



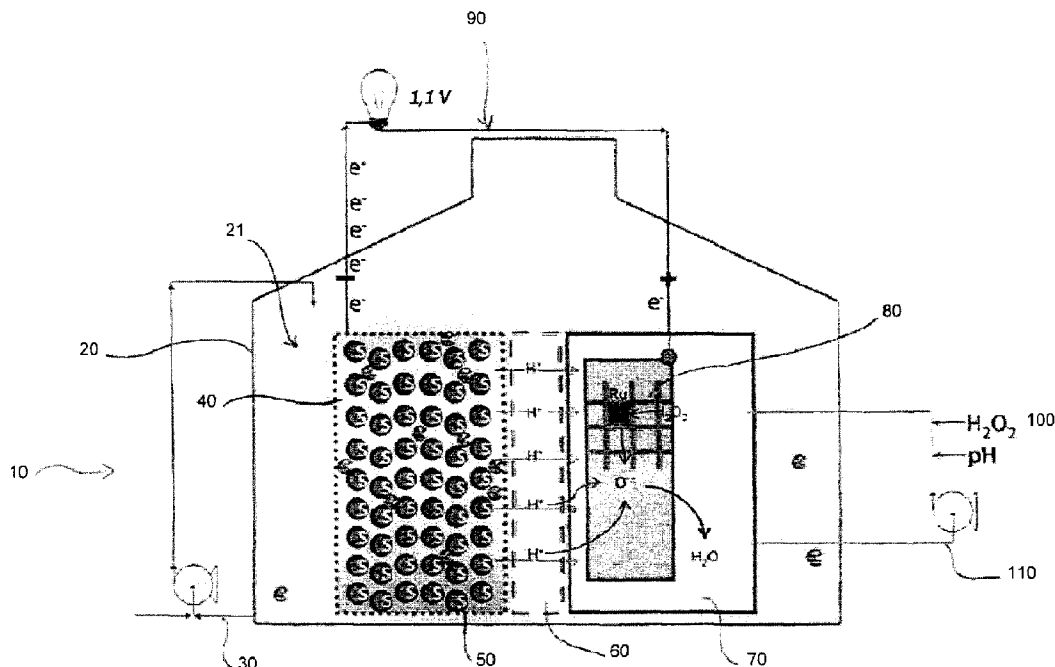
(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 2012/11/14
 (87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 2013/05/23
 (45) Date de délivrance/Issue Date: 2021/04/06
 (85) Entrée phase nationale/National Entry: 2015/05/14
 (86) N° demande PCT/PCT Application No.: CA 2012/001036
 (87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 2013/071401
 (30) Priorité/Priority: 2011/11/15 (US61/559,942)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *C02F 3/34* (2006.01),
B09B 3/00 (2006.01), *B09C 1/10* (2006.01),
C02F 3/28 (2006.01), *C12N 1/20* (2006.01),
H01M 4/04 (2006.01), *H01M 4/36* (2006.01),
H01M 4/86 (2006.01), *H01M 8/16* (2006.01),
C02F 1/46 (2006.01), *A01C 3/00* (2006.01)

(72) Inventeurs/Inventors:
 MARTIN, DANIEL-YVES, CA;
 DUBE, PATRICK, CA;
 HOGUE, RICHARD, CA;
 JEANNE, THOMAS, CA

(73) Propriétaire/Owner:

(54) Titre : METHODE ET SYSTEME DE TRAITEMENT BIOELECTROCHIMIQUE D'EFFLUENTS ORGANIQUES
 (54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR THE BIOELECTROCHEMICAL TREATMENT OF ORGANIC EFFLUENTS



(57) Abrégé/Abstract:

La présente invention traite d'une biopile. Selon le concept de la présente invention, l'anode comprenant un panier en acier inoxydable contenant le support bactérien est accolé à la chambre cathodique via une membrane échangeuse de cations. Une fois

(73) **Propriétaires(suite)/Owners(continued):**

INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DEVELOPPEMENT EN AGROENVIRONNEMENT INC., CA

(74) **Agent:** ROBIC

(57) **Abrégé(suite)/Abstract(continued):**

assemblées, la biopile (anode-support et compartiment cathodique) est mise en contact ou immergée dans l'effluent organique à traiter contenu dans un réceptacle.

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

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international(10) Numéro de publication internationale
WO 2013/071401 A1(43) Date de la publication internationale
23 mai 2013 (23.05.2013)

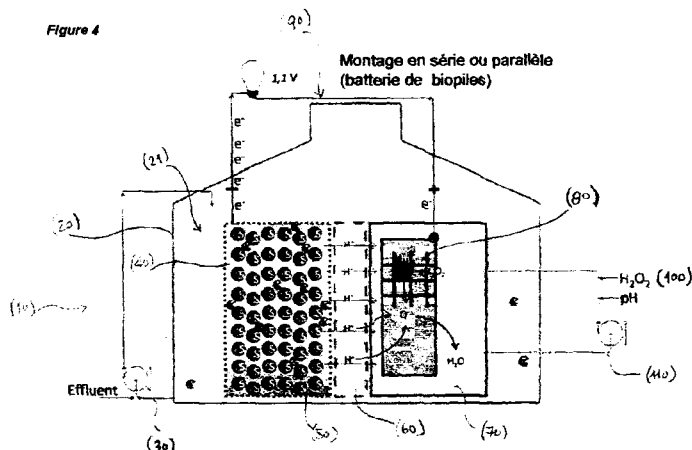
WIPO | PCT

- (51) Classification internationale des brevets :
C02F 3/34 (2006.01) **H01M 4/36** (2006.01)
B09B 3/00 (2006.01) **H01M 4/86** (2006.01)
B09C 1/10 (2006.01) **H01M 8/16** (2006.01)
C02F 3/28 (2006.01) **C02F 1/46** (2006.01)
C12N 1/20 (2006.01) **A01C 3/00** (2006.01)
H01M 4/04 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/CA2012/001036
- (22) Date de dépôt international :
14 novembre 2012 (14.11.2012)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
61/559,942 15 novembre 2011 (15.11.2011) US
- (71) Déposant : **INSTITUT DE RECHERCHE EN AGROENVIRONNEMENT INC. (IRDA)** [CA/CA];
2700 rue Einstein, Québec, Québec G1P 3W8 (CA).
- (72) Inventeurs : **MARTIN, Daniel Yves**; 2700 rue Einstein, Québec, Québec G1P 3W8 (CA). **DUBÉ, Patrick**; 2700 rue Einstein, Québec, Québec G1P 3W8 (CA). **HOGUE, Richard**; 2700 rue Einstein, Québec, Québec G1P 3W8 (CA). **JEANNE, Thomas**; 2700 rue Einstein, Québec, Québec G1P 3W8 (CA).
- (74) Mandataire : **NORTON ROSE CANADA, LLP / S.E.N.C.R.L., S.R.L.**; Suite 1500, Complexe Jules-Dal-laire/, Tour Norton Rose, 2828, Boulevard Laurier, Québec, Québec G1V 0B9 (CA).
- (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, 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, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, 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, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD AND SYSTEM FOR THE BIOELECTROCHEMICAL TREATMENT OF ORGANIC EFFLUENTS

(54) Titre : METHODE ET SYSTEME DE TRAITEMENT BIOELECTROCHIMIQUE D'EFFLUENTS ORGANIQUES



(57) Abstract : The present invention relates to a biofuel cell. According to the concept of the present invention, an anode, including a stainless-steel basket for containing the bacterial substrate, is adjoined to a cathode chamber via a cation-exchange membrane. Once assembled, the biofuel cell (anode/substrate and cathode compartment) is placed in contact with or submerged into the organic effluent to be treated, which is contained in a receptacle.

(57) Abrégé : La présente invention traite d'une biopile. Selon le concept de la présente invention, l'anode comprenant un panier en acier inoxydable contenant le support bactérien est accolé à la chambre cathodique via une membrane échangeuse de cations. Une fois assemblées, la biopile (anode-support et compartiment cathodique) est mise en contact ou immergée dans l'effluent organique à traiter contenu dans un réceptacle.

WO 2013/071401 A1



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, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

MÉTHODE ET SYSTÈME DE TRAITEMENT BIOÉLECTROCHIMIQUE D'EFFLUENTS ORGANIQUES

Domaine de l'invention

[0001] La présente invention concerne une méthode et un système de traitement
5 biologique des effluents liquides et/ou de production d'électricité. En particulier, la
présente invention se rapporte à la réalisation d'une biopile applicable pour des effluents
organiques, particulièrement du lisier de porc.

Technique antérieure

Principes de fonctionnement

10 [0002] Une biopile convertit l'énergie disponible dans un substrat biodégradable
directement en électricité tout en diminuant sa demande chimique en oxygène (DCO).
Son fonctionnement est tributaire des mécanismes de transfert d'énergie dans une
bactérie. La **Figure 1** présente une forme simplifiée des mécanismes de transfert
d'électrons et de transformation d'énergie au sein d'une bactérie aérobie. Le carburant
15 est le donneur d'électrons et il contient l'énergie qui sera transférée vers les bactéries.
Selon les genres bactériens et les modes respiratoires employés (aérobie ou anaérobie),
le donneur d'électrons pourra prendre des formes plus ou moins complexes allant, par
exemple, de la molécule de glucose ($C_6H_{12}O_6$) à des formes plus simples comme
l'acétate ($C_2H_3O_2$) ou le formate (CHO_2). La dégradation du carburant vers une forme
20 simple comme le CO_2 , se réalise pendant le cycle de Krebs et permet la réduction d'une
coenzyme appelée nicotinamide adénine dinucléotide, ou NAD^+ (Kleinsmith et Kish, 1988).
Le NAD^+ capte les électrons et l'hydrogène grâce à des enzymes appelés
déshydrogénases. Ces enzymes retirent une paire d'atomes d'hydrogène du substrat,
soit l'équivalent de 2 protons et 2 électrons. La déshydrogénase procure deux électrons
25 et un proton H^+ au NAD^+ , l'autre proton étant libéré dans le milieu. On inscrira la forme
réduite du NAD^+ par l'appellation $NADH+H^+$ (Kleinsmith et Kish, 1988).

[0003] Le $NADH+H^+$ progressera au travers un enchaînement de systèmes
d'oxydoréduction ($S1$ à S_n à la **Figure 1**) appelé chaîne respiratoire. Au cours du
passage dans cette chaîne, de l'énergie est dégagée permettant la transformation de

- l'adénosine diphosphate (ADP) en adénosine triphosphate (ATP). L'ATP est la forme d'énergie utilisable par les bactéries; elle permet le fonctionnement des activités vitales et la reproduction de celles-ci. La chaîne respiratoire sera plus ou moins courte selon le mode respiratoire de la bactérie (aérobie ou anaérobie). De même, l'accepteur final d'électrons situé au bout de cette chaîne pourra être différent. Dans le cas d'une respiration aérobie le dioxygène joue ce rôle (**Figure 1**) alors que du nitrate ou du sulfate pourrait être utilisé par des bactéries anaérobies. La quantité d'énergie transférée aux différentes étapes dépend du potentiel d'oxydoréduction de chacune des demi-réactions impliquées dans cette étape.
- 10 **[0004]** La **Figure 2** schématise comment une biopile peut être introduite dans le continuum de la chaîne respiratoire et fournir à la bactérie une électrode comme accepteur final d'électrons à la place d'une molécule oxydante.
- [0005]** Dans ce système, l'anode de la biopile sert d'accepteur d'électrons en provenance des bactéries, alors qu'à la cathode un agent oxydant est réduit par l'apport de ces électrons utilisant un circuit électrique externe. Pour leur part, les protons H⁺ migrent de l'anode vers la cathode en utilisant un pont électrolytique (comme une membrane échangeuse de cations) pour rétablir l'équilibre électrique des solutions. Si de l'oxygène est utilisé à la cathode comme agent oxydant, au niveau de cette électrode, il y aura production d'eau par la combinaison de l'oxygène réduit et des protons d'hydrogène. La biopile offre donc un moyen de canaliser et de concentrer dans un circuit électrique externe toute la production d'électrons de genres bactériens susceptibles d'adopter une anode comme accepteur final d'électrons. Une bactérie dont la chaîne respiratoire est efficace ne pourra produire un courant externe important car la majorité de l'énergie aura été convertie en ATP. De ce fait, les bactéries strictement aérobiees ne sont pas de bonnes candidates pour la production de biopiles. Ces dernières tablent donc sur l'existence de bactéries anaérobies strictes ou aérobiees-anaérobies facultatives possédant des mécanismes respiratoires beaucoup moins efficaces pour générer des sorties de puissance utilisables. De fait, ce manque d'efficacité, tributaire d'une chaîne respiratoire moins complexe ou plus courte, laisse une importante quantité d'énergie encore disponible au sortir de la chaîne. En négligeant les pertes internes, la tension théorique maximale en circuit ouvert d'une biopile utilisant l'oxygène de l'air comme oxydant ne sera jamais supérieure à 1,14 V,

ceci étant gouverné par la différence entre les potentiels d'oxydoréduction du couple NAD/NADH+H⁺ (-0,32V), substance cellulaire impliquée dans le transfert des électrons, et du couple O₂/H₂O (+0,82V). Dans les faits, à cause des besoins en énergie de la bactérie et charge de la résistance interne du système, la tension maximale sera
5 inférieure à cette valeur.

[0006] Des travaux de recherche ont également démontré que la cathode est un élément stratégique de toute première importance à optimiser pour obtenir des biopiles performantes. Il faut pallier au fait que la réduction de l'oxygène possède une cinétique lente. Pour cette raison, on retrouve des cathodes contenant un métal noble comme
10 catalyseur pour l'opération des biopiles. Les cathodes commerciales, généralement à base de platine, sont dérivées du même type que celles qui ont été développées pour les piles à combustible avec membrane échangeuse de protons. Toutefois, les cathodes commerciales sont devenues très dispendieuses à l'achat, notamment au cours des dernières années. De plus, reposant sur le principe d'une encre catalytique appliquée
15 sur un support à base de fibre de carbone, ces cathodes commerciales se révèlent fragiles à la manipulation.

[0007] La **Figure 3** illustre les mécanismes possibles de transfert d'électrons. Chacun de ces mécanismes fait appel à un genre bactérien spécifique. De la gauche vers la droite, on note deux mécanismes impliquant un contact physique direct entre la
20 bactérie et l'anode et un troisième impliquant une molécule intermédiaire de transfert entre la bactérie et l'électrode.

[0008] Des bactéries métaux-réductrices seraient en mesure de réduire certains hydroxydes de métal (Schröder, 2007; Haberman et Pommer, 1991). Pour ce faire, elles doivent être en contact direct avec l'élément à réduire. Cette propension à se développer
25 sur la surface à réduire peut être utilisée dans les biopiles en permettant le développement bactérien directement sur la surface d'une électrode.

[0009] D'autres bactéries utiliseraient pour leur part certaines molécules intermédiaires (**Figure 3c**) pour effectuer le transfert des électrons. Une fois relâchées dans l'environnement, ces molécules réduites viendraient s'oxyder à l'anode pour revenir
30 éventuellement vers les bactéries, prêtes à recommencer un nouveau cycle d'oxydoréduction. À cet effet, on note dans la littérature que les bactéries

sulfuroréductrices utilisent le sulfate comme accepteur d'électrons. Des delta-protéobactéries comme *Desulfovibrio desulfuricans* utilisent ce mode respiratoire (Schröder, 2007). Pour la fabrication de biopiles, il s'agit d'un mode de transfert d'électrons particulièrement intéressant car le potentiel d'oxydoréduction du couple sulfate/sulfure est de -0,22 V (Schröder, 2007). Conséquemment, si de l'oxygène est utilisé au niveau de la cathode, la tension maximale théorique serait légèrement supérieure à 1 volt (0,8 V - -0,22 V).

[0010] Les avenues de solution pour obtenir des sorties de puissance significatives ne sont pas exclusives à l'utilisation d'un genre bactérien unique dans une biopile. Rabaey *et al.* (2004) notent que des communautés bactériennes peuvent s'adapter aux conditions présentes dans les biopiles, évoluant vers des consortiums optimisés en tant que biocatalyseur d'électricité. De plus, ces consortiums se servent de deux véhicules de transferts d'électrons, soit par contact direct de la membrane cytoplasmique avec l'anode, soit par l'utilisation d'intermédiaires redox indigènes. Ainsi, il semble que certaines bactéries bénéficient de la capacité de sécrétion d'intermédiaires redox d'autres espèces bactériennes pour réaliser leur propre activité respiratoire. Cette symbiose entre espèces bactériennes expliquerait en partie les puissances de sortie particulièrement importantes observées avec les consortiums bactériens.

Les biopiles et le traitement des eaux usées

[0011] Pour les pays industrialisés, l'avenir commercial des biopiles se situe vraisemblablement du côté du traitement des eaux usées domestiques (abattement de la demande biochimique en oxygène (DBO₅) et de la DCO) ou des effluents très chargés comme le sont les lisiers ou les effluents d'abattoir. Les biopiles possèdent certains avantages par rapport à un système conventionnel aérobie de traitement des eaux par boues activées. D'une part, les coûts de construction et d'opération peuvent être compensés par les revenus potentiels découlant de la vente d'électricité. Compte tenu que les systèmes sont beaucoup moins énergivores, l'empreinte environnementale en sera réduite, notamment en production de gaz à effet de serre (Oh *et al.*, 2010). Finalement, la disposition des boues avec un système de traitement des eaux avec biopiles sera moins problématique car la quantité de biomasse produite dans une biopile sera, à l'image des systèmes de digestion anaérobie classique, nettement moindre que dans un système à boue activé aérobie conventionnel (Oh *et al.*, 2010). De

fait, on note une production de matière volatile en suspension (MVeS) d'environ 0,4 à 0,8 g_{MVeS}·g⁻¹_{DBO5} dans un système aérobie alors qu'elle se situe entre 0,035 et 0,15 g_{MVeS}·g⁻¹_{DBO5} dans un système anaérobie (Oh et al., 2010).

- [0012]** De plus, selon Rabaey et Verstaete (2005), pour le traitement des eaux, les biopiles comportent des avantages même par rapport à des systèmes mettant de l'avant la digestion anaérobie et sa production de méthane comme sous-produit énergétique. Ces chercheurs indiquent, dans un premier temps, qu'une biopile permet une efficacité de conversion élevée en créant directement un courant électrique alors que dans le cas d'une digestion anaérobie, il faut utiliser le biogaz produit comme carburant dans un groupe électrogène pour produire de l'électricité. En second lieu, les biopiles produisent d'excellents rendements à température ambiante contrairement à tous les processus courants de « bioénergie » qui nécessitent généralement des températures élevées pour être efficaces. Troisièmement, une biopile n'exige pas le traitement des gaz d'échappement puisque ceux-ci sont constitués essentiellement de dioxyde de carbone.
- [0013]** Il demeure donc un besoin dans l'industrie pour le développement d'une biopile fonctionnant lorsque immergée dans un effluent afin de générer un courant mais aussi pour la bioremédiation partielle ou total des effluents polluants.

Exposé sommaire de l'invention

- [0014]** La présente invention concerne une biopile comprenant un circuit électrique externe pouvant canaliser la production d'électrons de genres bactériens comprenant une anode comme accepteur d'électrons.
- [0015]** La présente invention concerne un procédé de réalisation d'une biopile comprenant le développement d'un consortium bactérien. Particulièrement, le consortium bactérien permet le transfert d'électrons, par contact direct de la membrane cytoplasmique, ou par l'utilisation d'intermédiaires redox indigènes.
- [0016]** La présente invention concerne un procédé de réalisation ainsi qu'une biopile basé sur le traitement bioélectrochimique anaérobie d'un effluent organique, par la mise en contact d'une anode et d'un support bactérien couplés à un consortium bactérien spécifique dont le métabolisme est basé, notamment, sur la fixation du soufre (S).

[0017] La présente invention concerne également un procédé de réalisation d'une biopile basé sur le traitement bioélectrochimique anaérobie d'un effluent organique, par l'immersion d'une anode juxtaposée à un support bactérien, couplés à un consortium bactérien spécifique et la fixation d'un ou plusieurs éléments chimiques essentiels pour le cycle de vie du consortium bactérien choisi.

[0018] Un premier aspect de l'invention concerne un procédé de traitement bioélectrochimique anaérobie d'un effluent organique, par la mise en contact d'une anode et d'un support pour la fixation d'un consortium bactérien spécifique et la fixation d'un ou plusieurs éléments chimiques, comme par exemple le soufre (S), essentiels pour le cycle de vie du consortium bactérien choisi. Particulièrement, le transfert des cations vers la cathode est réalisé à travers une membrane échangeuse de cations qui sépare le compartiment anodique du compartiment cathodique qui abrite un électrolyte oxydant en circulation.

[0019] Particulièrement, la présente invention concerne un procédé bioélectrochimique de traitement anaérobie d'un effluent organique, comprenant: a) la mise en contact d'une anode avec ledit effluent afin de la mettre en contact avec au moins une souche de microorganismes ayant un métabolisme microbien basé sur le soufre générant des molécules pouvant s'oxyder à l'anode produisant ainsi des cations; et b) la mise en contact d'un compartiment cathodique comprenant une cathode, et pouvant contenir un électrolyte oxydant en circulation, ledit compartiment cathodique étant en lien électrique avec l'anode grâce à un circuit externe, et séparée de l'anode par une membrane perméable aux cations; où un transfert de cations de l'anode s'effectue vers ledit compartiment cathodique via ladite membrane, et lesdits électrons alors générés à l'anode circulent vers la cathode via ledit circuit externe causant ainsi une diminution des demandes biologique et chimique en oxygène (DBO5 et DCO) de l'effluent en sortie lorsque comparé à l'effluent en entrée.

[0020] Particulièrement, la présente invention concerne un procédé bioélectrochimique de traitement anaérobie d'un effluent organique, comprenant: a) la mise en contact d'une anode juxtaposée à un support bactérien dans ledit effluent, ledit effluent comprenant au moins une souche de microorganismes ayant un métabolisme microbien basé sur le soufre générant des molécules pouvant s'oxyder à l'anode produisant ainsi des cations; et b) la mise en contact d'un compartiment cathodique dans

ledit effluent, ledit compartiment cathodique comprenant une cathode, et pouvant contenir un électrolyte oxydant en circulation, ledit compartiment étant en lien électrique avec l'anode grâce à un circuit externe, et séparée de l'anode par une membrane perméable aux cations; où un transfert de cations de l'anode s'effectue vers ledit

5 compartiment cathodique via ladite membrane, et lesdits électrons alors générés à l'anode circulent vers la cathode via ledit circuit externe causant ainsi une diminution des demandes biologique et chimique en oxygène (DBO₅ et DCO) de l'effluent en sortie lorsque comparé à l'effluent en entrée.

[0021] Particulièrement, la présente invention concerne un procédé bioélectrochimique de traitement anaérobie d'un effluent organique, comprenant: a) l'immersion d'une anode dans ledit effluent organique, ladite anode juxtaposée à un support pour la fixation desdits microorganismes où ledit métabolisme microbien utilise particulièrement le soufre comme accepteur d'électrons générant des molécules de sulfure d'hydrogène qui iront s'oxyder à l'anode produisant ainsi des cations; b) la mise en contact desdits

10 microorganismes avec ledit support bactérien juxtaposé à ladite anode; et c) l'immersion d'un compartiment cathodique dans ledit effluent organique, ledit compartiment cathodique comprenant une cathode, et pouvant abriter un électrolyte oxydant en circulation, ledit compartiment étant en lien électrique avec l'anode grâce à un circuit externe, et séparée de l'anode par une membrane perméable aux cations; où un

15 transfert de cations de l'anode s'effectue vers ledit compartiment cathodique via ladite membrane, et lesdits électrons alors générés à l'anode circulent vers la cathode via ledit circuit externe causant ainsi une diminution des demandes biologique et chimique en oxygène (DBO₅ et DCO) de l'effluent en sortie lorsque comparé à l'effluent en entrée.

[0022] Un second aspect de l'invention concerne un procédé bioélectrochimique pour

25 générer un courant électrique basé sur la dégradation biologique anaérobie d'un effluent organique mis en contact avec des microorganismes ayant des métabolismes microbiens complémentaires dont l'un est basé sur le soufre, le procédé comprenant les étapes suivantes: a) la mise en contact d'une anode et d'un support pour la fixation des microorganismes avec l'effluent, où le métabolisme microbien utilise particulièrement le

30 soufre comme accepteur d'électrons générant ainsi des molécules de sulfures d'hydrogène qui iront s'oxyder à l'anode produisant ainsi des cations; b) la mise en contact de l'anode et du support avec les microorganismes; et c) la mise en contact d'un

compartiment cathodique avec l'effluent, le compartiment cathodique comprenant une cathode, et contenant un électrolyte oxydant en circulation, le compartiment cathodique étant en lien électrique avec l'anode grâce à un circuit externe, et séparé de l'anode par une membrane perméable aux cations; où un transfert de cations de l'anode s'effectue
5 vers le compartiment cathodique via la membrane, et les électrons alors générés à l'anode circulent vers la cathode via le circuit externe générant ainsi le courant électrique.

[0023] Selon un autre aspect, l'invention se présente sous la forme d'une biopile comprenant: a) une anode comprenant un élément accepteur d'électron, b) un support
10 bactérien pouvant être colonisé par au moins une souche bactérienne; c) une chambre cathodique fermée hermétiquement et séparée de l'anode par une membrane perméable aux cations, le compartiment cathodique comprenant une cathode constituée d'un élément inoxydable plaqué avec un métal noble, le compartiment cathodique comprenant une entrée et une sortie servant à la circulation d'un électrolyte oxydant, et
15 enfin, la cathode étant en lien électrique avec l'anode grâce à un circuit externe.

[0024] Un autre aspect de l'invention présente une anode sous forme d'un réceptacle perméable, le réceptacle pouvant contenir le support bactérien, particulièrement sous forme d'un panier.

[0025] Selon un aspect alternatif, l'invention se présente sous la forme d'une cathode
20 comprenant un élément en acier inoxydable plaqué avec un métal noble, particulièrement du ruthénium.

[0026] Selon un autre aspect, l'invention se présente sous la forme d'un système bioélectrochimique comprenant: (a) une anode telle que définie par les présentes; (b) un
25 compartiment cathodique comprenant une cathode telle que définie par les présentes, fermé par une membrane perméable aux cations, le compartiment pouvant abriter un électrolyte oxydant; (c) un système de circulation de l'électrolyte; et (d) un circuit externe reliant électriquement l'anode et le compartiment cathodique.

[0027] Selon un autre aspect, l'invention se présente sous la forme d'un consortium de diverses souches bactériennes utilisées dans une biopile afin de générer un courant
30 électrique, le consortium comprenant au moins une souche du genre *Desulfuromonas*.

[0028] Selon un aspect additionnel, l'invention se présente sous la forme de l'usage d'au moins une souche du genre *Desulfuromonas* pour générer un courant électrique dans une biopile mise en contact avec, ou immergée dans, un effluent organique.

[0029] Selon un autre aspect, l'invention se présente sous la forme de l'usage de la
5 biopile telle que définie par les présentes, pour la génération d'électricité.

[0030] Alternativement, selon un autre aspect, l'invention se présente sous la forme de l'utilisation de la biopile pour le traitement ou la bioremédiation d'un effluent chargé en matière organique.

[0030a] Selon un autre aspect, l'invention se présente sous la forme d'un système
10 bioélectrochimique comprenant:

- (a) un système anodique comprenant une anode comprenant un élément accepteur d'électron sous forme d'un réceptacle perméable pouvant contenir un support bactérien, ledit système anodique étant adapté pour être immergé dans un effluent organique, et
- 15 (b) un compartiment cathodique comprenant une cathode comprenant un élément en acier inoxydable plaqué avec un métal noble et un électrolyte oxydant en circulation, ledit compartiment cathodique étant en lien électrique avec ledit système anodique grâce à un circuit externe, et ledit compartiment cathodique étant séparé dudit système anodique par une membrane perméable aux cations;
20 ledit compartiment cathodique étant adapté pour être immergé dans ledit effluent organique.

[0030b] Selon un autre aspect, l'invention se présente sous la forme d'un usage du système bioélectrochimique tel que ci-défini, pour la génération d'électricité.

[0030c] Selon un autre aspect, l'invention se présente sous la forme d'un usage
25 du système bioélectrochimique tel que ci-défini, pour la bioremédiation d'un effluent chargé en matière organique.

[0030d] Selon un autre aspect, l'invention se présente sous la forme d'un usage du système bioélectrochimique tel que ci-défini, pour le traitement d'un effluent chargé en matière organique.

Description détaillée de l'invention

5 Description des figures

[0031] La **Figure 1** montre les mécanismes de production d'énergie et chaîne respiratoire d'une bactérie aérobie.

[0032] La **Figure 2** montre une schématisation d'un mécanisme possible de transfert d'électrons et de protons entre une bactérie et une biopile.

10 **[0033]** La **Figure 3** montre une schématisation d'un autre mécanisme possible de transfert d'électrons et de protons entre une bactérie et une biopile

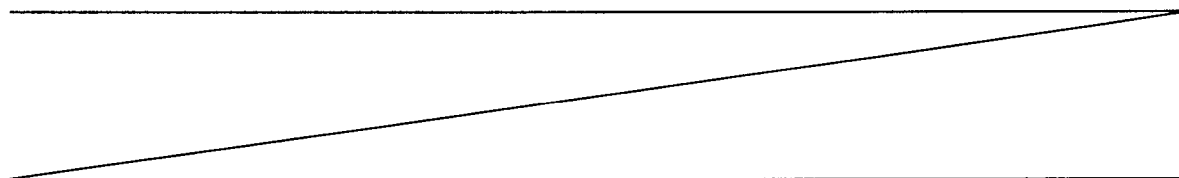
[0034] La **Figure 4** montre un schéma de montage d'une biopile immergée à compartiment unique.

15 **[0035]** La **Figure 5** montre un schéma des éléments d'une biopile selon la présente invention.

[0036] La **Figure 6** montre des courbes de performances d'une biopile avec 75 g de charbon activé; pH de l'électrolyte 2,7.

[0037] La **Figure 7** montre des courbes de performance d'une biopile avec 150 g de charbon activé; pH de l'électrolyte: 2,7.

20 **[0038]** La **Figure 8** montre des courbes de performance d'une biopile avec 150 g charbon activé; pH de l'électrolyte: 2,2.



[0039] La Figure 9 montre une vue éclatée d'une réalisation particulière d'une biopile selon la présente invention.

[0040] La Figure 10 montre un montage en série de plusieurs biopiles telles que montrées à la Figure 9 et immergée dans une cuve pouvant être remplie d'effluent.

5 **Abréviations et Définitions**

Abréviations

[0041] ADP : adénosine diphosphate ; ATP : adénosine triphosphate ; DBO : demande biologique en oxygène ; DCO : demande chimique en oxygène ; NAD⁺ : nicotinamide adénine dinucléotide.

10 Définitions

[0042] Biopile: pile à combustible avec flore microbienne.

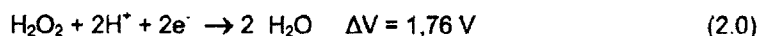
Description détaillée de réalisations particulières

Le procédé

[0043] Une réalisation particulière de l'invention concerne la mise au point d'un
15 procédé simple et économique de réalisation d'une biopile basée sur la dégradation
biologique anaérobie d'un effluent, par l'immersion ou la mise en contact d'une anode
inoxydable, particulièrement juxtaposée à un matériel granulaire, particulièrement de
type charbon activé, qui constitue d'une part le support pour la fixation d'un consortium
bactérien spécifique et d'autre part le support pour la fixation d'un élément chimique,
20 comme par exemple le soufre (S), essentiel pour le cycle de vie du consortium bactérien
choisi. Particulièrement, le transfert des cations vers la cathode est réalisé à travers une
membrane échangeuse de cations qui sépare l'anode de la chambre cathodique, elle-
même contenant un électrolyte fortement oxydant en recirculation.

[0044] Les cathodes exposées à l'air et réduisant l'oxygène qui s'y trouve est un
25 concept intéressant d'un point de vue théorique et économique. Toutefois, la cinétique
est lente, ce qui conduit à une demi-réaction peu élevée en potentiel. Conséquemment,
même si les réactions bactériennes à l'anode sont optimisées, la tension d'une biopile
sera peu élevée, celle-ci étant limitée par les réactions à la cathode. Pour ces raisons,

l'emploi d'un liquide oxydant dans le compartiment cathodique s'avère une alternative intéressante. Communément appelé eau oxygénée, le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) est un milieu oxydant puissant dont on peut contrôler la concentration active par dilution dans de l'eau. La demi-réaction du peroxyde d'hydrogène à la cathode est décrite par la
 5 réaction 2.0 (Girault, 2001).



[0045] Comme le décrit la réaction 2.0, en présence d'hydrogène et d'électrons, le peroxyde d'hydrogène produira une réaction spontanée avec un potentiel d'oxydoréduction élevé et produit essentiellement de l'eau, ce qui rend l'alternative tout à
 10 fait acceptable d'un point de vue environnemental. En contrepartie, l'électrolyte du compartiment cathodique deviendra un consommable qu'il faudra suivre et régénérer au besoin. Pour maximiser la réaction, le pH de cet électrolyte sera également contrôlé et ajusté au besoin avec un acide, particulièrement de l'acide sulfurique (H₂SO₄).

[0046] Particulièrement, le procédé comprend les étapes suivantes:

- 15 a') $\text{CH}_3\text{COO}^- + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{HCO}_3^- + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^-$ et $\text{S}^0 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow 4 \text{H}_2\text{S}$, au niveau des microorganismes;
 a") $4 \text{H}_2\text{S} \rightarrow 4 \text{S}^0 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^-$ au niveau de l'anode; et
 b) $4 \text{H}_2\text{O}_2 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow 8 \text{H}_2\text{O}$ au niveau de la cathode.

[0047] Particulièrement, le procédé se réalise lorsque le compartiment cathodique
 20 est séparé de l'anode grâce à une membrane échangeuse de cations. Plus particulièrement, le procédé est mis en œuvre lorsque la réaction à la cathode selon l'étape b) est entretenue à l'aide d'addition de peroxyde d'hydrogène (H₂O₂).

Consortium bactérien

[0048] Un autre aspect de la présente invention est le développement d'un
 25 consortium bactérien à partir de l'effluent à traiter (inoculation indigène) en créant les conditions favorables au démarrage de la biopile. Selon le domaine d'application de l'invention, des effluents organiques sont privilégiés, particulièrement le lisier de porc, qui

contient une flore bactérienne vaste mais aussi les éléments nutritifs nécessaires pour le développement de ce consortium et le fonctionnement de la biopile.

[0049] Selon un autre aspect particulier de l'invention, le traitement bioélectrochimique résultant de l'activité de dégradation biologique anaérobie au niveau
5 de l'anode est assuré par le choix d'un consortium bactérien qui privilégie des bactéries sulfuroréductrices, plus particulièrement les bactéries du genre *Desulfuromonas* qui présentent un métabolisme respiratoire utilisant le soufre élémentaire comme accepteur final d'électrons et produisent H_2S (réduction dissimilatrice). La dissociation du H_2S en H^+ et soufre élémentaire (S^0) à l'anode permet
10 la réalisation d'un cycle du soufre à ce niveau et le maintien d'une forte activité biochimique.

[0050] Selon une réalisation particulière du procédé, les microorganismes constituant le consortium bactérien sont présents à l'état latent dans l'effluent. Alternativement, les microorganismes sont inoculés directement dans l'effluent, ou indirectement sur le
15 support bactérien avant sa mise en contact avec l'effluent.

Effluent

[0051] Selon une réalisation particulière du procédé, celui-ci est mis en œuvre où l'effluent est un effluent organique, particulièrement du lisier, plus particulièrement du lisier de porc. Selon une réalisation alternative du procédé, l'effluent organique est une
20 eau usée municipale ou toute autre effluent de traitement industriel ou agricole chargé en matière organique qui pourra être inoculé et traité par le consortium bactérien.

Système anodique

[0052] Des travaux de recherche ont démontré que le principal mécanisme de transfert d'électrons d'une biopile alimentée au lisier de porc implique un intermédiaire
25 redox, ce qui signifie que le rôle principal de l'anode est celui d'accepteur d'électrons et non de support bactérien. À cause de ce phénomène, la matière constitutive de l'anode a peu d'importance du moment que celle-ci est conductrice et inoxydable.

[0053] Il est néanmoins avantageux de construire cette électrode à partir d'un matériau qui offre le moins de résistance au passage des électrons afin de minimiser les
30 pertes ohmiques de la biopile. En contrepartie, il est utile d'inclure dans le système

anodique, près de l'anode, un support bactérien qui permet d'assurer un maximum de croissance des espèces bactériennes «électrophiles», tel que des granules de charbon activé.

5 [0054] Selon une réalisation particulière, l'anode se présente sous forme d'une grille ou une plaque avec orifices ayant une forme pouvant servir de réceptacle pour le support bactérien. Particulièrement, la grille ou plaque avec orifices est sous forme d'un panier pouvant être rempli avec le support bactérien.

[0055] Selon une réalisation particulière, l'élément accepteur d'électrons est en fibre de carbone, ou particulièrement en acier inoxydable.

10 [0056] Selon une réalisation particulière, le support bactérien est un adsorbant bactérien, plus particulièrement, l'adsorbant bactérien est constitué de charbon activé. Les analyses microbiologiques et chimiques réalisées sur du charbon activé provenant d'une biopile mature révèlent que le soufre est impliqué dans le mécanisme respiratoire des bactéries.

15 [0057] Selon une réalisation particulière, les analyses microbiologiques indiquent une forte présence de bactéries du genre *Desulfuromonas* dans le charbon activé. Ces dernières sont des bactéries caractérisées par un métabolisme utilisant l'acétate comme source d'énergie et le soufre comme accepteur d'électrons (Euzéby, 2010).

Système cathodique

20 [0058] Selon un aspect de l'invention, la réalisation de la cathode est assurée par l'utilisation d'une surface cathodique en acier inoxydable recouverte par galvanoplastie d'un catalyseur en métal noble (particulièrement le platine) et par la recirculation dans la chambre cathodique d'un électrolyte fortement oxydant contrôlé à un pH fortement acide.

25 [0059] Le Demandeur a donc décidé de fabriquer ses propres cathodes afin d'en réduire les coûts de fabrication. Parmi les techniques visant à réduire l'utilisation du platine, la méthode par électrodéposition constitue une des voies les plus prometteuses. Cette façon de faire permet de déposer une quantité donnée de métal noble en passant un courant d'intensité connue dans une électrode baignant dans une solution contenant ce métal. En fournissant une électrode plaquée avec du métal noble fortement lié au

support, le risque de détérioration des sites catalytiques par frottement est réduit. Conséquemment, des cathodes fabriquées à partir d'une grille en acier inoxydable et plaquées par galvanoplastie avec un métal noble, notamment du platine et/ou du ruthénium, se sont avérées très performantes.

5 **[0060]** Selon un aspect particulier, les hautes performances à la cathode sont assurées par l'utilisation d'une surface cathodique réalisée à partir d'une grille en acier inoxydable recouverte par électro-plaquage de Ruthénium et par la recirculation dans la chambre cathodique d'un électrolyte oxydant par l'ajout contrôlé de peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) et/ou d'un acide afin de maintenir un pH contrôlé autour de 2.

10 *Biopile selon une réalisation particulière de l'invention*

[0061] La **Figure 4** schématise une biopile (10) immergée dans un contenant (20) rempli d'effluent organique (21) reliée à un système de pompage de l'effluent (30). L'anode (40) est de forme évidée pour procurer un volume qui pourra contenir un support bactérien (50). La chambre cathodique (70) est constituée par une structure
15 évidée qui abrite la cathode (80), dont un côté est fermé par une membrane perméable aux cations (60), la séparant de l'anode (40). Cette chambre cathodique (70) est fermée hermétiquement d'un autre côté par un couvercle (75).

[0062] L'électrolyte de la chambre cathodique (70) est une solution aqueuse (100) à pH acide circulée grâce à un circuit de recirculation (110). Le circuit électrique (90) de la
20 biopile est fermé par une résistance.

[0063] Selon une réalisation particulière de la présente invention, le compartiment anodique prend la forme d'un panier en acier inoxydable qui est accolé au compartiment cathodique. Le panier formé d'une grille contient le support bactérien et met en contact à la fois l'élément anodique, le support bactérien et l'effluent. L'utilisation d'une anode-
25 panier immergée dans l'effluent organique à traiter est motivée par le constat que le consortium bactérien se développe particulièrement bien dans cette condition. Les deux éléments (anode-panier et chambre cathodique) sont donc immergés dans un réservoir contenant le lisier (ou l'effluent à traiter).

[0064] De plus, des essais de voltamétrie cyclique, motivés par la recherche de
30 métaux de remplacement au platine, ont conduit à la découverte que le ruthénium,

jumelé à l'utilisation du peroxyde d'hydrogène, offrait des perspectives des plus intéressantes comme catalyseur. D'une part, nettement plus économique à l'achat que le platine, le ruthénium permet d'obtenir un potentiel élevé à la cathode en présence de H₂O₂. D'autre part, l'utilisation du ruthénium réduit la formation spontanée de bulles d'oxygène comme le ferait le platine, ce qui diminue les pertes de peroxyde d'hydrogène attribuables à ce phénomène.

[0065] Particulièrement, la biopile telle que définie par les présentes peut se présenter sous une forme où l'anode et la chambre cathodique sont immergées dans l'effluent organique contenu dans un réservoir. Selon une réalisation particulière de l'invention, la biopile fonctionne selon le procédé tel que défini par les présentes.

[0066] La suite de ce document présente les résultats d'essais démontrant la validité du concept de biopile immergée.

Exemple 1

Biopile immergée à compartiment unique

15 **Matériel et méthode**

[0067] Le substrat utilisé au cours de ces essais provient d'un lisier de porc brut séparé par un séparateur décanteur-centrifuge industriel situé sur une ferme de porcs à l'engraissement. Le lisier provient de la pré-fosse (lisier frais) et la fraction liquide recueillie au séparateur a été réfrigérée pendant son entreposage. On peut caractériser cette fraction liquide par sa teneur en matière sèche, soit en dessous de 15%, particulièrement moins de 10%.

[0068] La **Figure 5** montre une biopile (10) à compartiment unique (20) reliée à ses périphériques de pompage (30). L'anode (40) de la biopile est réalisée à partir d'une grille en acier inoxydable de 960 mailles cm² (SS304, Grillage Major inc) façonnée en forme de panier de 80 X 80 X 40 mm, procurant un volume utile de 260 mL qui pourra contenir 75 g de charbon activé (50) (C2764, Sigma-Aldrich). Une membrane échangeuse de cations (60) (CMI-7000, Membranes International Inc.) sépare l'anode (40) de la chambre cathodique (70). Ce compartiment est constitué par une structure carrée et évidée en polypropylène de 125 X 125 X 25 mm, lequel est fermé

hermétiquement d'un côté par la membrane échangeuse de cation (60) et d'un autre côté par un couvercle (75). La chambre cathodique (70) abrite une cathode (80) de 100 X 100 mm, qui est réalisée à partir du même grillage que l'anode mais, dans ce cas ci, plaquée par galvanoplastie avec du ruthénium.

- 5 **[0069]** Avant le placage, les grilles en acier inoxydable ont été immergées pendant 1 heure dans de l'hexane et 1 autre heure dans une solution de peroxyde d'hydrogène (10 %) pour enlever les graisses et les impuretés. Préalablement au placage du ruthénium, la grille en acier inoxydable est préparée par traitement galvanoplastique pendant une minute en utilisant un conditionneur (Stainless steel activator for gold, 10 Caswell) habituellement utilisé pour préparer le placage de l'or sur des pièces en acier inoxydable. Le dépôt de ruthénium s'effectue à partir d'une solution de RuCl_3 . Un courant de 0,2 A pendant 7 minutes est appliqué pour obtenir une couverture théorique de 0,29 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ de ruthénium.

- [0070]** Deux biopiles (10) ont été assemblées et chaque anode-panier (40) contenait 15 75 g de charbon activé. Une fraction liquide de lisier de porc est utilisée comme carburant et source bactérienne. Une période d'incubation de 10 jours permet de développer un consortium bactérien d'intérêts incluant des bactéries du genre *Desulfuromonas*. Le pH et le potentiel d'oxydoréduction sont les paramètres physico-chimiques à contrôler pour favoriser le développement du consortium bactérien d'intérêt. 20 Il a été défini que les conditions optimales de fonctionnement sont, pour le pH, entre 6.5 et 8 et pour le potentiel d'oxydoréduction, inférieur à -150 mV, référencées à partir d'une sonde Ag/AgCl. De plus, la température de fonctionnement doit être comprise entre 15 et 35 °C. Le suivi du développement du consortium a été réalisé avec des outils de 25 biologies moléculaires afin de dénombrer le développement des populations cibles. Le charbon activé supportant le consortium bactérien d'une biopile peut servir à inoculer le charbon activé ou l'effluent d'une biopile subséquente.

- [0071]** Les biopiles (10) ont été immergées dans un réservoir de 5 L contenant 3 L de fraction liquide et suivie avec les paramètres de fonctionnement décrites plus haut. L'électrolyte de la chambre cathodique est une solution aqueuse d'une concentration de 30 0,03 M de H_2O_2 (100) circulée grâce à un circuit de recirculation (110) et maintenue à un pH de 2,7 avec du H_2SO_4 . Le circuit électrique (90) des deux biopiles est fermé par une

résistance de 100 ohms et la progression de la tension aux bornes des piles est enregistrée par un système d'acquisition de données (CR10X, Campbell Scientific).

[0072] Les 10 premières journées ont permis d'observer la montée en tension des 2 biopiles pendant le développement du consortium bactérien et de calculer la sortie de puissance maximale à la fin de ce cycle. De manière générale, les populations bactériennes d'une biopile inoculée sont pleinement développées après 10 jours. Les jours subséquents, les 2 anodes-paniers ont été assemblées de part et d'autre du même compartiment cathodique (1 seule cathode), simulant ainsi le comportement d'une biopile avec une charge de 150 g (2X75) de charbon activé. Le pH de l'électrolyte à la cathode a été également réduit à 2,2 pour observer l'effet sur la sortie de puissance de la biopile.

Résultats

[0073] La **Figure 6** montre les courbes de performances des 2 biopiles avec 75 g de charbon activé. La tension en circuit fermé, alors qu'aucune charge électrique ne sollicite les piles, atteint une tension de plus d'un volt. En fonctionnement, au fur et à mesure que les biopiles sont sollicitées, la décroissance de la tension est linéaire et une densité de courant maximale de 8 000 mA·m⁻² est atteinte. La densité de courant et la densité de puissance sont données par rapport à la section géométrique de la cathode. La densité de puissance maximale est près de 2 000 mW·m⁻² à une tension d'opération de 500 mV. La puissance volumique maximale, soit le rapport entre la sortie de puissance maximale et le volume de l'anode-panier, est de 81 W·m⁻³.

[0074] La **Figure 7** présente les courbes de performance après la fusion des 2 anodes-paniers au même compartiment cathodique. Dans ce cas-ci, le pH de l'électrolyte à la cathode est de 2,7. La tension en circuit fermé atteint également une tension de plus d'un volt. En fonctionnement, la densité de courant maximale est près de 15 000 mA·m⁻². La densité de puissance maximale est près de 4 000 mW·m⁻² à une tension d'opération de 500 mV. La puissance volumique maximale est de 65 W·m⁻³.

[0075] La **Figure 8** présente également les courbes de performance de la biopiles avec 2 anodes-paniers alors que le pH de l'électrolyte à la cathode est de 2,2. La tension en circuit fermé atteint presque 1,1 volt. En fonctionnement, la densité de courant maximale est près de 19 000 mA·m⁻². La densité de puissance maximale est

près de $5\ 100\ \text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ à une tension d'opération de 550 mV. La puissance volumique maximale est de $100\ \text{W}\cdot\text{m}^{-3}$.

Analyses des résultats

- [0076]** Dans une récente revue de littérature, Fomero et al. (2010) ont répertorié 5 différents résultats de biopiles ayant fonctionné avec des cultures mixtes bactériennes tout en mettant l'accent sur celles ayant utilisé comme carburant des eaux usées de sources municipale, agricole ou issues de la transformation alimentaire. Le **Tableau 1** résume les résultats de cette investigation et les données relatives aux biopiles ayant spécifiquement fonctionné avec des eaux usées sont mises en caractère gras.

10 **Tableau 1 Performances de différentes biopiles (Fomero et al., 2010).**

§ a)	Anode volume (mL)	Synthetic or real wastewater substrate type [b]	Concentration (mg/L) [c]	Maximum power [d]	External resistor (Ω) [e]	Coulombic efficiency (%) [f]	Ref.
F	550	Acetate	458	48 W/m ²	20	98	[17]
D	40	Glucose	2000	3600 mW/m ²	< 100	89	[18]
D	240	Glucose	NP [g]	4310 mW/m ²	< 100	81	[27]
F	390	Glucose	467	35 W/m ²	20	74	[17]
B	22	Acetate	1000	286 mW/m ²	33	65	[16]
B	22	Butyrate	1000	220 mW/m ²	33	50	[16]
F	390	Hospital wastewater	332	25 W/m²	NP [g]	36	[17]
C	28	Acetate	800	506 mW/m ²	218	29	[36]
D	22	Starch	1000	242 mW/m ²	33	21	[16]
H	28	BSA	1100	354 mW/m ²	> 50	20.6	[35]
F	390	Municipal wastewater	429	10 W/m²	75	20	[17]
B	22	Dextran	1000	150 mW/m ²	33	17	[16]
E	440	Sucrose	800	29 W/m ²	20	14.2	[34]
B	22	Glucose	1000	212 mW/m ²	33	14	[16]
F	520	Sucrose	1000	170 mW/m ²	56	8.1	[13]
I	28	Swine waste (soluble fraction)	8320	261 mW/m²	200	8	[37]
C	28	Butyrate	1000	305 mW/m ²	1000	7.8	[36]
A	22	Municipal wastewater	379	72 mW/m²	470	6	[16]
H	28	Peptone	500	269 mW/m ²	> 50	6.0	[35]
H	28	Slaughterhouse wastewater	1420	80 mW/m²	> 50	5.2	[35]
G	5400	Brewery wastewater	1168	5 W/m²	10	3.6	This paper

[a] Described in the paragraph A-1.

[b] Real wastewater substrate in bold, these wastewaters were not preacidified.

[c] COD concentration was used for the real wastewater substrates.

[d] Maximum power density in mW per m² anodic electrode surface area and maximum power output in W per M³ of total anodic volume.

[e] Used to obtain the maximum power except for the Min et al. [16] for which we reported the average values.

[f] Data from maximum power density of output was used to calculate the coulombic efficiency except for the Min et al. [16].

[g] NP: information not provided by authors.

- [0077]** On note que les résultats du **Tableau 1** ont varié de 80 à 4300 mW·m⁻² pour la densité de puissance et de 5 à 48 W·m⁻³ pour les puissances volumiques. Fait important 15 à noter, les valeurs maximales ont été atteintes avec des biopiles utilisant un substrat pur comme carburant (acétate, glucose). Avec une puissance volumique de $25\ \text{W}\cdot\text{m}^{-3}$, une biopile alimentée avec des eaux usées provenant d'un hôpital présente les meilleurs résultats lorsque le substrat n'est pas pur. Oh et al. (2010) arrivent à une conclusion

similaire dans une revue de littérature également assez récente. Ils constatent que des biopiles fonctionnant avec des eaux usées produisent une sortie de puissance volumique variant de 4 à 15 $W \cdot m^{-3}$.

5 **[0078]** Pour sa part, la biopile de la présente invention contenant 150 g de charbon activé avec un électrolyte à la cathode ayant du peroxyde d'hydrogène et un pH de 2,2 dégage une densité de puissance de plus de 5 000 $W \cdot m^{-2}$ et une puissance volumique de 100 $W \cdot m^{-3}$. Ces résultats démontrent l'avantage de la présente invention par rapport aux résultats contenus dans la littérature.

10 **[0079]** L'expérience réalisée démontre également qu'une cathode plaquée par galvanoplastie avec du ruthénium, laquelle est immergée dans une solution oxydante à base de peroxyde d'hydrogène, offre des perspectives intéressantes pour de futures mises à l'échelle. Elle a en effet soutenu toutes les charges électriques en provenance de l'anode même si la quantité de charbon activé a été doublée au cours de l'expérience. Cette découverte permet d'envisager la réalisation de cathodes
15 performantes en utilisant un métal noble nettement moins dispendieux que le platine. Finalement, le contrôle du pH est un paramètre de contrôle stratégique pour l'électrolyte contenu dans la chambre cathodique, car comme illustrées par les **Figures 7 et 8**, une diminution de ce paramètre de 0,5 unité (2,7 à 2,2) permet d'augmenter d'environ 25 % la sortie de puissance d'une biopile.

20 **Exemple 2**

[0080] La **Figure 9** montre une vue éclatée d'une biopile suite à une réalisation particulière où la biopile unitaire prend la forme d'un caisson pouvant être empilable pour former une batterie suite à un assemblage en série. De fait, on peut voir l'anode (40) formée par un panier de forme rectangulaire et plat, fait d'une grille inoxydable et
25 comportant un vide (41) servant d'espace pour y entasser le charbon activé (non-illustré). Cette anode (40) est ensuite soutenue par un support anodique (42) qui est ensuite couplé à la membrane échangeuse de cations (60) via un joint d'étanchéité (43).

[0081] De l'autre côté de cette unité, la cathode (80) est constituée d'un grillage en acier inoxydable plaqué par galvanoplastie avec du ruthénium et abritée dans la
30 chambre cathodique (70). La chambre cathodique (70) est de forme rectangulaire et

plate, et est fermée hermétiquement d'un côté par la membrane échangeuse de cations (60) via un joint d'étanchéité (61). La chambre cathodique comprend une entrée du liquide oxydant (111) et une sortie du liquide oxydant (112). La cathode (80) est donc insérée à l'intérieur de la chambre cathodique (70), de l'autre côté de la membrane

5 échangeuse de cations (60) par rapport à l'anode (40).

[0082] La **Figure 10** montre une biopile unitaire une fois que tous les éléments de la Figure 9 ont été assemblés de façon étanche. On montre aussi que plusieurs unités de biopile peuvent être assemblées pour former une batterie (120). Celle-ci pouvant être placée dans un réceptacle (130) (ex. une cuve de plastique) pouvant recevoir différents

10 volumes d'effluents organiques. Particulièrement, l'effluent peut être contenu dans le réceptacle et la batterie immergée ou encore, la batterie peut être placée dans le réceptacle et l'effluent circulé à l'intérieur des unités de la batterie.

[0083] Particulièrement, les différentes biopiles unitaires peuvent être branchées entre elles, soit en série ou en parallèle, pour former la batterie.

15 **[0084]** Alternativement, lorsque les biopiles unitaires sont assemblées dans le but de traiter un effluent plutôt que de produire de l'électricité, on parlera alors de "réacteur" ou de "bioréacteur" au lieu de "batterie".

[0085] Une variante de cette réalisation particulière consistera à assembler de part et d'autre d'une chambre cathodique: une anode panier (40), un support anodique (42)

20 couplée à une membrane échangeuse de cations (60) de manière à doubler la quantité de support bactérien (charbon activé) pour une même cathode.

Références

- Euzéby J P. 2010. Desulfuromonas. [en ligne] Disponible : <http://www.bacterio.cict.fr/d/desulfuromonas.html>. [consulté le 7 novembre 2011].
- 25 Formero JJ, Rosenbaum M et Angenent LT. 2010. Electrical power generation from municipal, food and animal wastewaters using microbial fuel cells. *Electroanalysis* 22, no. 7: 832-843.
- Girault H H. 2001. Électrochimie physique et analytique. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 449 p
- 30 Haberman W et Pommer EH. 1991. Biological fuel cells with sulphide storage capacity. *Appl. Microbiol. Biotechnol* 35 : 128-133.

- Kleinsmith LJ et Kish VM. 1988. Principles of cell biology. *Harper & Row, Publisher*, 796 p.
- Litster S et McLean G. 2004. PEM fuel cell electrodes. *J. of Power Sources* 130, no. 1-2: 61-76.
- 5 Miles B. 2003. Biological redox reactions. [en ligne] Disponible :
<http://www.tamu.edu/classes/bmiles/lectures/Biological%20Redox%20Reactions.pdf>.
[consulté le 21 septembre 2010].
- Oh ST, Kim JR, Premier GC, Lee TH, Kim C et Sloan WT. 2010. Sustainable wastewater treatment: How might microbial fuel cells contribute. *Biotechnology Advances* 28: 871-881.
- 10 Rabaey K, Boon N, Siciliano SD, Verhaege M et Verstraete W. 2004. Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer. *Applied and Environmental Microbiology* 70, no. 9: 5373-5382.
- Rabaey K et Verstraete W. 2005. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *TRENDS in Biotechnology* 23, no. 6: 291-298.
- 15 Schröder U. 2007. Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency. *Physical Chemistry Chemical Physics* 9: 2619-29.
- Tchobanoglous G, Burton FL et Stensel HD. 2003. Wastewater engineering; treatment and reuse/ Metcalf and Eddy Inc. 4 th ed., McGraw-Hill. 1819 p.

REVENDEICATIONS

1. Un système bioélectrochimique comprenant:
 - (a) un système anodique comprenant une anode comprenant un élément accepteur d'électron sous forme d'un réceptacle perméable pouvant contenir un support bactérien, ledit système anodique étant adapté pour être immergé dans un effluent organique, et
 - (b) un compartiment cathodique comprenant une cathode comprenant un élément en acier inoxydable plaqué avec un métal noble et un électrolyte oxydant en circulation, ledit compartiment cathodique étant en lien électrique avec ledit système anodique grâce à un circuit externe, et ledit compartiment cathodique étant séparé dudit système anodique par une membrane perméable aux cations; ledit compartiment cathodique étant adapté pour être immergé dans ledit effluent organique.
2. Le système bioélectrochimique tel que défini à la revendication 1, où ledit support bactérien est un adsorbant bactérien.
3. Le système bioélectrochimique tel que défini à la revendication 2, où ledit adsorbant bactérien est constitué de charbon activé.
4. Le système bioélectrochimique tel que défini à la revendication 3, où ledit réceptacle perméable est formé d'une grille ou d'une plaque avec orifices ayant une forme pouvant servir de contenant pour ledit support bactérien.
5. Le système bioélectrochimique tel que défini à la revendication 4, où ladite grille ou plaque avec orifices est sous forme d'un panier pouvant être rempli avec ledit support bactérien.
6. Le système bioélectrochimique tel que défini selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, où ledit élément accepteur d'électrons de l'anode est en acier inoxydable.
7. Le système bioélectrochimique tel que défini selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, où ladite anode est un panier rempli dudit support bactérien.

- 8.** Le système bioélectrochimique tel que défini selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, où ledit système anodique et ledit système cathodique sont immergés dans ledit effluent organique.
- 9.** Le système bioélectrochimique tel que défini selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel le métal noble est le platine.
- 10.** Le système bioélectrochimique tel que défini selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel le métal noble est le ruthénium.
- 11.** Usage du système bioélectrochimique tel que défini selon l'une quelconque des revendication 1 à 10, pour la génération d'électricité.
- 12.** Usage du système bioélectrochimique tel que défini selon l'une quelconque des revendication 1 à 10, pour la bioremédiation d'un effluent chargé en matière organique.
- 13.** Usage du système bioélectrochimique tel que défini selon l'une quelconque des revendication 1 à 10, pour le traitement d'un effluent chargé en matière organique.

Figures

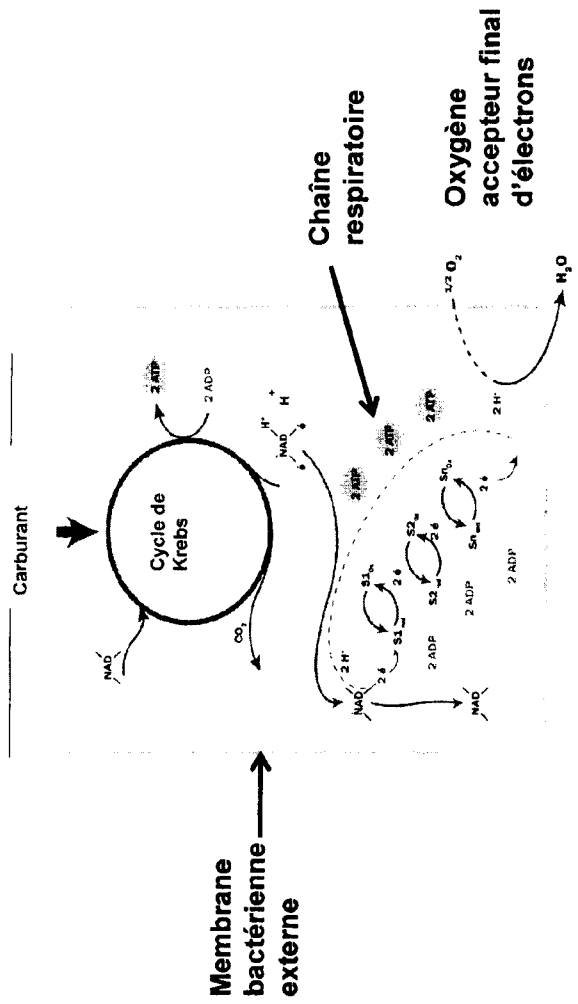


Figure 1

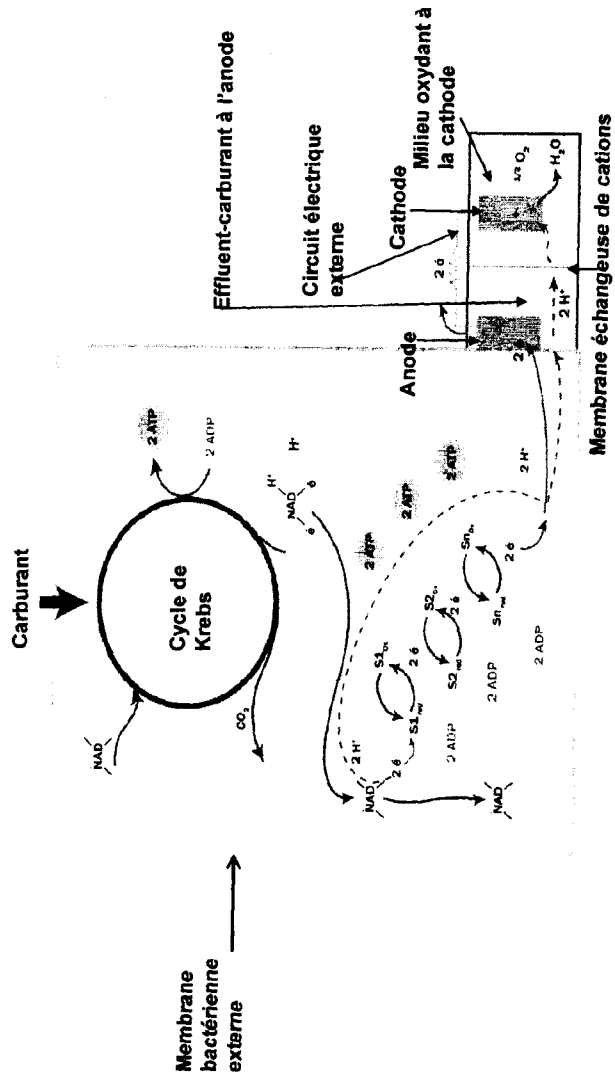


Figure 2

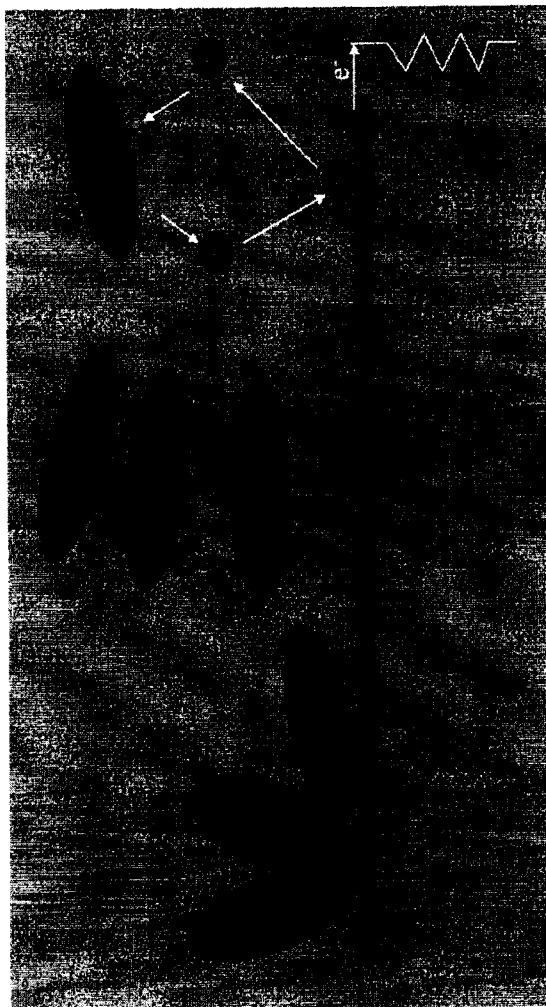


Figure 3

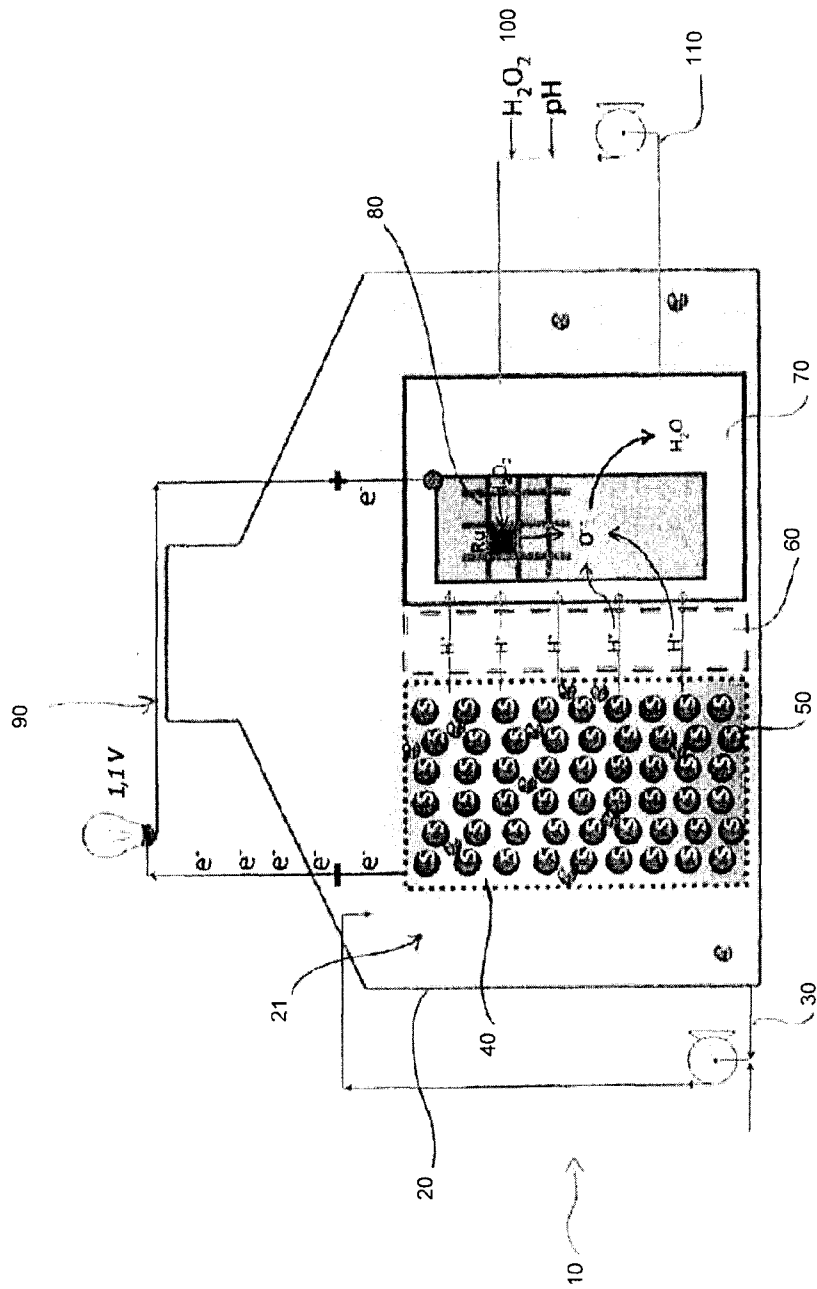


Figure 4

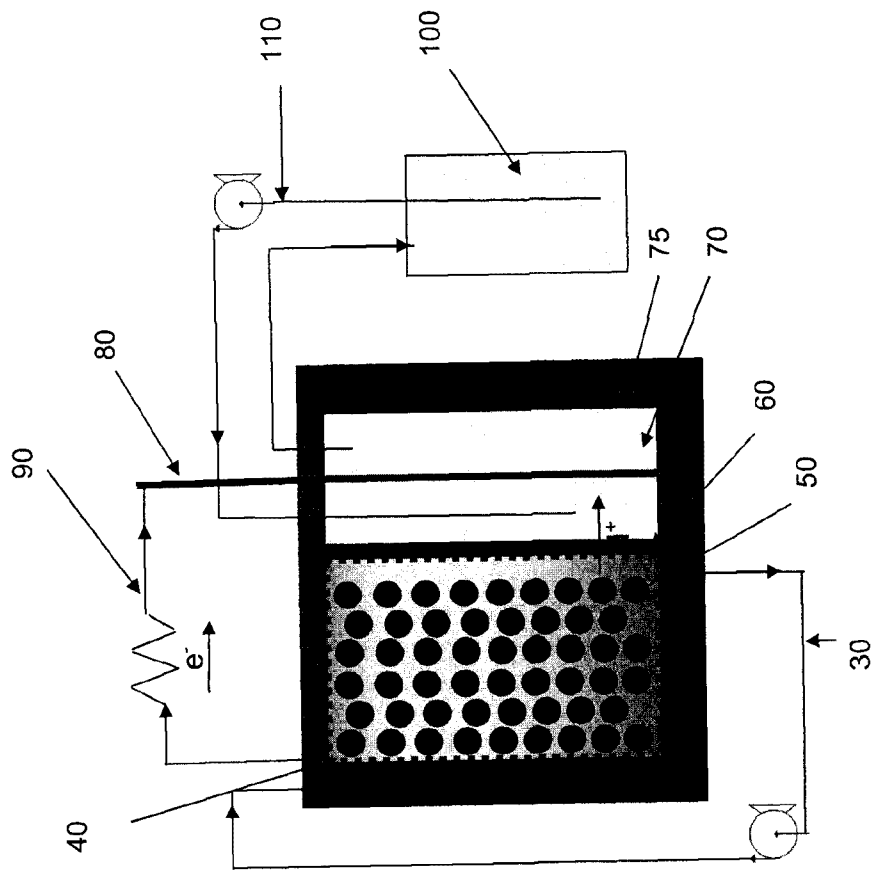


Figure 5

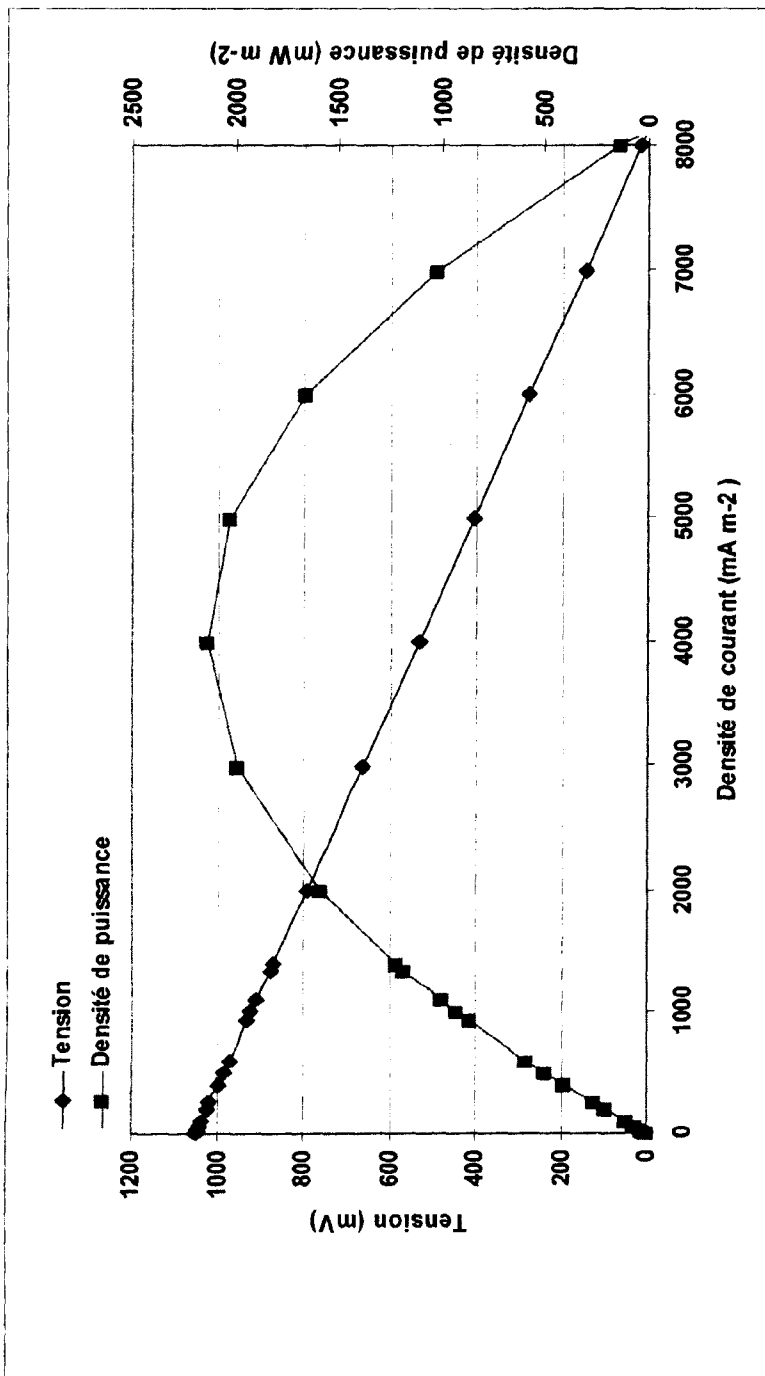


Figure 6

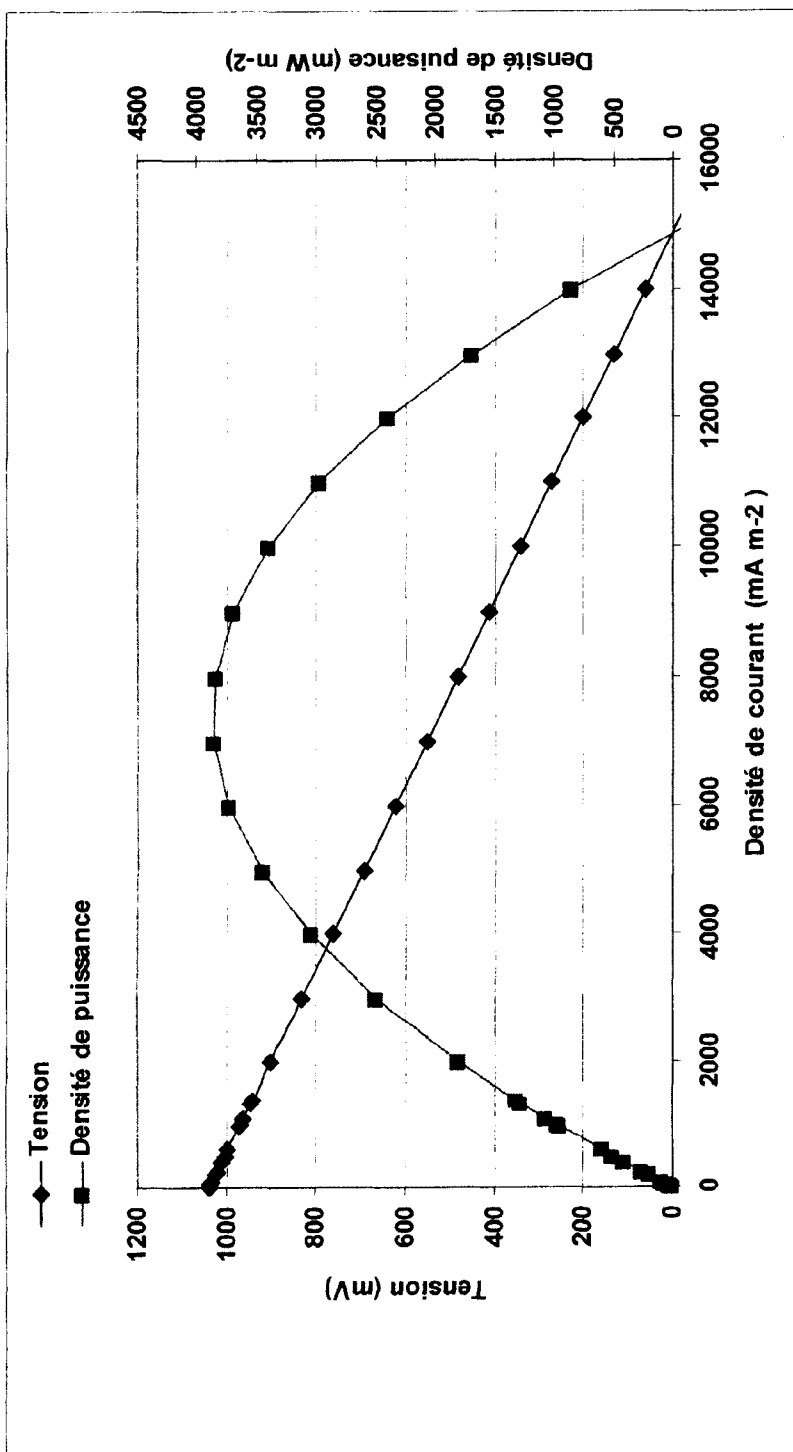


Figure 7

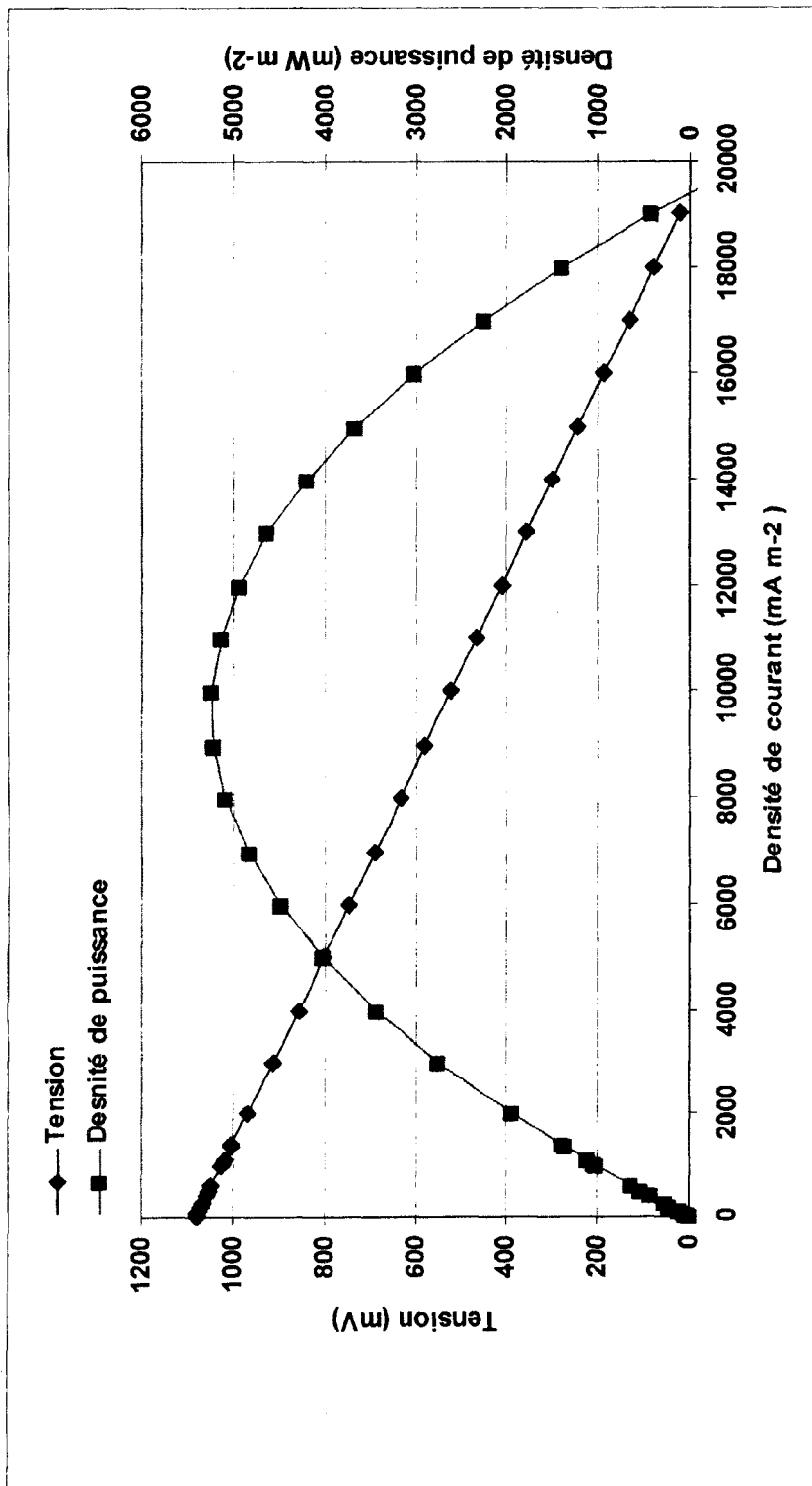


Figure 8

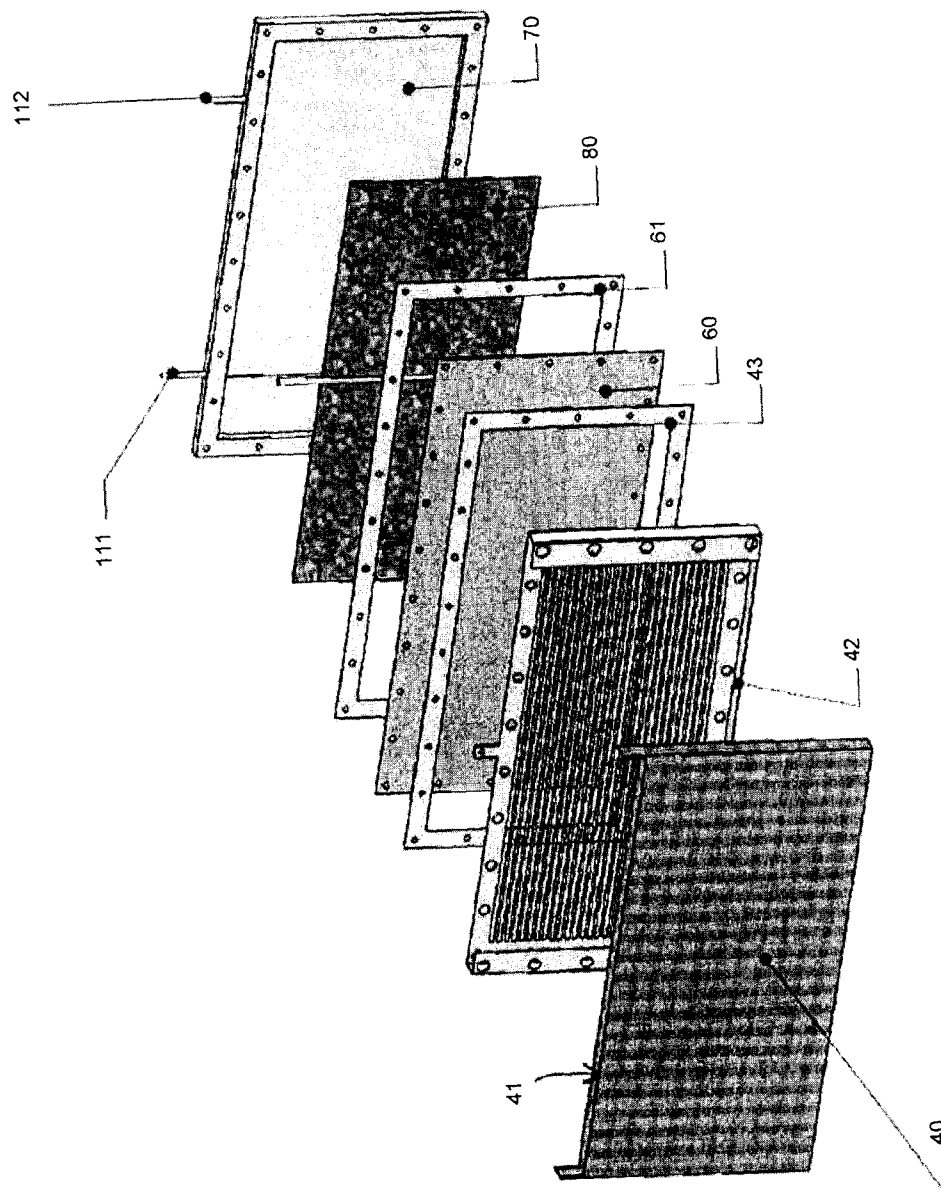


Figure 9

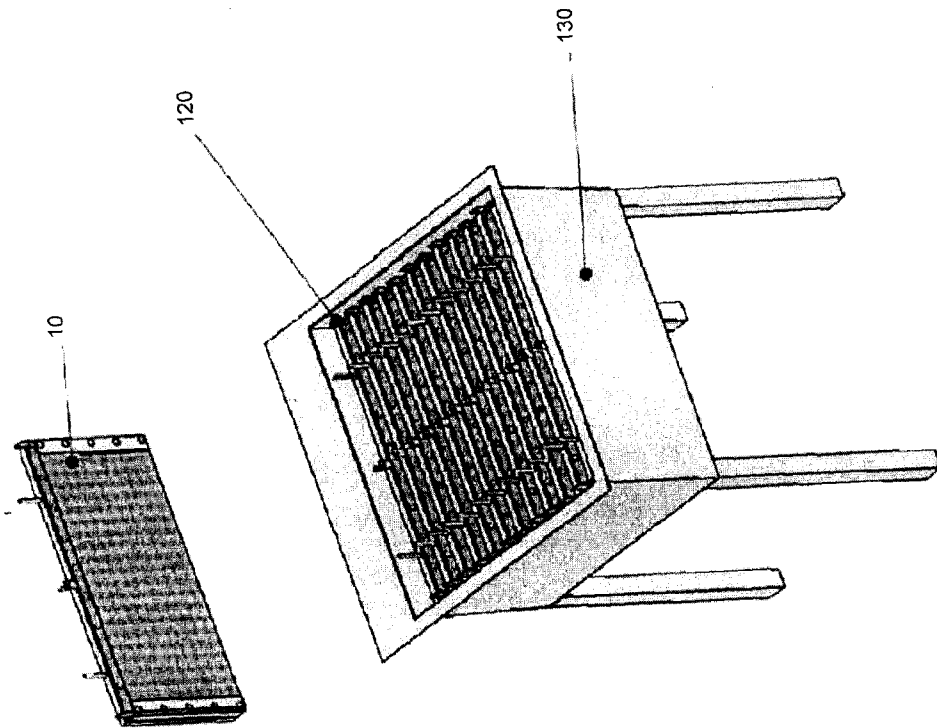


Figure 10

