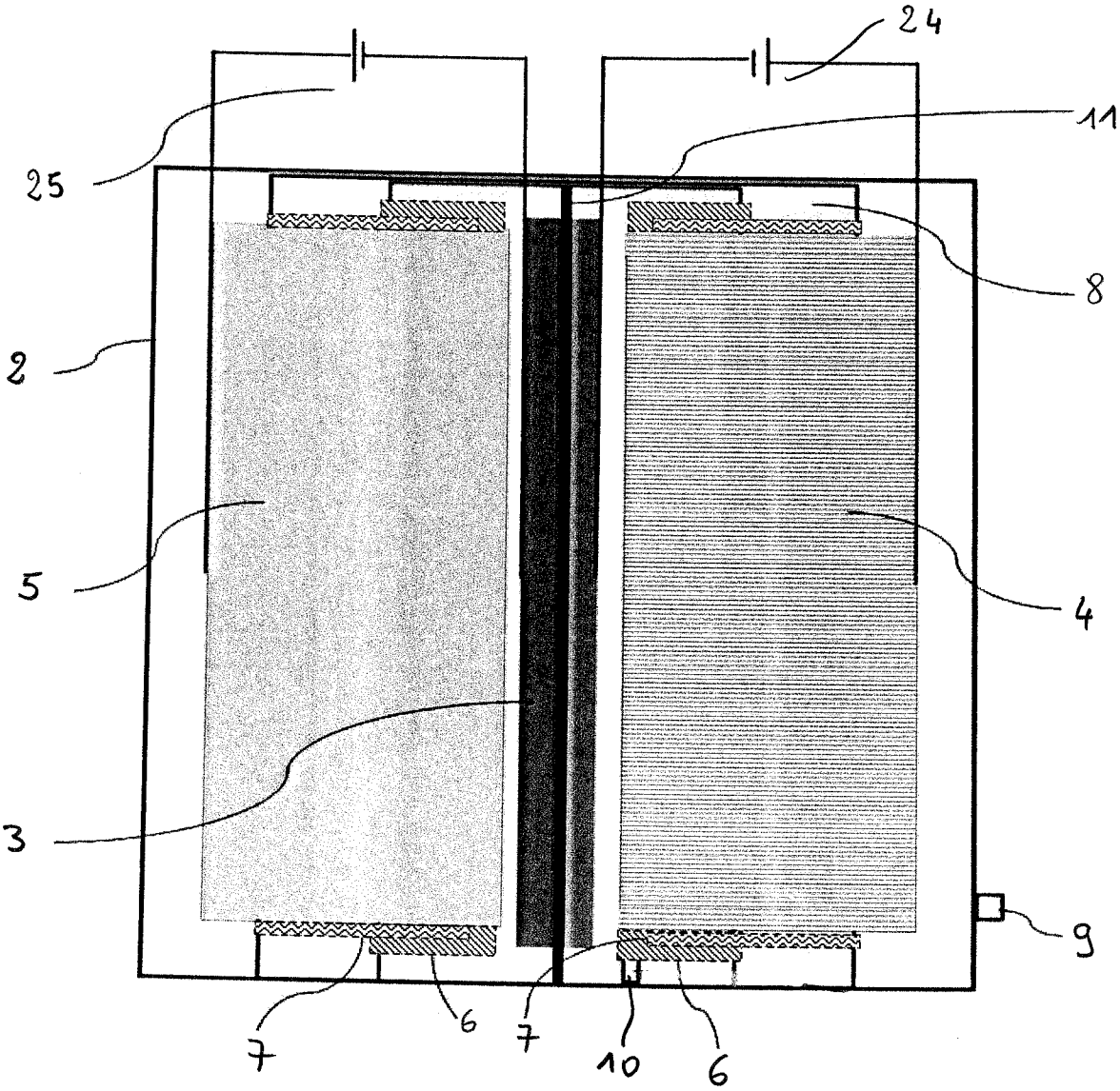


Fig. 2

3/3

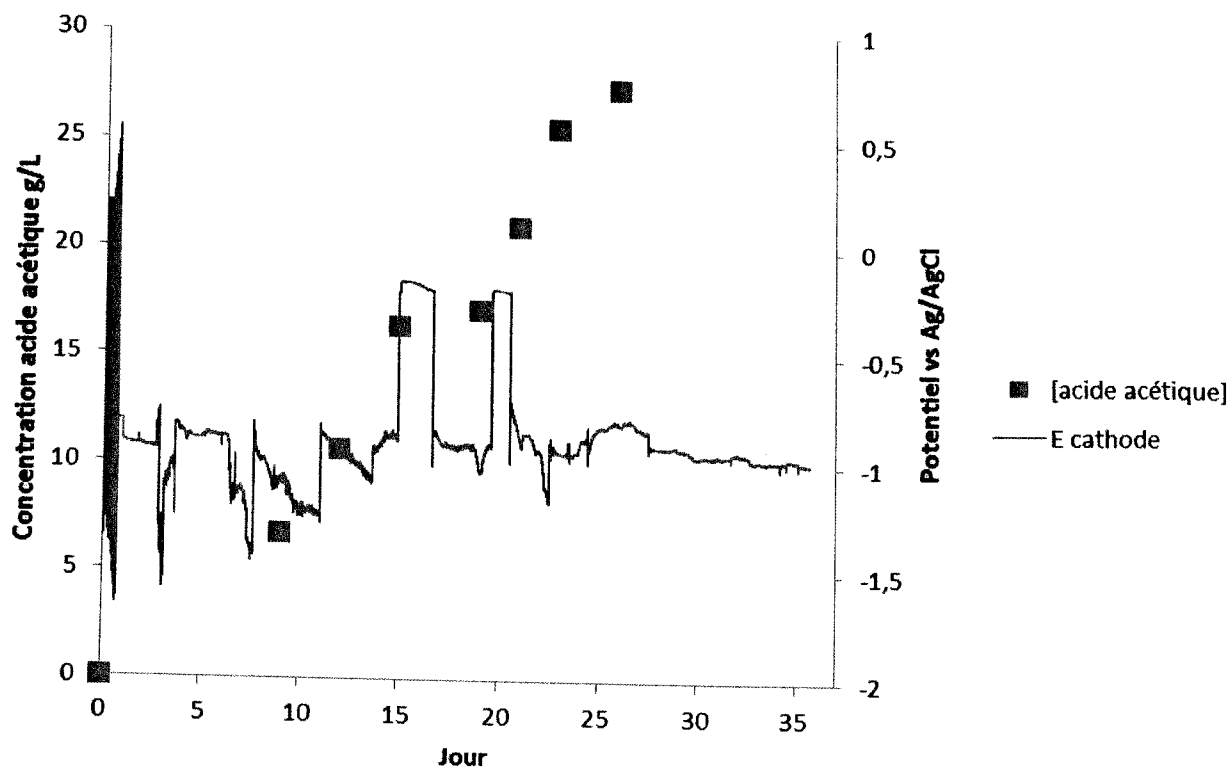


Fig.3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/FR2019/052108

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER*C25B 1/10*(2006.01)i; *C25B 3/00*(2006.01)i; *C25B 3/04*(2006.01)i; *C25B 9/08*(2006.01)i; *C25B 11/04*(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

C25B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2014069806 A1 (SILVER MATTHEW [US] ET AL) 13 March 2014 (2014-03-13)	1,2,7-13
Y	the whole document	3-6
X	KORNEEL RABAEY ET AL. "Microbial electrosynthesis - revisiting the electrical route for microbial production" <i>NATURE REVIEWS MICROBIOLOGY</i> , Vol. 8, No. 10, 01 October 2010 (2010-10-01), pages 706-716 DOI: 10.1038/nrmicro2422 ISSN: 1740-1526, XP055205190	1,2,7-13
Y	figures 1, 3b, 3c page 711, column 1, paragraph 2 page 712, column 1, paragraph 2 - page 713, column 1, paragraph 1	3-6
Y	WO 2017222382 A1 (NEDERLANDSE ORGANISATIE VOOR TOEGEPAST-NATUURWETENSCHAPPELIJK ONDERZOE) 28 December 2017 (2017-12-28) page 24, lines 16-24; figure 4	3-6
X	US 2011315560 A1 (RABAEY KORNEEL P H L A [BE] ET AL) 29 December 2011 (2011-12-29)	1,2,7-13
Y	the whole document	3-6



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

03 January 2020

Date of mailing of the international search report

15 January 2020

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Ritter, Thomas

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/FR2019/052108**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 103881905 B (CHENGDU INST BIOLOGY CAS) 28 October 2015 (2015-10-28) abstract; figure 1	5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/FR2019/052108

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)		Publication date (day/month/year)	
US	2014069806	A1	13 March 2014	EP	2630088	A2	28 August 2013
				US	2014069806	A1	13 March 2014
				WO	2012054629	A2	26 April 2012
WO	2017222382	A1	28 December 2017	EP	3475468	A1	01 May 2019
				US	2019161869	A1	30 May 2019
				WO	2017222382	A1	28 December 2017
US	2011315560	A1	29 December 2011	AU	2009328649	A1	28 July 2011
				BR	PI0923180	A2	24 September 2019
				CA	2747212	A1	24 June 2010
				CN	102282295	A	14 December 2011
				EP	2373832	A1	12 October 2011
				JP	2012512326	A	31 May 2012
				US	2011315560	A1	29 December 2011
				WO	2010068994	A1	24 June 2010
CN	103881905	B	28 October 2015	NONE			

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2019/052108

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. C25B1/10 C25B3/00 C25B3/04 C25B9/08 C25B11/04 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) C25B		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 2014/069806 A1 (SILVER MATTHEW [US] ET AL) 13 mars 2014 (2014-03-13)	1,2,7-13
Y	le document en entier	3-6
X	----- KORNEEL RABAEY ET AL: "Microbial electrosynthesis - revisiting the electrical route for microbial production", NATURE REVIEWS MICROBIOLOGY, vol. 8, no. 10, 1 octobre 2010 (2010-10-01), pages 706-716, XP055205190, ISSN: 1740-1526, DOI: 10.1038/nrmicro2422	1,2,7-13
Y	figures 1, 3b, 3c page 711, colonne 1, alinéa 2 page 712, colonne 1, alinéa 2 - page 713, colonne 1, alinéa 1 ----- -/-	3-6
☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents ☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités: "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 3 janvier 2020		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 15/01/2020
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Ritter, Thomas

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	WO 2017/222382 A1 (NEDERLANDSE ORGANISATIE VOOR TOEGEPAST-NATUURWETENSCHAPPELIJK ONDERZOE) 28 décembre 2017 (2017-12-28) page 24, lignes 16-24; figure 4 -----	3-6
X	US 2011/315560 A1 (RABAEY KORNEEL P H L A [BE] ET AL) 29 décembre 2011 (2011-12-29)	1,2,7-13
Y	le document en entier -----	3-6
Y	CN 103 881 905 B (CHENGDU INST BIOLOGY CAS) 28 octobre 2015 (2015-10-28) abrégé; figure 1 -----	5

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2019/052108

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2014069806 A1	13-03-2014	EP 2630088 A2	28-08-2013
		US 2014069806 A1	13-03-2014
		WO 2012054629 A2	26-04-2012

WO 2017222382 A1	28-12-2017	EP 3475468 A1	01-05-2019
		US 2019161869 A1	30-05-2019
		WO 2017222382 A1	28-12-2017

US 2011315560 A1	29-12-2011	AU 2009328649 A1	28-07-2011
		BR PI0923180 A2	24-09-2019
		CA 2747212 A1	24-06-2010
		CN 102282295 A	14-12-2011
		EP 2373832 A1	12-10-2011
		JP 2012512326 A	31-05-2012
		US 2011315560 A1	29-12-2011
		WO 2010068994 A1	24-06-2010

CN 103881905 B	28-10-2015	AUCUN	
