



(22) Date de dépôt/Filing Date: 2005/06/29

(41) Mise à la disp. pub./Open to Public Insp.: 2005/12/29

(30) Priorité/Priority: 2004/06/29 (2,472,879) CA

(51) Cl.Int.⁷/Int.Cl.⁷ C02F 1/461, C02F 11/12

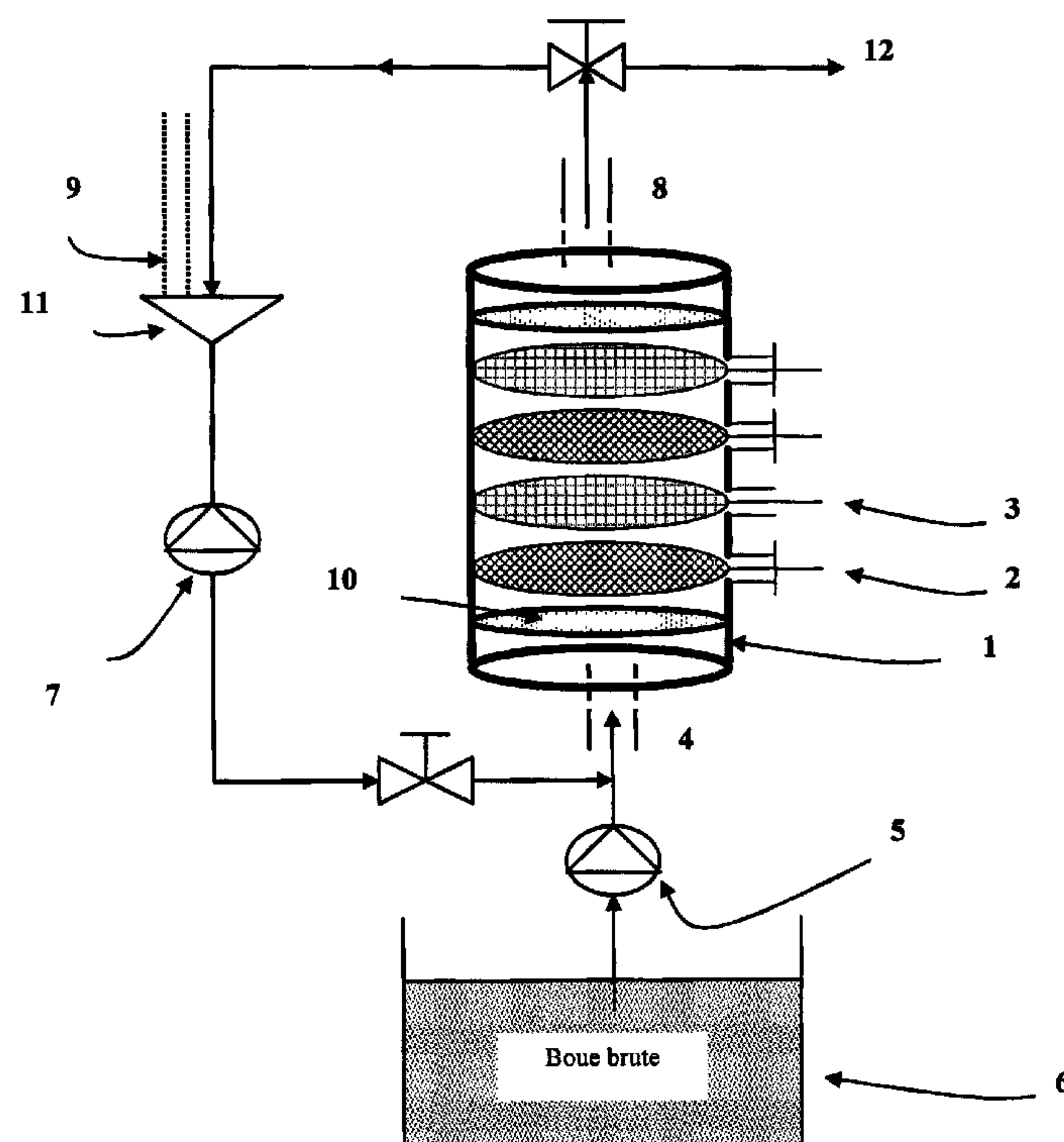
(71) Demandeur/Applicant:
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE, CA

(72) Inventeurs/Inventors:
DROGUI, PATRICK, CA;
BUREAU, MARC-ANDRE, CA;
BLAIS, JEAN-FRANCOIS, CA;
MERCIER, GUY, CA

(74) Agent: GOUDREAU GAGE DUBUC

(54) Titre : PROCEDE EELCTROCHIMIQUE DE CONDITIONNEMENT ET STABILISATION DES BOUES D'EPURATION
MUNICIPALES ET INDUSTRIELLES

(54) Title: ELECTROCHEMICAL STABILIZATION AND PRECONDITIONING PROCESS FOR MUNICIPAL AND
INDUSTRIAL SLUDGE



(57) Abrégé/Abstract:

Procédé de conditionnement de boues d'épuration caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes : acidification des boues d'épuration de manière à atteindre un pH entre environ 3,5 et environ 5 pour générer des boues acidifiées; électrolyse des boues acidifiées dans une cellule électrolytique comprenant des électrodes dont au moins une anode et au moins une cathode, la cellule étant capable de générer in situ un oxydant bactéricide choisi parmi l'acide hypochloreux et l'acide persulfurique, pour générer des boues électrolysées, les boues électrolysées ayant une déshydratabilité et une stabilité plus élevée que les boues d'épuration.



ABRÉGÉ

Procédé de conditionnement de boues d'épuration caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes : acidification des boues d'épuration de manière à atteindre un pH entre environ 3,5 et environ 5 pour générer des boues acidifiées;

- 5 électrolyse des boues acidifiées dans une cellule électrolytique comprenant des électrodes dont au moins une anode et au moins une cathode, la cellule étant capable de générer *in situ* un oxydant bactéricide choisi parmi l'acide hypochloreux et l'acide persulfurique, pour générer des boues électrolysées, les boues électrolysées ayant une déshydratabilité et une stabilité plus élevée que les boues
- 10 d'épuration.

TITRE

[0001] PROCÉDÉ ÉLECTROCHIMIQUE DE CONDITIONNEMENT ET STABILISATION DES BOUES D'ÉPURATION MUNICIPALES ET INDUSTRIELLES

DOMAINE DE L'INVENTION

5 **[0002]** La présente invention concerne un procédé électrochimique de conditionnement et stabilisation et des boues d'épuration municipales et industrielles. Ce procédé permet une réduction importante des indicateurs de pathogènes et des odeurs. Ce procédé permet également d'améliorer significativement les caractéristiques de déshydratabilité des boues favorisant ainsi
10 la hausse de leur siccité lors de leur déshydratation mécanique.

ART ANTÉRIEUR

[0003] Le traitement des eaux usées municipales et industrielles entraîne une production croissante de boues d'épuration. Ces diverses boues doivent évidemment être éliminées en minimisant les risques pour la santé humaine et les écosystèmes. Les
15 modes d'élimination de cette biomasse les plus utilisés actuellement sont l'épandage agricole, l'enfouissement sanitaire et l'incinération. La disposition finale de ces rejets est assujettie à diverses contraintes d'ordres technique et économique.

[0004] L'incinération et l'enfouissement, bien que parfois nécessaires, ne permettent que l'élimination des boues, sans tirer avantage de leurs propriétés physiques et
20 chimiques. De plus, la difficulté de déshydrater de manière très performante les boues d'épuration constitue un obstacle important à la disposition des boues par enfouissement ou incinération. La raréfaction des sites d'enfouissement sanitaire (hausse des coûts d'acceptation) et les coûts très élevés inhérents à l'incinération des boues ont accru, au cours des dernières années, l'attrait de l'utilisation des
25 boues comme fertilisants agricoles ou sylvicoles.

[0005] La valorisation agricole des boues est l'option privilégiée par les autorités gouvernementales et elle est largement pratiquée à travers le monde. À l'heure actuelle, de 30 à 40% des boues d'épuration produites dans le monde sont utilisées pour la fertilisation des sols. L'intégration de procédés performants de stabilisation des boues dans les stations d'épuration municipales et industrielles permettrait d'accroître les possibilités de valorisation agricole des boues résiduelles de traitement des eaux usées.

[0006] De plus, l'utilisation d'un procédé de stabilisation permettant également d'améliorer la capacité de déshydratation des boues serait souhaitable, tenant compte des difficultés associées à cette étape de traitement des boues d'épuration. Ainsi, le conditionnement des boues d'épuration avant leur déshydratation mécanique s'effectue habituellement par un apport de flocculant (polymère organique). Or, la déshydratation mécanique des boues biologiques ainsi conditionnées demeure difficile, de sorte que la siccité finale des boues déshydratées reste faible et engendre donc des coûts de transport et de disposition par épandage, enfouissement ou incinération appréciables.

[0007] La stabilisation des boues dans les stations d'épuration s'effectue habituellement par les procédés biologiques de digestion aérobie ou anaérobie. La digestion aérobie est une technique de stabilisation des boues utilisée surtout dans les stations d'épuration de petite et moyenne capacités. La stabilisation par digestion aérobie est réalisable sur des boues secondaires ou sur des boues mixtes (primaires et secondaires). Le coût énergétique important associé à l'aération des boues est un facteur limitant l'emploi de cette technologie. Lors de la digestion aérobie, les bactéries aérobies métabolisent les matières organiques solubilisées en dioxyde de carbone, en eau et en nouvelles cellules bactériennes. Lorsque les matières organiques solubles sont épuisées, les cellules bactériennes meurent et libèrent ainsi des éléments nutritifs intracellulaires qui servent de nourriture à d'autres organismes. Le taux de minéralisation des boues dépend principalement du temps de séjour, de la température, ainsi que de l'âge des boues introduites. Un temps de séjour de 14 à 20 jours est habituellement requis pour une stabilisation adéquate de la biomasse.

[0008] La digestion anaérobie est aussi parmi les méthodes les plus couramment utilisées pour la stabilisation des boues d'épuration municipales. L'utilisation de la digestion anaérobie pour la stabilisation des boues d'épuration remonte à plusieurs décennies. De fait, la fermentation méthanique a un très grand pouvoir de biodestruction cellulaire. Elle permet l'élimination d'une quantité importante de matières organiques. La digestion anaérobie des boues comporte trois étapes : a) au cours de la première étape, les composés organiques complexes de la partie solide des boues subissent une transformation en composés organiques complexes solubles; b) après cette solubilisation, les molécules organiques complexes sont converties en acides gras volatils, composés plus simples, par des microorganismes anaérobies; c) la dernière étape de la réaction en série est la minéralisation complète des acides gras volatils en méthane, en dioxyde de carbone et en sulfure d'hydrogène. En cours d'exploitation dans la plupart des installations municipales, les trois étapes de fermentation méthanique se produisent simultanément dans un digesteur clos. Le temps de rétention des boues est de l'ordre de 30 jours.

[0009] Ces deux techniques de traitement des boues, soit la digestion aérobie et anaérobie, nécessitent l'installation de digesteurs de dimensions importantes, ce qui entraîne des coûts de capitalisation élevés. De plus, l'implantation de tels systèmes dans des stations déjà opérationnelles peut être difficilement réalisable compte-tenu du peu d'espace disponible. Il faut également considérer que l'application de ces traitements sur les boues n'améliore pas leur capacité d'être déshydratées et peut même avoir un effet inverse.

[0010] Lorsque la réduction des coûts est un objectif prioritaire, le pouvoir fermentescible des boues peut être diminué, au moins temporairement, par la seule addition de réactifs chimiques en combinaison ou non avec un traitement thermique. L'apport de chaux peut être effectué sur des boues liquides ou sur des boues déshydratées. Pour obtenir un pouvoir de désinfection adéquat, les boues doivent être amenées à pH 12 pendant au moins deux heures et de préférence pendant 24 heures. Le coût réduit de la chaux, son alcalinité et son effet favorable sur la structure physique des boues en font le réactif le plus utilisé. Cette dernière technique n'augmente pas la quantité de matières organiques biodégradables

contenues dans les boues. Une reprise de fermentation est donc possible si l'évolution ultérieure des conditions du milieu le permet. Un autre désavantage de cette technique est que la masse de boues n'est pas réduite, mais au contraire, est augmentée à la suite de l'addition d'agents alcalins. Il faut également signaler que l'application sur les terres agricoles de boues chaulées n'est pas souhaitable dans les régions où les sols sont alcalins, comme c'est le cas, par exemple, dans une grande partie de l'ouest du continent américain.

[0011] La fixation chimique est un procédé de stabilisation alcalin des boues qui transforme les boues en un produit inerte, lequel peut être utilisé pour le remplissage de terrain en surface ou pour l'application sur les terres. Durant la fixation chimique, une série de réactions chimiques ont lieu en combinant les boues déshydratées avec les réactifs chimiques, ce qui permet l'obtention d'un solide stable du point de vue chimique, biologique et physique. Le produit final est presque inodore et ne contient pratiquement plus de microorganismes pathogènes. De plus, les métaux présents initialement dans les boues sont fixés dans le solide obtenu. Deux procédés de fixation chimique ont été brevetés (brevets américains Nos. 4.853.208 et 6.248.148) et commercialisés: *Chem-fix* et *N-Viro Soil*. Le procédé *Chem-fix* utilise du ciment Portland et un silicate de sodium afin de produire un sol synthétique à base de boues. Le procédé *N-Viro Soil* emploie de la chaux et de la poussière de ciment comme additifs chimiques. Le procédé *N-Viro Soil* peut également utiliser des cendres volantes et de la poussière de chaux. Bien que ces techniques de stabilisation chimique puissent s'avérer des solutions alternatives prometteuses, des contraintes d'ordres économiques et techniques restreignent, à l'heure actuelle, l'emploi de ces technologies. De plus, il faut noter que l'application de ces traitements ne permet pas d'améliorer la capacité de déshydratation des boues.

[0012] Face à la difficulté de déshydratation des boues d'épuration et des problèmes reliés à l'utilisation des procédés usuels de digestion des boues, divers procédés chimiques et thermique combinés de stabilisation et pré-conditionnement des boues d'épuration ont été développés au cours des dernières années. Toutefois, ces

procédés demeurent pour la plupart trop onéreux pour être employés couramment dans les stations d'épuration municipales et industrielles.

[0013] La stabilisation thermique aussi appelée combustion humide, consiste à chauffer les boues en présence d'air, sous de très fortes pressions (jusqu'à 20 MPa et plus) dans le but de réaliser une oxydation poussée de la matière organique, simultanément à la transformation physique des matières colloïdales (Dollerer et Wilderer, Wat. Sci. Technol., 1993, 28(1), 243-248; Karlsson et Goransson, Wat. Sci. Technol., 1993, 27(5/6), 449-456). Cette technologie de stabilisation sert également au conditionnement thermique des boues. Les boues ainsi traitées peuvent, en effet, être filtrées aisément, avec l'obtention d'une siccité de gâteaux se situant entre 40 et 70%. Un procédé d'oxydation sous pression (22 MPa) et à haute température (374 °C) a aussi été proposé pour le traitement des déchets biologiques (Modell, Mater. Techno., 1993, 8(7/8), 131).

[0014] Une autre approche proposée consiste en l'hydrolyse forte de la matière organique des boues par un traitement thermique (150 à 160 °C) en milieu acide (pH 1 à 2) (Everett, Wat. Res., 1974, 8, 899-906). Ce traitement permet une réduction d'environ 90% des matières en suspension et hausse de manière importante la filtrabilité des boues non-hydrolysées. Après traitement, les boues et l'hydrolysât sont neutralisés par addition de chaux, ce qui entraîne la production d'une boue inorganique contenant les métaux lourds extraits, d'une boue organique valorisable par l'amendement des sols, et d'une fraction liquide fortement chargée en matière organique qui est retournée en tête de la chaîne de traitement des boues.

[0015] L'augmentation de la température des boues conduit à une transformation irréversible de sa structure physique, surtout si elles contiennent une forte proportion de matières organiques et colloïdales. Durant le chauffage, les gels colloïdaux sont éliminés et l'hydrophilie particulière diminue fortement. La température de chauffage employée pour le conditionnement thermique varie entre 150 et 200 °C et le temps de cuisson entre 30 et 60 minutes, selon le type de boue et la filtrabilité désirée. Ce

mode de traitement est applicable sur toutes les boues à prédominance organique et permet l'obtention de performances relativement stables par rapport au conditionnement chimique. De plus, ce traitement permet un épaississement important et rapide des boues après cuisson avec l'obtention de boues décantées à plus de 120 g MES/L et même, dans certains cas, plus de 200 g MES/L. La structure des boues est améliorée de sorte qu'une filtration sans apport de réactifs est toujours possible. De fait, de très fortes siccités des gâteaux de filtre-pressé sont atteintes (> 50% ST) avec un conditionnement thermique. Il faut également tenir compte que les boues ainsi conditionnées sont stérilisées, donc libres de microorganismes pathogènes. L'association de la digestion anaérobie des boues et du conditionnement thermique est l'une des filières les plus intéressantes, car elle permet la réutilisation optimale du biogaz (méthane). L'implantation du pré-conditionnement thermique requiert cependant un investissement coûteux en comparaison au conditionnement chimique. De plus, ce traitement thermique entraîne la production de filtrat fortement chargé en matière organique et en azote ammoniacal qui doit être recyclé en tête de la station d'épuration. Des mesures de prévention spéciales doivent aussi être prises pour limiter les inconvénients occasionnés par la production d'odeurs: couverture des épaississeurs et bassins de rétention, limitation des purges des réacteurs de cuisson et désodorisation de l'air dans les principales enceintes (cuisson, épaississement, déshydratation).

[0016] Fujiyasu *et al.* (brevet canadien No. 1.074.925) ont pour leur part mis au point un procédé de conditionnement chimique de boues biologiques comprenant un apport de 0,5% à 30% de peroxyde d'hydrogène et l'addition d'un ion métallique trivalent (ou plus), à raison de 0,1% à 10% par rapport à la masse de boues sèches. Ce procédé comprend également l'ajustement du pH des boues lors du traitement à des valeurs comprises entre 4 et 9. Ce procédé de conditionnement, par ajout de produits inorganiques, ne comprend toutefois pas d'étape subséquente de floculation des boues par addition de polymères organiques avant leur déshydratation mécanique. Or, la déshydratation des boues biologiques sur des équipements tel que les filtres à bandes presseuses, requiert la formation de gros floes, laquelle nécessite l'ajout de polymères organiques. Les conditions de traitement proposées par Fujiyasu *et al.* comprenant l'ajout de concentrations

élevées de peroxyde d'hydrogène et d'un ion trivalent font en sorte de rendre très difficile l'utilisation subséquente d'un polymère organique.

[0017] Divers procédés électrochimiques ont également été proposés pour la décontamination et le conditionnement de boues biologiques (d'origine municipale et industrielle). Par exemple, Held et Chauhan (demande de brevet canadien No. 2.382.357) décrivent un procédé utilisant des décharges électriques (champs électriques pulsés) sous hautes tensions (15 000 à 100 000V). Ces brusques variations de champs électriques affectent les cellules bactériennes en provoquant des perturbations physiologiques, entraînant ainsi une libération du liquide inter et intra cellulaire, laquelle permet de réduire jusqu'à environ 50% (p/p) la masse de boues générées après déshydratation mécanique des boues. Les meilleurs rendements de ce système (champs électriques pulsés) sont obtenus en imposant de fortes énergies d'environ 100 J/mL ou encore 400 kWh/tbs pour des boues initiales ayant une concentration en solides totaux de 6%. La méthode de traitement des boues développée par Held et Chauhan, permet certes d'améliorer la siccité des boues, mais elle demeure inefficace pour l'élimination des odeurs nauséabondes. En effet, la seule imposition de champ électrique pulsé n'induit pas forcément une oxydation des composés malodorants (acide propionique, acide butyrique et sulfure d'hydrogène), lesquels composés sont couramment présents dans les boues d'épuration. En outre, cette technique requiert des équipements très sophistiqués pour l'imposition d'un champ électrique pulsé et donc très coûteux, ce qui pourrait limiter son domaine d'application et son développement industriel.

[0018] Ishigaki (brevet canadien No. 1.334.658) a mis au point une cellule électrolytique pour le traitement des boues d'épuration, laquelle est équipée d'une multitude d'électrodes planes placées en parallèle (anodes et cathodes) et connectées individuellement au générateur de courant capable de délivrer une tension variant entre 1.5 et 20 V. Les électrodes de fer (anode) et d'acier inoxydable (cathode) sont disposées de telle sorte qu'une anode soit immédiatement suivie d'une cathode avec une distance inter électrode relativement faible (15 mm). Ce procédé induit la transformation des substances particulières hydrophiles (organiques et inorganiques) en substances hydrophobes, laquelle permet

d'améliorer la filtrabilité des biosolides lors de la filtration mécanique. Une autre particularité de la méthode développée par Ishigaki, réside dans le fait qu'au sein de la cellule électrolytique, il existe une zone prédéfinie située au voisinage de chaque électrode et à l'intérieur de laquelle circule un courant (ou flux) ascendant de boues traitées (mince couche de boues traitées), permettant d'éliminer régulièrement l'accumulation de bulles de gaz (notamment O_2 et H_2) et de floccs situés entre les électrodes et à la surface de celles-ci. Ceci a pour avantage d'une part, d'éviter l'encombrement des électrodes et, d'autre part, d'améliorer les échanges boues-électrodes en vue de la transformation physique et efficace des boues par oxydation, réduction et neutralisation.

[0019] Les procédés développés par Held et Chauhan (demande de brevet canadien No 2,382,357) et Ishigaki (brevet canadien No. 1,334,658) ne font pas mention de la présence d'un oxydant bactéricide dont l'action pourrait se prolonger dans les boues à la sortie de l'électrolyseur (effet rémanent). L'effet rémanent de l'oxydant permettrait d'assurer une stabilité à plus ou moins long terme des boues traitées et déshydratées. En effet, dans la plupart des stations d'épuration, les boues déshydratées sont initialement empilées et stockées à la température ambiante avant toute disposition finale (enfouissement, épandage ou incinération). En particulier, dans la méthode développée par Held et Chauhan (demande de brevet canadien No. 2,382,357), même si les cellules bactériennes ont été physiologiquement perturbées par application d'un champ électrique pulsé, elles sont en revanche capables de se réactiver lorsqu'elles se retrouvent dans un environnement plus favorable (en l'absence notamment d'effet perturbateur : champ électrique). Une reviviscence bactérienne pourrait ainsi être observée lors de la période de stockage des boues et par conséquent, entraîner des nuisances olfactives induites par des composés organiques et inorganiques malodorants.

[0020] L'objet de la présente invention est de proposer une méthode originale de traitement électrochimique des boues d'épuration permettant d'éviter certains désavantages des procédés de l'art antérieur.

SOMMAIRE DE L'INVENTION

[0021] Le procédé de la présente invention vise à oxyder efficacement les germes pathogènes et réduire simultanément les odeurs nauséabondes des boues d'épuration tout en améliorant leur filtrabilité (hausse de la siccité).

5 **[0022]** Plus particulièrement, l'invention concerne un procédé de traitement des boues d'épuration comprenant des germes pathogènes et des molécules génératrices d'odeurs nauséabondes, caractérisé en ce qu'on soumet les boues, amenées à un pH inférieur à environ 5,0 et supérieur à environ 3,5 en présence ou
10 non d'un électrolyte support, dans un réacteur comprenant au moins une anode et une cathode et soumises à une réaction électrochimique de telle manière que les bactéries et les composés malodorants soient réduits, et en ce qu'on déshydrate plus efficacement les boues ainsi traitées. Une fois le traitement électrochimique réalisé, les boues peuvent être flocculées à l'aide d'un agent flocculant suivi d'une
15 déshydratation mécanique (ex. filtre à bandes presseuses, filtre presse à plateaux, centrifugeuse, presse à vis, etc.). Les boues déshydratées peuvent être stockées pendant une période relativement longue (2 à 3 semaines) avant toute disposition finale (enfouissement, épandage ou incinération). La présente invention permet avantageusement de générer *in situ* un oxydant bactéricide à longue durée de vie qui peut en outre assurer un effet rémanent, à savoir, qui permet d'éviter ou de
20 ralentir la recontamination éventuelle des boues traitées.

[0023] Le terme « boues d'épuration » réfère ici à des boues issues du traitement des eaux usées d'origines domestiques, municipales ou industrielles incluant les boues primaires, les boues secondaires (biologiques), les boues mixtes (mélange de boues primaires et secondaires), les boues domestiques, les boues municipales, les
25 boues de papetières, les boues de raffineries, les boues agro-alimentaires, les boues de fosses septiques, les boues de lagunes, les boues de désencrage et une combinaison de deux ou plusieurs de ces types de boues. Selon certains modes spécifiques de réalisation de la présente invention, les boues ont une concentration initiale en solides totaux variant optimalement entre environ 5 et environ 50 g/L. Pour des concentrations en solides totaux supérieures à 50 g/L, l'agitation
30

mécanique des boues devient très difficile. Pour des concentrations en solides totaux inférieures à 5 g/L, l'effluent ne contient généralement pas assez de solides pour obtenir une siccité de boues déshydratées acceptables.

5 **[0024]** Le terme « électrolyte support » réfère ici à un sel inorganique apte à augmenter la production *in situ* d'un oxydant et à améliorer la conductivité des boues. Sans limiter la définition précédente, et selon des modes de réalisation spécifiques de la présente invention, l'électrolyte support est un sel de chlorure ou un sel de sulfate. En particulier, les sels de chlorures peuvent être choisis parmi le NaCl, le CaCl₂, le MgCl₂, le NH₄Cl, le KCl et le FeCl₃, alors que les sels de sulfates
10 peuvent être choisis parmi le Na₂SO₄, (NH₄)₂SO₄, CaSO₄ et MgSO₄.

[0025] Le terme « stabilisation » réfère ici au traitement qui permet de ralentir la prolifération des pathogènes et des odeurs nauséabondes dans les boues suite à leur conditionnement et déshydratation.

15 **[0026]** Le terme « agent flocculant » réfère ici à tout agent apte à promouvoir l'agrégation des matières en suspension dans les boues. Sans limiter cette définition, des agents tels les polymères organiques peuvent être utilisés dans le cadre de la présente invention.

[0027] Le terme « conditionnement » réfère ici au traitement appliquée aux boues avant l'étape de floculation.

20 **[0028]** Lorsque l'on réfère dans la présente à un intervalle, le terme « environ » s'applique toujours aux deux extrémités de l'intervalle.

ACIDIFICATION

[0029] L'acidification des boues peut être effectuée par exemple avec de l'acide sulfurique, chlorhydrique, nitrique, phosphorique, un acide usé ou une combinaison

de deux ou plus de ces acides. On utilise de préférence l'acide sulfurique à cause de son coût significativement moins élevé. Dans le cas du procédé opéré en deux phases (acidification et ajout d'ions successifs), l'acidification initiale des boues, avant l'ajout d'ions chlorures s'effectue habituellement à un pH se situant entre
 5 environ 3,5 et environ 5,0. Une acidification moins importante des boues ($\text{pH} > 5,0$) nuit à la production *in situ* de HClO ou de $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$ et cause une perte d'efficacité au niveau de la destruction des indicateurs de pathogènes (coliformes fécaux et totaux) et de la transformation des particules hydrophiles en particules hydrophobes. D'un
 10 autre côté, une acidification plus prononcée des boues ($\text{pH} < 3,5$) cause une corrosion prématurée des équipements de déshydratation et hausse considérablement le coût en produits chimiques. Aussi, une acidification prononcée des boues est favorable à la formation de composés organochlorés.

AGENT OXYDANT

[0030] L'utilisation d'une source d'ions chlorure ou sulfate permet d'une part,
 15 d'améliorer la conductivité (électrolyte support) des boues et, d'autre part, d'enrichir les boues en ions chlorures nécessaires à la production de l'oxydant (HClO) ou ($\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$). Des ions chlorures ou sulfates peuvent être ajoutés aux boues si les boues utilisées n'en contiennent pas suffisamment pour générer suffisamment d'agent oxydant.

20 Réactions d'oxydation

[0031] L'oxydation anodique des ions chlorures en chlore gazeux est suivie de sa dismutation en solution et conduit à la formation d'acide hypochloreux (HClO), laquelle réaction est favorable en milieu légèrement acide ($3,5 < \text{pH} < 5,0$). L'hydrolyse du chlore se fait très rapidement, en quelques secondes, si bien que les
 25 boues ne sont pas traitées avec le Cl_2 mais plutôt avec HClO .

[0032] On peut schématiser les réactions selon les équations suivantes :

- à l'anode :



- en solution :



5 **[0033]** Il est également possible d'envisager, une réaction de dissociation de l'acide hypochloreux telle que :



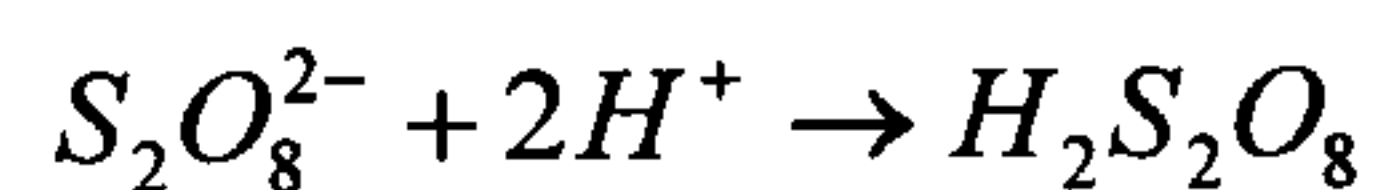
10 **[0034]** La dernière réaction conduit à la formation de l'ion hypochlorite (ClO^{-}) qui est également un oxydant bactéricide mais moins efficace que l'acide hypochloreux ($HClO$). On a pu remarquer que, d'une façon générale, les oxydants moléculaires sont plus bactéricides que les oxydants ioniques. En effet, les composés moléculaires traversent très généralement beaucoup plus facilement les membranes bactériennes que les ions.

[0035] L'oxydation anodique des ions sulfates conduit à la formation d'acide persulfurique ($H_2S_2O_8$) suivant les réactions :

15 - à l'anode :

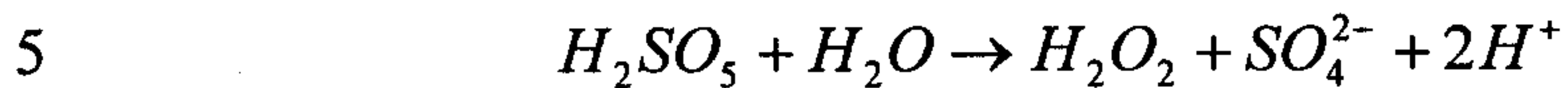
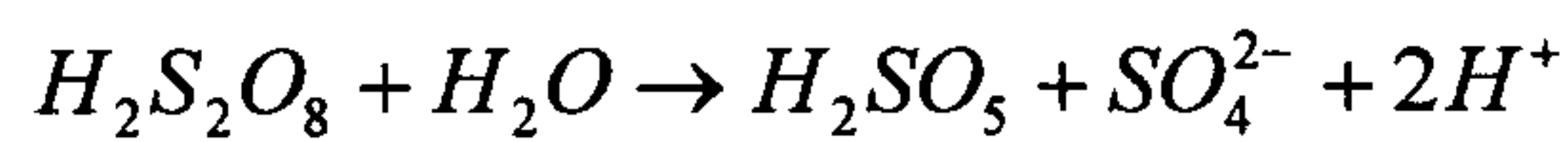
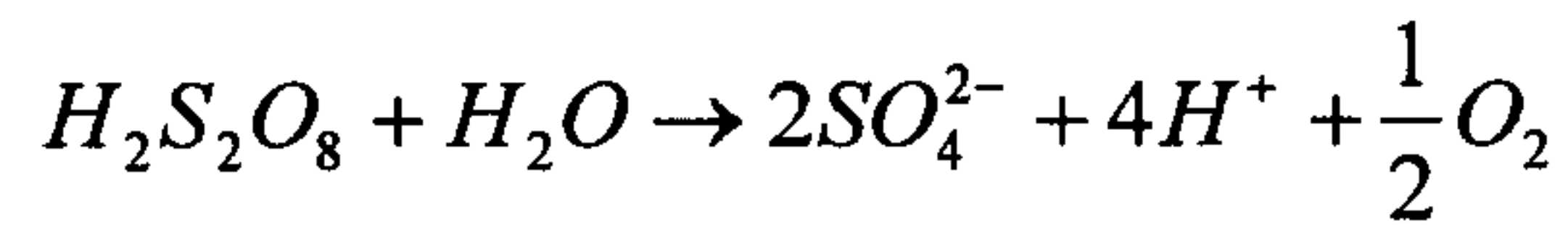


- en solution :



20 **[0036]** L'oxydation anodique des ions sulfates peut être suivie de l'hydrolyse de l'acide persulfurique formé et conduit à la formation d'oxygène moléculaire (O_2), ou d'acide mono-persulfurique (H_2SO_5) ou encore de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), lesquels réactifs sont notamment formés à des températures supérieures à 60°C.

On peut schématiser les réactions de décomposition de l'acide persulfurique selon les équations suivantes :



[0037] Si l'on compare le pouvoir bactéricide des oxydants ($H_2S_2O_8$, O_2 , H_2SO_5 et H_2O_2) formés lors de l'électrolyse des boues contenant des ions sulfates, l'acide persulfurique est l'oxydant le plus efficace, viennent ensuite l'acide monopersulfurique et le peroxyde d'hydrogène, lesquels sont plus oxydants que l'oxygène moléculaire.

[0038] Lorsque le chlorure de sodium ou le sulfate de sodium est utilisé, il l'est à une concentration optimalement plus petite qu'environ 10 g/L de boues puisqu'au delà de cette concentration, les siccités obtenues sont moins bonnes. En effet, en présence d'une concentration importante de sels de chlorures ou de sulfates, la concentration résiduelle d'agent oxydant généré est importante, lequel peut réagir avec l'agent flocculant empêchant ainsi une floculation efficace des boues.

PEROXYDE

[0039] Lors de l'électrolyse des boues en présence d'ions sulfate, un ajout de peroxyde d'hydrogène à des concentrations variant entre 0,2 et 0,3 g H_2O_2 /L peut être désirable pour accélérer la cinétique de désinfection et de désodorisation des boues.

ÉLECTROLYSE

[0040] Le traitement électrochimique selon la présente invention augmente la siccité des boues, détruit les pathogènes et diminue les odeurs nauséabondes.

Augmentation de la siccité des boues

[0041] L'augmentation de la siccité est due à trois facteurs principaux :

- 5 **[0042]** Une action induite par le champ électrique : la présence du champ électrique est favorable à la mise en mouvement des particules colloïdales, contribuant ainsi à l'agrégation ou à la coagulation de celles-ci. Aussi, la brusque variation du champ électrique par un passage rapide de l'anode vers la cathode perturbe de façon physiologique les cellules bactérienne, suivie d'une libération du liquide inter et intra
10 cellulaire favorable à une augmentation de la siccité des boues.

- [0043]** Une oxydation directe à l'anode et indirecte en solution (par génération de HClO ou H₂S₂O₈) des composés organiques solubles liées aux matières colloïdales et empêchant la déstabilisation de ces dernières. L'action directe et indirecte sur les matières particulaire hydrophile est favorable à une meilleure agrégation des
15 particules colloïdales et une déshydratation des boues traitées.

[0044] Une oxydation directe à l'anode et indirecte (par génération de HClO ou H₂S₂O₈) des cellules bactériennes entraîne une libération du liquide inter et intra cellulaire. La libération de ce liquide est favorable à la réduction de la masse des boues générée, donc à une meilleure siccité après déshydratation des boues.

20 Effet sur les pathogènes

[0045] Les normes relatives à la concentration maximale de pathogènes que les boues destinées à l'épandage varient d'une juridiction à une autre. Ainsi, les boues destinées à l'épandage doivent contenir un maximum de 1000 (NPP) coliformes fécaux (*Escherichia coli*) par gramme de matières sèches (Critère P1 –

Gouvernement du Québec, 2004). La réduction de pathogène a aussi comme avantage de diminuer les odeurs nauséabondes durant le stockage.

[0046] L'électrolyse selon la présente invention agit à trois niveaux sur les cellules bactériennes :

5 **[0047]** a) une action électrochimique directe par oxydation à l'anode. Cette oxydation désactive les bactéries (perturbation physiologique) en oxydant les inclusions protéiques de la membrane cytoplasmique constituées en majorité de phospholipides et protégeant la bactérie;

10 **[0048]** b) une action induite par le champ électrique. La brusque variation de champ électrique par un passage rapide de l'anode vers la cathode perturbe également de façon physiologique les cellules bactériennes;

15 **[0049]** c) une action électrochimique complémentaire indirecte par génération *in situ* de l'acide hypochloreux ou de l'acide persulfurique. L'acide hypochloreux ou persulfurique formé permet de détruire définitivement les bactéries préalablement désactivées à l'anode et, de prolonger ainsi l'effet microbicide à la sortie de l'électrolyseur, notamment lors de l'entreposage des boues déshydratées.

Diminution des odeurs

20 **[0050]** Les composés malodorants (l'acide propionique, l'acide butyrique, le sulfure d'hydrogène, etc.) sont directement oxydés à l'anode et indirectement oxydés en solution par l'acide hypochloreux ou par l'acide persulfurique.

[0051] Lors de l'électrolyse, il est désirable, pour un fonctionnement optimal, de générer des concentrations d'acide hypochloreux de façon telle à obtenir une concentration résiduelle de HClO variant entre environ 0,02 et 0,7 g/L dans les boues en vue d'obtenir un effet optimal de désinfection des boues (ex. enlèvement

des coliformes fécaux et totaux), une élimination efficace des odeurs, ainsi qu'une amélioration significative de la déshydratabilité des boues.

5 [0052] Une électrolyse des boues effectuée de façon telle à obtenir une concentration résiduelle de HClO supérieure à 0,7 g/L entraîne des coûts d'opération importants et engendre une grande hydrolyse de la matière organique des boues, ce qui résulte généralement en une augmentation importante et non-désirée de la concentration de matière organique en solution dans les filtrats ou surnageants lors de la déshydratation des boues. Aussi, une forte concentration de HClO est susceptible d'entraîner la formation des composés organochlorés dans les
10 boues traitées.

[0053] Des essais préliminaires peuvent être effectués afin de vérifier la concentration résiduelle d'oxydant généré. La lecture de la conductivité peut également donner des indices concernant l'ajout ou non d'électrolyte support.

TEMPÉRATURE DE L'ÉLECTROLYSE

15 [0054] La réaction électrochimique est effectuée en imposant une intensité de courant et une conductivité électrique (généralement située entre 0,8 et 10,2 mS/cm²) de façon à obtenir une température des boues se situant entre 10 et 60°C, de préférence entre environ 20 et environ 40°C et ce, sans apport extérieur de chaleur, la réaction électrochimique étant elle-même exothermique. Comme cela a
20 été mentionné dans la description de l'art antérieur (Everett, Wat. Res., 1974, 8, 899-906), une augmentation de la température conduit à une transformation de la structure physique des boues, laquelle induit une diminution de l'hydrophilie particulière, ce qui est favorable à une meilleure déshydratation des boues. Aussi, une augmentation de la température a pour effet d'augmenter les vitesses de
25 réaction chimique et biochimique. Le seuil de 60°C permet de minimiser les réactions de décomposition de l'acide persulfurique conduisant à la formation d'espèces transitoires moins réactives. En fait, lors de l'électrolyse, une augmentation spontanée et progressive de la température est observée. Cette

augmentation de la température est d'autant plus importante que l'intensité de courant augmente alors que la conductivité électrique diminue. Il est donc possible d'augmenter la température des boues en augmentant l'intensité et de la faire diminuer en augmentant la quantité d'ions chlorures ou sulfates.

5 INTENSITÉ ET DURÉE DE L'ÉLECTROLYSE

[0055] Le courant appliqué est en partie fonction de la durée de l'électrolyse. Ces paramètres doivent être adaptés en fonction de la nature des boues à traiter. On notera néanmoins qu'une électrolyse de courte durée avec des courants faibles permet d'obtenir un meilleur rendement faradique pour la production *in situ* de l'acide hypochloreux, mais au détriment du rendement chimique (i.e. production d'agent oxydant par rapport à la quantité d'ions chlorures ou sulfate dans les boues à traiter). Dans une application industrielle, il convient d'adapter les paramètres de ce procédé en fonction du degré de contamination des boues (germes pathogènes, composés malodorants) et de la concentration en solides totaux. Lors du traitement, l'intensité du courant est généralement comprise entre 2 et 15A, ce qui correspond à une densité de courant anodique variant entre 1,2 et 8,8 A/dm². La durée de la réaction électrochimique se situe généralement entre environ 10 et 120 minutes.

RÉACTEUR OU CELLULE ÉLECTROCHIMIQUE

[0056] Les termes « réacteur électrochimique » et « cellule électrochimique » sont utilisés ici indistinctement. La cellule électrolytique est non compartimentée (i.e. elle ne comporte pas de membrane ou de cloison séparant les électrodes (anodes et cathodes) est constituée d'au moins une anode et une cathode insolubles, le nombre d'électrode variant selon le volume ou la capacité du réacteur utilisé. Dans cette cellule, l'oxydation des ions chlorures ou des ions sulfates en acide hypochloreux (HClO) ou en acide persulfurique (H₂S₂O₈) et l'oxydation des composés organiques s'effectuent préférentiellement à l'oxydation de l'eau en oxygène. Sans limiter la généralité de ce qui précède, la cellule comprend une anode à électrodes insolubles (électrodes catalytique) dite à forte surtension en oxygène.

[0057] Selon une variante du procédé, l'anode peut se présenter sous la forme de cylindre en métal déployé de titane recouvert d'oxyde de ruthénium ou d'oxyde d'iridium (Ti/RuO_2 ou Ti/IrO_2) et la cathode peut se présenter sous la forme de cylindre en métal déployé, par exemple de titane (Ti). Ces électrodes (anode et cathode) sont de mailles appropriées de sorte à éviter l'obstruction de celles-ci lors du traitement. Par exemple, l'anode et la cathode peuvent avoir des caractéristiques de mailles suivantes : longueur LD = 12 mm; largeur AU = 6 mm et largeur de la fente N= 4 mm. Ces paramètres peuvent être déterminés avec précision par la personne du métier en fonction des caractéristiques des boues à traiter. La Figure 1 présente une vue schématique de la structure des mailles des électrodes pouvant être utilisées.

[0058] De telles électrodes en métal déployé offrent une bonne tenue mécanique, une grande surface d'échange par rapport aux électrodes pleines et constituent, de fait, de bons promoteurs de turbulence permettant ainsi d'une part, d'éviter l'adsorption de bulles de gaz sur les électrodes et d'autres part, d'accroître le coefficient de transfert électrode-boue.

[0059] Selon des modes de réalisation préférés, les électrodes sont sous forme de métal déployé. Cette configuration d'électrodes procure une bonne tenue mécanique, une grande surface d'échange par rapport aux électrodes pleines et constitue un bon promoteur de turbulence permettant d'accroître le coefficient de transfert à l'interface électrode-boue. Cette structure d'électrode est avantageuse par rapport à celle des électrodes pleines, laquelle structure ne permet d'induire un effet turbulent au voisinage des électrodes, ce qui pourrait entraîner un encombrement des électrodes.

[0060] À titre d'illustration, la Figure 2 jointe à la présente description décrit une vue schématique d'un réacteur électrochimique permettant de réaliser le procédé de traitement selon un mode de réalisation spécifique de l'invention. Selon cette Figure, le réacteur (1) cylindrique (2), est muni d'un agitateur mécanique (3) actionné par un moteur (4). L'anode (5) est un cylindre en métal déployé disposé coaxialement

autour de l'agitateur (3) et la cathode (6) est placée coaxialement à l'agitateur autour de celui-ci de façon à ce que la surface de la cathode soit de grande surface par rapport à celle de l'anode. L'anode et la cathode sont reliées à un générateur de courant continu (7). L'agitateur est une tige métallique munie d'une hélice et
 5 entièrement recouverte de plastique en PVC ou en téflon, de manière à éviter une polarisation de la tige et une perturbation de la réaction électrochimique. La distance inter-électrode se situe entre environ 1 et environ 5 cm.

[0061] Selon une autre variante du procédé (voir Figure 3), le réacteur est sous forme cylindrique (1), constitué d'électrodes volumiques. L'anode (2) peut se
 10 présenter sous forme circulaire en métal déposé de titane recouvert d'oxyde de ruthénium ou d'oxyde d'iridium (Ti/RuO_2 ou Ti/IrO_2) et la cathode (3) peut se présenter sous forme circulaire en métal déposé, par exemple de titane (Ti) ou d'acier inoxydable (Inox). La cellule électrolytique est constituée d'une série d'électrodes (anodes et cathodes) placées en position stable et horizontale et
 15 connectées individuellement au générateur de courant. Les électrodes sont disposées (en parallèle) de telle sorte qu'une anode soit immédiatement suivie d'une cathode avec une distance inter électrode pouvant varier entre environ 1 et environ 5 cm. En mode continu, la cellule est alimentée du bas (4) vers le haut (8) à l'aide d'une pompe (5) et les boues traversent successivement l'anode et la cathode. Des
 20 plaques (10) en PVC perforées de trous (distributeurs), placées à l'entrée et à la sortie de l'électrolyseur permettent d'assurer une répartition des boues sur toute la surface des électrodes. Une pompe (7) à fort débit assure la recirculation d'une partie des boues (ayant traversé la cellule) afin d'assurer une agitation suffisante à l'intérieur de la cellule électrolytique. Un système d'évent (9) fixé sur un entonnoir
 25 (11) permet l'évacuation des gaz. Les boues brutes non traitées sont stockées dans un réservoir (6). Les boues traitées sont acheminées vers le point d'injection du polymère (12).

[0062] Selon une autre variante du procédé, le réacteur peut être sous forme parallélépipédique, constitué d'électrodes volumiques. L'anode peut se présenter
 30 sous forme rectangulaire en métal déposé de titane recouvert d'oxyde de ruthénium ou d'oxyde d'iridium (Ti/RuO_2 ou Ti/IrO_2) et la cathode peut se présenter sous forme

rectangulaire en métal déployé, par exemple de titane (Ti) ou d'acier inoxydable (Inox). La cellule électrolytique est ainsi constituée d'un ensemble d'électrodes placées en parallèle (anodes et cathodes) et connectées individuellement au générateur de courant. Les électrodes sont disposées de telle sorte qu'une anode
 5 soit immédiatement suivie d'une cathode avec une distance inter électrode pouvant varier entre environ 1 et 5 cm. La cellule électrolytique est également munie d'un système de recirculation des boues (à fort débit) afin d'assurer une agitation suffisante à l'intérieur celle-ci.

FLOCULATION

- 10 **[0063]** Les boues électrolysées peuvent ensuite être floculées par addition d'un agent floculant. La quantité optimale de floculant peut être déterminée par l'observation de la résistance des floes et de l'aspect du liquide inter-floes par exemple. Sans limiter la généralité de ce qui précède, l'agent floculant utilisé pour la floculation des boues traitées pourra être l'un des polymères organiques usuels
 15 employés pour la floculation des boues dans les stations d'épuration des eaux usées. À titre d'exemples, on peut citer les polymères cationiques ou anioniques vendus sous les marques de commerce Percol™ et Zietag™ par la Société Ciba Spécialités Chimiques Canada Inc., et LPM™ par la Société LPM Technologies Inc.

NEUTRALISATION

- 20 **[0064]** Les boues peuvent aussi être complètement ($\text{pH} \geq 7$) ou partiellement ($\text{pH} < 7$) neutralisées par addition d'un agent alcalin en fonction des normes gouvernementales visant à éviter par exemple l'acidification des sols lors de l'épandage des boues. Cette neutralisation complète ou partielle peut être effectuée avant ou immédiatement après la phase de floculation des boues, ou encore, après
 25 une période de stockage des boues déshydratées. L'agent alcalin employé pour neutraliser les boues peut être par exemple de la chaux, de l'hydroxyde de sodium, du carbonate de calcium, de l'hydroxyde d'ammonium, de l'hydroxyde de magnésium, de la dolomie ou une base usée industrielle.

[0065] Il est également possible de mélanger les boues ayant subi le traitement acide et oxydant avec des boues non-traitées, puis de flocculer les boues mélangées par addition d'un agent flocculant et, finalement, de déshydrater celles-ci avec un équipement usuel de déshydratation mécanique. Cette façon de faire est particulièrement performante dans le cas du traitement acide et oxydant de boues biologiques (boues secondaires), lesquelles sont ensuite mélangées avec des boues primaires non-traitées.

[0066] Le procédé selon la présente invention peut avantageusement être intégré dans les chaînes de traitement des boues en opération dans les usines d'épuration sans devoir apporter de correctifs aux installations de traitement et de déshydratation des boues déjà en place. De plus, l'aspect non polluant de l'électricité, la facilité d'automatisation qu'elle apporte, ainsi que la réduction du volume d'équipement sont des paramètres qui caractérisent la présente invention, comparativement à l'art antérieur utilisant des digesteurs ou des réacteurs de dimensions importantes.

[0067] Plus particulièrement, selon une réalisation spécifique de la présente invention, le procédé concerne un procédé de conditionnement de boues d'épuration caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes : acidification des boues d'épuration de manière à atteindre un pH entre environ 3,5 et environ 5 pour générer des boues acidifiées; électrolyse des boues acidifiées dans une cellule électrolytique comprenant des électrodes dont au moins une anode et au moins une cathode, la cellule étant capable de générer *in situ* un oxydant bactéricide choisi parmi l'acide hypochloreux et l'acide persulfurique, pour générer des boues électrolysées, les boues électrolysées ayant une déshydratabilité et une stabilité plus élevée que les boues d'épuration. Selon une réalisation plus spécifique, la cellule électrolytique comprend à l'anode des électrodes insolubles à forte surtension d'oxygène.

[0068] Selon une autre réalisation spécifique, des ions chlorure sont ajoutés aux boues avant l'électrolyse. Selon une autre réalisation spécifique, les ions chlorures

sont ajoutés à une concentration variant entre environ 0,6 et environ 6,0 g Cl^-/L . Selon une autre réalisation spécifique, des ions chlorures sont ajoutés aux boues et où les ions sont choisis parmi le groupe composé du NaCl , du CaCl_2 , du MgCl_2 , du NH_4Cl , du KCl et du FeCl_3 . Selon une autre réalisation spécifique, les ions chlorures sont ajoutés sous forme de NaCl à une concentration d'au plus 10 g NaCl/L . Selon une autre réalisation spécifique, les ions chlorures sont ajoutés sous forme de NaCl à une concentration d'au plus 8 g NaCl/L .

[0069] Selon une autre réalisation spécifique, des ions sulfates et du peroxyde sont ajoutés aux boues avant l'électrolyse. Selon une autre réalisation spécifique, les ions sulfates sont ajoutés à une concentration variant entre environ 1,7 et environ 6,7 g $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$. Selon une autre réalisation spécifique, les ions sulfates sont ajoutés aux boues et où les ions sont choisis parmi le groupe composé du Na_2SO_4 , du $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, du CaSO_4 et du MgSO_4 . Selon une autre réalisation spécifique, les ions sulfates sont ajoutés sous forme de Na_2SO_4 à une concentration variant entre environ 2,5 et environ 10 g $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{L}$ et le peroxyde à une concentration variant entre environ 0,2 et environ 0,3 g $\text{H}_2\text{O}_2/\text{L}$.

[0070] Selon une autre réalisation spécifique, la cellule électrolytique fonctionne à une intensité variant entre environ 2 et environ 15A, ce qui correspond à une densité de courant anodique variant entre environ 1,2 et environ 8,8 A/dm^2 . Selon une autre réalisation spécifique, la cellule électrolytique fonctionne à une intensité variant entre environ 5 et environ 10A, ce qui correspond à une densité de courant anodique variant entre 2,9 et environ 5,9 A/dm^2 . Selon une autre réalisation spécifique, l'électrolyse est appliquée pour une durée variant entre environ 10 et environ 120 minutes. Selon une autre réalisation spécifique, l'électrolyse est appliquée pour une durée variant entre environ 30 et 60 minutes.

[0071] Selon une autre réalisation spécifique, la cellule électrolytique est de type cylindrique unique comprenant des électrodes concentriques en métal et disposées de telle sorte qu'une anode soit immédiatement suivie d'une cathode. Selon une autre réalisation spécifique, la cellule électrolytique est de type cylindrique unique

comprenant une série d'électrodes circulaires en métal et, placées en position stable et horizontale de telle manière qu'une anode soit immédiatement suivie d'une cathode. Elle peut être aussi de forme parallélépipédique comprenant une série d'électrodes planes et rectangulaires disposées de telle sorte qu'une anode soit
5 immédiatement suivie d'une cathode.

[0072] Selon une autre réalisation spécifique, au moins une des anodes de la cellule électrolytique est fabriquée dans un matériau choisi parmi le titane recouvert d'oxyde de ruthénium (Ti/RuO₂), d'oxyde d'iridium (Ti/IrO₂), d'oxyde d'étain (Ti/SnO₂) de platine (Ti/Pt), et une combinaison de ces matériaux, et la au moins une cathode
10 est fabriquée dans un matériau choisi parmi le titane (Ti), l'acier inoxydable (Inox) et une combinaison de ces matériaux. Selon une autre réalisation spécifique, les électrodes sont en métal déployé ou en plaques pleines. Selon une autre réalisation spécifique, les électrodes sont espacées de manière à créer une distance inter-électrode comprise entre environ 1 et environ 5 cm.

[0073] Selon une autre variante de la présente invention, l'acidification des boues est effectuée par ajout d'un acide inorganique choisi parmi le groupe composé de l'acide sulfurique, l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique, l'acide phosphorique, un acide usé industriel et une combinaison d'au moins deux de ces acides. Selon un
15 autre mode spécifique de réalisation de la présente invention, l'électrolyse est conduite à une température comprise entre environ 10 et environ 60°C sans apport extérieur de chaleur. Selon un autre mode spécifique de réalisation de la présente invention, l'électrolyse est conduite à une température comprise entre environ 20 et environ 40°C sans apport extérieur de chaleur. Selon un autre mode spécifique de
20 réalisation de la présente invention, les boues électrolysées sont mélangées avec des boues d'épuration. Selon un autre mode spécifique de réalisation de la présente invention, les boues d'épuration ont une concentration initiale en solides totaux variant entre environ 5 et environ 50 g/L. Selon un autre mode spécifique de réalisation de la présente invention, les boues électrolysées sont floculées par l'addition d'un agent floculant pour générer des boues floculées. Selon un autre
25 mode spécifique de réalisation de la présente invention, les boues floculées sont
30

déshydratées. Selon un autre mode spécifique de réalisation de la présente invention, les boues électrolysées sont complètement ($\text{pH} \geq 7$) ou partiellement ($\text{pH} < 7$) neutralisées par addition d'un agent alcalin. Selon un autre mode spécifique de réalisation de la présente invention, les boues déshydratées sont neutralisées par addition d'un agent alcalin immédiatement après la déshydratation. Selon un autre mode spécifique de réalisation de la présente invention, les boues déshydratées sont neutralisées par addition d'un agent alcalin après une période de stockage des boues. Selon un autre mode spécifique de réalisation de la présente invention, l'agent alcalin employé pour neutraliser les boues est choisi parmi le groupe composé de la chaux, l'hydroxyde de sodium, le carbonate de calcium, l'hydroxyde d'ammonium, l'hydroxyde de magnésium, la dolomie, une base usée industrielle et une combinaison de deux ou plus de ces agents alcalins.

[0074] Selon une autre réalisation spécifique, la présente invention a pour objet un procédé de conditionnement de boues d'épuration caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes : acidification des boues d'épuration de manière à atteindre un pH entre environ 3,5 et environ 5 pour générer des boues acidifiées; ajout d'ions choisis parmi le groupe composés des ions chlorures et des ions sulfates; et électrolyse des boues acidifiées dans une cellule électrolytique comprenant des électrodes dont au moins une anode et au moins une cathode, la cellule étant capable de générer *in situ* un oxydant bactéricide choisi parmi l'acide hypochloreux et l'acide persulfurique, pour générer des boues électrolysées, les boues électrolysées ayant une déshydratabilité et une stabilité plus élevée que les boues d'épuration. Selon d'autres modes spécifiques de réalisation de la présente invention, les étapes d'acidification et d'ajout d'ions sont réalisées successivement ou simultanément. Le procédé peut aussi être opéré en mode choisi parmi le groupe composés des modes cuinée, semi-continu et continu.

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE L'INVENTION

[0075] Le procédé de l'invention permet d'améliorer significativement les caractéristiques de déshydratabilité des boues en haussant la siccité des boues lors de leur déshydratation mécanique.

[0076] De plus, cette technologie est plus performante que les technologies usuelles de digestion aérobie ou anaérobie mésophiles pour les destructions des indicateurs bactériens de pathogènes (> 5 unités logarithmiques de réduction des coliformes fécaux et totaux ou élimination de plus de 99,9%) et permet donc une stabilisation efficace des boues. Finalement, l'application de cette technologie n'affecte pas de manière significative le contenu en éléments fertilisants des boues déshydratées et permet de réduire considérablement la génération d'odeurs des boues.

[0077] La génération *in situ* d'un oxydant pour le traitement des boues, donne également un avantage pratique à la présente invention, car elle permet d'une part de s'affranchir des difficultés liées au transport et la manutention du produit traitant en augmentant la siccité des boues et d'autre part, elle permet de stocker les boues traitées et déshydratées pendant une longue période et ce, sans émanation d'odeurs désagréables.

[0078] L'invention a été décrite de façon générale, et est maintenant illustrée par des exemples non limitatifs de réalisation donnés à titre indicatif.

EXEMPLE 1

Traitement de boues d'épuration municipales

[0079] Le procédé selon l'invention a été testé sur des boues digérées issues du traitement d'eaux usées municipales. Ces boues sont générées dans des réacteurs biologiques séquentiels (RBS) et sont recueillies à la fin de la période de stockage aérobie. La concentration initiale en solides totaux de ces boues était de 21,6 g/L. Le réacteur électrochimique utilisé pour les essais est schématisé à la Figure 2. La cellule électrolytique cylindrique, en plexiglas, est constituée de deux électrodes concentriques et munie d'un agitateur à hélices en Téflon™. La cathode est un cylindre en déployé de titane de marque Electrolytica™, de rayon 9 cm, de hauteur 28 cm, d'aire de maille 9,08 dm² et d'aire de surface vide entre les mailles 7,87 dm². L'anode placée au centre, entourant la tige de l'agitateur, est un cylindre en déployé de titane de marque Electrolytica™, de rayon 5 cm, de hauteur 28 cm, d'aire de maille 5,04 dm² et d'aire de surface vide entre les mailles 4,37 dm². Le volume traité

était de 5,0 L et seulement un tiers de la surface active de l'anode ($1,7 \text{ dm}^2$) et de la cathode ($3,0 \text{ dm}^2$) était immergé dans l'effluent à traiter.

[0080] Une série d'expériences a été effectuée à intensité de courant et température variables en mode batch. L'acidification préalable des boues a été effectuée par addition d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4 , 10 N), ou d'acide chlorhydrique concentré (HCl, 3 N). Les boues ont été soumises à une électrolyse de 30 min, période au cours de laquelle les boues ont été continuellement agitées. Une fois traitées, les boues ont été floculées par addition d'un polymère organique cationique vendu sous la marque de commerce Zetag 7689™ et les boues ont été filtrées sous vide pendant une période de 10 minutes et sous une pression de 750 mm Hg. L'unité de filtration SV1 utilisée lors des essais, comprenait une pompe vacuum, un buchner™ et des membranes Whatman 934AH™ (marque de commerce) ayant une porosité de $1,5 \mu\text{m}$. La siccité des boues déshydratées a été par la suite mesurée après séchage de celles-ci à 105°C pendant une période de 24 h. Les filtrats ont été conservés pour des analyses chimiques (demande chimique en oxygène (DCO), azote ammoniacal (N-NH_4) et nitrates/nitrites ($\text{N-(NO}_3/\text{NO}_2)$)).

[0081] Les conditions expérimentales imposées et les résultats obtenus sont indiqués au Tableau 1. Les données fournies à la colonne CONT correspondent aux résultats de l'essai contrôle (sans traitement) effectué en triplicata et servant comme base de comparaison avec les boues traitées. Lors de l'essai A, aucun réactif n'a été ajouté aux boues avant électrolyse, contrairement aux essais B, C et D au cours desquels une acidification préalable a été effectuée suivie ou non de l'ajout de chlorure de sodium. Les consommations de réactifs chimiques sont données en kilogramme de produits à 100% (pur) par tonne de boues sèches (tbs). L'énergie consommée lors de l'électrolyse est exprimée en kilowattheure par tonne de boues sèches (kWh/tbs).

[0082] Les pH finaux mesurés lors des essais se situent entre 4,53 et 6,81 alors que les valeurs de POR finales sont comprises entre -181 et 129 mV. Lors des essais, une consommation d'acide sulfurique de 14,6 ou 27,6 kg H_2SO_4 /tbs a été employée.

En ce qui concerne l'acide chlorhydrique, un apport de 31,0 kg/HCl a été testé. D'autre part, un ajout de 92,5 kg NaCl/tbs (4,3 g NaCl/L) a été effectué lors des essais.

5 [0083] Le dosage optimal de polymère pour la floculation des boues non-traitées se situait approximativement à 1,9 kg/tbs. En comparaison, des concentrations de 1,4 et 2,3 kg polymère/tbs ont été requises pour la floculation des boues traitées. Aussi, une consommation énergétique variant entre 252 et 1480 kWh/tbs a été requise pour la stabilisation des boues.

10 [0084] Une valeur moyenne de siccité de 12,5% (p/p) a été mesurée lors de l'essai contrôle (CONT) de déshydratation des boues non-traitées effectué en triplicata. L'application du procédé (essais B, C et D) a permis d'accroître la siccité à des valeurs comprises entre 14,4 et 23,0%, soit des gains de 1,9 à 10,5 points de siccité. Cette hausse de la siccité des boues déshydratées permet de réduire la
15 quantité de boues générées, soit entre 13,3 et 45,8% (p/p). En revanche, une perte de siccité de 1,2 points a été enregistrée suite à l'application du procédé effectuée sans acidification initiale des boues, ni ajout préalable de chlorure de sodium. Il est important de noter que lors des essais B, C et D, l'ajout de réactifs NaCl ou HCl a permis d'enrichir les boues en ion chlorure, lequel est favorable à la production *in situ* d'acide hypochloreux utile à la désinfection et à désodorisation des boues et
20 utile ainsi qu'à la déshydratabilité des boues.

TABEAU 1 ESSAIS DE PRÉ-CONDITIONNEMENT ET DE STABILISATION ÉLECTROCHIMIQUE DE BOUES DIGÉRÉES AÉROBIES ISSUES D'UNE STATION D'ÉPURATION D'EAUX USÉES MUNICIPALES

Paramètres	Essais				
	CONT	A	B	C	D
pH final	6,81	6,81	4,90	4,97	4,53
POR final (mV)	-200	-181	63	81	129
Temperature(°C)	25,0	31,0	23,0	29,9	41,2
Intensité (A)	0,0	5,0	5,0	10,0	10,0
Conductivité (mS/cm ²)	1,28	1,10	5,63	5,37	3,72
Durée du traitement (min)	-	30	30	30	30
Unité de filtration	SV1	SV1	SV1	SV1	SV1
Consommation (kg/tbs)					
H ₂ SO ₄	0,0	0,0	14,6	27,4	0,0
HCl	0,0	0,0	0,0	0,0	31,0
NaCl	0,0	0,0	92,5	92,5	0,0
Polymère	1,9	2,3	1,4	2,3	1,4
Énergie (kW/tbs)	0,0	807	257	842	1 480
Valeur fertilisante					
DCO filtrat (mg/L)	489	417	831	1 280	1 190
N-NH ₄ filtrat (mg/L)	67,7	61,6	68,5	80,7	85,7
P-PO ₄ filtrat (mg/L)	11,7	6,23	12,8	11,0	14,6
NO ₂ /NO ₃ filtrat (mg/L)	0,19	0,40	0,39	0,15	0,24
Déshydratation					
Siccité finale (% p/p)	12,5	11,3	15,7	14,4	23,0
Réduction de la masse (% p/p)	-	-10,2	20,2	13,3	45,8

SV1 : unité de filtration sous vide ayant une surface filtrante de 78,5 cm²

[0085] La production *in situ* de HClO est également utile à l'oxydation de composés organiques dissous fixés sur les matières colloïdales. L'action de HClO sur ces matières solubles permet une meilleure agrégation des matières colloïdales et une déshydratation plus efficace des boues traitées. À cela, s'ajoute une augmentation de la température lors de l'électrolyse, laquelle induit une transformation physique des boues, favorable à une meilleure déshydratation des boues. En particulier, la meilleur siccité des boues déshydratées (23,0% p/p) enregistrée lors de l'essai D est en partie attribuée à une augmentation appréciable de la température (41,2°C).

[0086] La conservation des éléments fertilisants des boues suite à l'application du procédé a été évaluée par la mesure de la concentration de DCO, de P-PO₄, de N-NH₄ et de N-(NO₃/NO₂) dans les filtrats de déshydratation des boues. Les valeurs mesurées montrent que l'application du procédé n'induit pas une perte appréciable de la valeur fertilisante des boues, notamment en ce qui concerne les éléments P-PO₄, N-NH₄ et N-(NO₃/NO₂). En revanche, l'application du procédé entraîne une hausse de la concentration initiale de la DCO (489 mg/L) à des valeurs comprises entre 831 et 1280 mg/L. Cette augmentation de la DCO dans le filtrat de déshydratation des boues traitées est principalement attribuée à l'action de HClO sur les molécules organiques initialement liées à la fraction solide des boues, le temps de traitement n'étant pas suffisamment long pour obtenir une oxydation complète de ces composés organiques solubilisés (formation de H₂O et dégagement de CO₂).

[0087] Cette première série d'essais a ainsi démontré qu'il était possible de transformer efficacement les substances hydrophiles particulières des boues en substances hydrophobes, lequel permet d'améliorer de façon significative la déshydratation des boues tout en conservant leur valeur fertilisante.

[0088] Le procédé a ensuite été appliqué aux boues municipales en y injectant cette fois, différentes concentrations de chlorures de sodium, suivi de la déshydratation à l'aide d'une unité de filtration sous vide (SV2) ayant une surface filtrante relativement importante (comparativement à l'unité de filtration SV1) et équipée de

membranes à porosité élevée. La procédure expérimentale est succinctement décrite à l'exemple 2.

EXEMPLE 2

Traitement de boues d'épuration municipales en faisant varier la quantité d'électrolyte support

5

[0089] La concentration moyenne en solides totaux des boues municipales utilisées pour les essais est de 22,6 g/L, soit de 2,3% de solides. Le processus expérimental employé est quasi identique à celui utilisé dans l'exemple précédent. Le pH initial des boues est ajusté par addition d'acide sulfurique. Différentes concentrations de NaCl (0, 2, 4, 6 et 8 g/L) ont été ajoutées aux boues afin de déterminer la concentration optimale pour laquelle une meilleure déshydratation et une meilleure désinfection sont obtenues. Aussi, l'ajout de NaCl permet d'améliorer la conductivité du milieu réactionnel et de réduire ainsi la consommation énergétique.

10

[0090] Les boues sont placées dans le réacteur précédent (Figure 2), maintenues sous agitation mécanique et électrolysées pendant une période de 60 minutes sous une intensité de courant de 8,0A.

15

[0091] La déshydratation subséquente des boues a été effectuée à l'aide d'une unité de filtration sous vide (SV2) ayant une surface filtrante de 201 cm² et équipée de membranes Whatman (marque de commerce) No.°4 de diamètre de pores variant entre 20 et 25 µm. Des échantillons de boues non-filtrées ont été conservés pour les mesures de coliformes fécaux et totaux par la technique du nombre le plus probable (NPP).

20

[0092] Le Tableau 2 présente les conditions expérimentales utilisées lors des essais, ainsi que les principaux résultats. Les pH finaux mesurés se situent entre 3,85 et 5,10, alors que les valeurs de potentiels d'oxydoréduction (POR) sont comprises entre 280 et 635 mV. Les consommations d'acide sulfurique sont de 29,2 et 23,3 kgH₂SO₄/tbs, alors qu'une consommation de NaCl variant entre 88,5 et

25

354 kg NaCl/tbs a été également utilisée. De plus, une consommation énergétique variant entre 644 et 2340 kwh/tbs a été requise lors des essais. L'apport de NaCl dans les boues (essais F, G, H et I) permet de réduire jusqu'à 72% la quantité d'énergie consommée comparativement à l'essai E au cours duquel aucun n'ajout
5 de NaCl n'a été effectué. Les dosages optimaux déterminés par des tests préliminaires de floculation ont été effectués en imposant des concentration variant entre 0.5 et 8.0 kg/tbs de polymère pour la floculation des boues traitées et non traitées se situent à environ 2,5 kg/tbs, à l'exception de l'essai H au cours duquel une concentration de 3,0 kg polymère/tbs a été testée.

TABEAU 2 ESSAIS DE PRÉ-CONDITIONNEMENT ET DE STABILISATION ÉLECTROCHIMIQUE DE BOUES DIGÉRÉES AÉROBIES ISSUES D'UNE STATION D'ÉPURATION D'EAUX USÉES MUNICIPALES

Paramètres	Essais					
	CONT	E	F	G	H	I
pH final	-	3,85	4,51	4,75	5,10	4,96
POR final (mV)	-	280	405	635	430	480
Température (°C)	10,0	40,1	27	23	21,5	20,3
Intensité (A)	0,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Conductivité (mS/cm ²)	1,6	2,5	5,3	7,8	10,3	14,8
Durée du traitement (min)	-	60	60	60	60	60
Résiduel de HClO (g/L)	0,0	0,11	0,28	0,39	0,50	0,68
Unité de filtration	SV2	SV2	SV2	SV2	SV2	SV2
Consommation (kg/tbs)						
H ₂ SO ₄	0,0	29,2	23,3	23,3	23,3	23,3
NaCl	0,0	0,0	88,5	177	266	354
Polymère	2,5	2,5	2,5	2,5	3,0	2,5
Énergie (kWh/tbs)	0,0	2340	1250	899	729	644
Microorganismes						
Col. fécaux (NPP/gbs)	140 000	885	1 130	133	< 1	< 1
Col. totaux (NPP/gbs)	355 000	1 600	2 000	412	115	< 1
Déshydratation						
Siccité finale (% p/p)	25,3	32,4	32,2	34,1	23,5	25,8
Réduction masse (% p/p)	-	21,9	21,4	25,9	-7,6	1,9

SV2 : unité de filtration sous vide ayant une surface filtrante de 201

5 cm²

[0093] La siccité moyenne obtenue après déshydratation des boues non traitées (essai CONT) est de 25,3%. L'application du procédé (essais E, F et G) permet d'accroître la siccité des boues déshydratées entre 32,2 et 34,1%, soit des gains de 6,9 à 8,8 points de siccité. Cette hausse de la siccité des boues déshydratées permet de réduire de 21,4 à 25,9% la quantité de boues générées. En revanche, la siccité diminue (essais H et I) lorsque la concentration du chlorure de sodium est fixée à 266 ou 354 kg/tbs. Cette baisse de la siccité pourrait être attribuée à une concentration résiduelle de HClO relativement élevée (0,5 et 0,7 g/L respectivement), laquelle est susceptible d'interférer avec le floculant et empêcher ainsi une bonne floculation des boues. La meilleure siccité des boues déshydratées (34,2%) est obtenue pour concentration optimale de chlorure de sodium de 177 kg NaCl/tbs et une concentration résiduelle d'acide hypochloreux de 0,4 g HClO/L.

[0094] L'efficacité désinfectante du procédé a également été évaluée. L'application du procédé permet une élimination efficace des indicateurs de pathogènes, en l'occurrence les coliformes fécaux et totaux. Ainsi, des concentrations relativement élevées de coliformes fécaux et totaux de 140 000 et 355 000 NPP/gbs ont été respectivement mesurées dans les boues non traitées. En comparaison, des concentrations résiduelles de coliformes fécaux inférieures 1 NPP/gbs (abattement supérieur à 5 unités logarithmiques) ou comprises entre 133 et 1 130 NPP/gbs ont été mesurées dans les boues traitées. Les mesures de concentrations résiduelles de coliformes totaux effectuées sur les boues traitées indiquent des concentrations inférieures à 1 NNP/gbs (abattement supérieur à 5 unités logarithmiques) ou comprises entre 115 et 2 000 NPP/gbs.

[0095] En somme, l'analyse de l'ensemble des résultats présentés dans le Tableau 2, montre que l'essai G serait l'essai optimal pour la stabilisation et le conditionnement des boues municipales étudiées. Cet essai requiert une dose optimale de 177 NaCl kg/tbs, une concentration de 23,3 H₂SO₄ kg/tbs, une dose de 2,5 kg polymère/tbs et une consommation énergétique 899 kwh/tbs. Une siccité relativement élevée de 34,1% (p/p) et un abattement de coliformes fécaux et totaux allant jusqu'à 3 unités logarithmiques (> 99,9% de réduction) ont été obtenus.

[0096] Dans l'optique de vérifier la reproductibilité des résultats obtenus suite à l'application des conditions optimales de traitement des boues municipales, une troisième série d'essais a été effectuée selon la procédure décrite à l'exemple 3 suivant.

5

EXEMPLE 3

Traitement de boues d'épuration municipales -vérification de la reproductibilité du procédé

[0097] Cinq litres de boues municipales préalablement acidifiées, contenant 4 g/L de NaCl (177 kg NaCl/tbs) ont été électrolysées dans le même appareil (Figure 2) pendant 60 minutes sous une intensité de courant de 8,0A. La déshydratation subséquente des boues a été effectuée à l'aide d'une unité de filtration sous vide (SV2). Ces essais de stabilisation électrochimique, suivis de la floculation et de déshydratation des boues ont été effectués en triplicata. Des essais de floculation et de déshydratation des boues non-traitées ont également été effectués en triplicata et comparés aux boues traitées. Le Tableau 3 compare les conditions expérimentales et les principaux résultats de déshydratation des boues.

[0098] À la fin du traitement électrochimique, la valeur moyenne de pH des boues est de $4,81 \pm 0,18$ alors que celle du POR est de 437 ± 33 mV. Dans le cas des boues non traitées une valeur moyenne de pH de $6,81 \pm 0,15$ et une valeur moyenne de POR de -115 ± 49 mV a été mesurée. Les valeurs négatives de POR mesurées dans les boues non traitées sont caractéristiques d'un milieu très réducteur. En comparaison, les valeurs élevées de POR mesurées dans les boues traitées indiquent un milieu très oxydant favorisé par la production *in situ* de HClO lors de l'électrolyse.

[0099] La température moyenne initiale des boues était de $11,3 \pm 0,4^{\circ}\text{C}$, alors que celle des boues traitées était de $26,4 \pm 1,8^{\circ}\text{C}$. Lors des essais, la conductivité du milieu est passée d'une valeur moyenne de $2,3 \pm 0,7$ mS/cm² (boues initiales) à une valeur finale de $8,2 \pm 0,4$ mS/cm² (boues traitées). La conductivité du milieu est

donc relativement bonne. Aussi, une consommation énergétique de 862 ± 9 kWh/tbs a été requise pour le traitement des boues.

[00100] Le dosage optimal de polymère pour la floculation des boues non traitées se situait approximativement à 1,9 kg/tbs alors qu'un ajout de 2,5 kg/tbs a
5 été requis pour la floculation des boues traitées.

TABEAU 3 ESSAIS DE PRÉ-CONDITIONNEMENT ET DE STABILISATION ÉLECTROCHIMIQUE DE BOUES DIGÉRÉES AÉROBIES ISSUES D'UNE STATION D'ÉPURATION D'EAUX USÉES MUNICIPALES

Paramètres	Essais ^a	
	Boues non traitées	Boues traitées
pH final	6,35 ± 0,15	4,81 ± 0,18
POR final (mV)	-115 ± 49	437 ± 33
Intensité (A)	0,0 ± 0,0	8,0 ± 0,0
Température (°C)	11,3 ± 0,4	25,6 ± 1,8
Conductivité (mS/cm ²)	2,31 ± 0,69	8,2 ± 0,4
Unité de filtration	SV2	SV2
Consommation (kg/tbs)		
H ₂ SO ₄	0,0 ± 0,0	23,3 ± 0,0
NaCl	0,0 ± 0,0	177 ± 0
Polymère	1,85 ± 0,00	2,51 ± 0,00
Énergie (kWh/tbs)	0,0 ± 0,0	862 ± 9
Valeur fertilisante		
DCO filtrat (mg/L)	902 ± 50	1 400 ± 40
N-NH ₄ filtrat (mg/L)	76,1 ± 5,3	76,8 ± 1,7
P-PO ₄ filtrat (mg/L)	4,6 ± 1,0	2,6 ± 0,1
K filtrat (mg/L)	94,2 ± 9,5	121 ± 1
Ca filtrat (mg/L)	59,7 ± 2,8	124 ± 2
Mg filtrat (mg/L)	66,6 ± 1,9	97,3 ± 1,2
Microorganismes		
Coliformes Fécaux (NPP/gbs)	200 000 ± 21 000	< 1
Coliformes Totaux (NPP/gbs)	1 200 000 ± 310 000	26 ± 5
Déshydratation		
Siccité finale (% p/p)	23,9 ± 1,3	33,4 ± 1,4
Réduction de la masse (% p/p)	-	29,3 ± 3,0

a : essais effectués en triplicata

5 SV2 : unité de filtration sous vide ayant une surface filtrante de 201 cm²

[00101] Une valeur moyenne de siccité de $23,9 \pm 1,3\%$ (p/p) a été enregistrée lors des essais de déshydratation des boues non traitées. En comparaison, l'application du traitement électrochimique permet d'accroître la siccité des boues à une valeur moyenne de $33,4 \pm 1,4\%$ (p/p), soit un gain de siccité de 9,5 points. Cette hausse de la siccité entraîne, en moyenne, une réduction de $29,3 \pm 3,0\%$ de la masse de boues générée suite à la déshydratation mécanique.

[00102] Les faibles valeurs d'écart type calculées pour chacun des paramètres opératoires, ainsi que celles relatives à l'estimation de la siccité des boues déshydratées, témoignent de la répétitivité des résultats et de la fiabilité du procédé.

[00103] D'autre part, le pouvoir désinfectant du procédé a été évalué par la mesure après un délai de deux semaines des concentrations de germes indicateurs de contamination bactérienne (coliformes fécaux et totaux) dans les boues liquides (traitées et non-traitées). Les résultats obtenus montrent une élimination totale des coliformes fécaux (abattement supérieur à 5 unités logarithmiques) et une réduction appréciable des coliformes totaux (abattement supérieur 4 unités logarithmiques). Le traitement permet donc une stabilisation efficace des boues municipale du point de vue microbiologique.

[00104] Aussi, la valeur fertilisante des boues suite à l'application du procédé a été évaluée par la mesure des concentrations d'éléments nutritifs (DCO, P-PO₄, N-NH₄, Ca, K et Mg) dans les filtrats de déshydratation des boues. Des hausses de concentrations de Ca, K et Mg en solution, estimées respectivement à 52, 22 et 32%, ont été observées. Une augmentation de la matière organique (DCO) en solution (estimée à environ 35%) a aussi été observée. Une fraction des éléments nutritifs (K, Mg et Ca) et de la matière organique, initialement liées aux matières insolubles des boues, est mise en solution suite à l'application du procédé. Dans tous les cas, l'application du procédé n'entraîne pas une solubilisation considérable de K, Mg, Ca et de la DCO. Une partie non négligeable de ces éléments est maintenue dans la fraction solide des boues les rendant adéquates pour l'épandage.

[00105] En particulier, les concentrations de NH_4 mesurées dans le filtrat de déshydratation des boues traitées sont du même ordre de grandeur que celles enregistrées dans l'effluent de déshydratation des boues non traitées, alors que la concentration de P-PO_4 a été réduite de 44% dans l'effluent de déshydratation des boues traitées. Cette réduction de P-PO_4 en solution est attribuée à une coprécipitation des ions phosphates dans la fraction solide des boues lors du traitement. D'une façon globale, l'application du procédé permet de conserver la valeur fertilisante des boues.

[00106] La réduction d'odeurs nauséabondes des boues suite à l'application du procédé a également été évaluée par une méthode qualitative de perception olfactive d'odeur, basée sur une échelle de 1 (absence d'odeur) à 5 (présence d'odeur très désagréable). Pour ce faire, treize individus de sensibilités différentes ont été soumis au test. Selon l'échelle établie (1 = absence d'odeur; 2 = odeur pas désagréable; 3 = odeur légèrement désagréable; 4 = odeur désagréable et 5 = odeur très désagréable), des notes ont été attribuées aux échantillons. Au total, 7 échantillons ont été présentés aux individus parmi lesquels, se trouvaient trois échantillons de boues traitées et déshydratées, trois échantillons de boues non traitées et déshydratées et un échantillon de terre noire (échantillon contrôle). L'échantillon contrôle est un échantillon de terre noire vendu dans le commerce pour la croissance résidentielle des plantes. Cet échantillon contrôle a servi comme base de comparaison avec les boues traitées et non traitées. Une valeur moyenne de $3,8 \pm 0,8$ a été attribuée aux boues non traitées, alors qu'une valeur de $2,3 \pm 0,8$ a été attribuée aux boues traitées. En ce qui concerne l'échantillon contrôle (terre noire), une valeur de $1,2 \pm 0,4$ lui a été attribuée.

[00107] La perception olfactive d'odeur étant différente d'un individu à l'autre, la moyenne obtenue pour chaque type d'échantillons pourrait ne pas être représentative. Cependant, en considérant l'ensemble des résultats obtenus sur chaque type d'échantillons comme étant une population statistique et en admettant que la population échantillonnée suit une loi normale, il a été possible de déterminer l'intervalle de confiance de la vraie moyenne (μ) avec un degré de confiance de

99%. Ainsi, la moyenne absolue des odeurs émanant de l'échantillon contrôle (terre noire) se situait entre 0,92 et 1,54, alors que la moyenne absolue des odeurs émanant des boues traitées était comprise entre 1,97 et 2,63 et celle des boues non traitées se situait entre 3,47 et 4,13. Il est important de noter que les intervalles de confiances déterminés ne s'entrecoupent pas. Les volontaires ont donc notés des différences d'intensités d'odeurs sur chaque type d'échantillons (boues traitées, boues non traitées, et terre noire). Le traitement électrochimique induit une diminution notable des odeurs nauséabondes.

[00108] Les exemples précédents concernent le traitement de boues municipales. En particulier, l'exemple 3 a permis de vérifier la reproductibilité et la fiabilité du procédé sur de tels effluents. L'exemple 4 suivant démontre l'applicabilité du procédé sur les boues secondaires issues d'une station d'épuration d'eaux usées d'une usine de fabrication de pâtes et papiers. Les conditions opératoires optimales déterminées lors des essais précédents (notamment en ce qui concerne le temps de traitement, la concentration de NaCl et l'intensité du courant) ont été directement appliquées.

EXEMPLE 4

Traitement de boues secondaires de pâtes et papiers

[00109] La concentration initiale en solides totaux des boues utilisées pour les essais était de 12,5 g/L, soit 1,3% de solides. Les boues (5,0 L) initialement acidifiées et contenant 4 g/L de NaCl, ont été placées dans le même réacteur (décrit précédemment, Figure 2) et électrolysées pendant une période de 60 minutes sous une intensité de courant de 8,0A. Une fois traitées, les boues ont été floculées à l'aide d'un polymère organique vendu sous la marque de commerce LPM 9511™, suivi de la déshydratation à l'aide d'unité de filtration sous vide (SV2) décrite précédemment. Le Tableau 4 compare les conditions opératoires ainsi que principaux résultats des essais de déshydratation des boues traitées et non traitées effectués en triplicata. Sont également présentés dans ce tableau, les concentrations d'éléments fertilisants et les concentrations résiduelles de germes indicateurs de pathogènes.

[00110] Les valeurs moyennes de pH et de POR des boues traitées se situent respectivement à $4,41 \pm 0,16$ et 490 ± 113 mV alors que les valeurs moyennes (pH et POR) des boues non traitées sont respectivement de $6,24 \pm 0,13$ et -117 ± 53 mV.

5 **[00111]** Lors des essais, une consommation moyenne d'acide de 13,2 kg de H_2SO_4 /tbs a été utilisée pour l'acidification des boues. La hausse de la concentration en ions chlorures dans les boues (pour la production de HClO) a nécessité un apport de 200 kg NaCl/tbs. Aussi, une consommation énergétique moyenne de 1100 ± 40 kWh/tbs a été requise lors du traitement des boues.

10 **[00112]** Le dosage optimal de polymère pour la floculation des boues non traitées et des boues traitées était identique et se situait approximativement à 3,0 kg/tbs.

[00113] L'application du procédé permet une élimination efficace des indicateurs de pathogènes (coliformes fécaux et totaux). Ainsi, une concentration de coliformes fécaux et totaux de 216800 NPP/gbs et 284800 NPP/gbs a été respectivement mesurée dans les boues non traitées. En comparaison, les mesures effectuées sur des échantillons de boues traitées indiquaient une concentration résiduelle de coliformes fécaux inférieure à 1 NPP/gbs (abattement supérieur à 5 unités logarithmiques) et une concentration résiduelle de coliformes totaux de 18 NPP/gbs (abattement supérieur à 4 unités logarithmiques).

[00114] Les mesures d'azote ammoniacal ($N-NH_4$) et de phosphate ($P-PO_4$) dans les filtrats de déshydratation des boues traitées et non-traitées montrent que l'application n'entraîne pas une solubilisation de ces éléments. En revanche, une hausse de la concentration de la matière organique (DCO) en solution (estimé à environ 43%) a été observée. Une fraction de la matière organique initialement liée aux matières insolubles des boues, est mise en solution suite à l'application du procédé.

TABEAU 4 ESSAIS DE PRÉ-CONDITIONNEMENT ET DE STABILISATION ÉLECTROCHIMIQUE DE BOUES SECONDAIRES ISSUES D'UNE STATION D'ÉPURATION D'EAUX USÉES D'UNE USINE DE PÂTES ET PAPIERS

Paramètres	Essais ^a	
	Boue non traitées	Boues traitées
pH final	6,24 ± 0,13	4,41 ± 0,61
POR final (mV)	-117 ± 53	490 ± 113
Intensité (A)	0,0 ± 0,0	8,0 ± 0,0
Température (°C)	14,3 ± 2,4	26,1 ± 0,5
Conductivité (mS/cm ²)	0,93 ± 0,16	7,69 ± 0,22
Unité de filtration	SV2	SV2
Consommation (kg/tbs)		
H ₂ SO ₄	0,0 ± 0,0	13,2 ± 0,0
NaCl	0,0 ± 0,0	200 ± 0
Polymère	3,0 ± 0,0	3,0 ± 0,0
Énergie (kWh/tbs)	0,0 ± 0,0	1 100 ± 40
Valeur fertilisante		
DCO filtrat (mg/L)	550 ± 173	970 ± 36
N-NH ₄ filtrat (mg/L)	45,4 ± 4,9	42,3 ± 1,7
P-PO ₄ filtrat (mg/L)	21,5 ± 1,6	21,9 ± 1,8
Microorganismes		
Coliformes fécaux (NPP/gbs)	216 800	< 1
Coliformes totaux (NPP/gbs)	284 800	18 ± 31
Déshydratation		
Siccité finale (% p/p)	19,9 ± 0,2	25,3 ± 1,2
Réduction de la masse (% p/p)	-	21,2 ± 3,8

a : essais effectués en triplicata

5 SV2 : unité de filtration sous vide ayant une surface filtrante de 201 cm²

[00115] Une valeur moyenne de 19,9% (p/p) a été mesurée lors des essais de déshydratation des boues non-traitées. L'application du procédé a permis d'accroître la siccité à une valeur de 25,3% (p/p), soit un gain de 5,4 points de siccité. Cette hausse de la siccité des boues déshydratées permet de réduire de 21,2% la masse des boues produites.

[00116] Par ailleurs, l'élimination des odeurs nauséabonde des boues suite à l'application du procédé a été évaluée par une méthode qualitative de perception olfactive. Une valeur moyenne de $4,5 \pm 0,5$ a été attribuée aux boues non traitées, alors qu'une valeur de $2,4 \pm 0,4$ a été attribuée aux boues traitées. En ce qui concerne l'échantillon de terre noire (échantillon contrôle), une valeur de $1,2 \pm 0,3$ lui a été attribuée.

[00117] Comme précédemment, des intervalles de confiance contenant les moyennes absolues des odeurs perçues par les volontaires sur chaque type d'échantillons ont été déterminés. Ainsi, la moyenne absolue des odeurs émanant de l'échantillon contrôle (terre noire) se situait entre 0,90 et 1,40. En comparaison, la moyenne absolue des odeurs émanant des boues traitées était comprise entre 2,20 et 2,60 et celle des boues non traitées se situait entre 4,20 et 4,70. Le traitement électrochimique des boues permet donc une diminution appréciable des odeurs nauséabondes émises par les boues non traitées.

[00118] Les exemples 1 à 4 ci-dessus présentés indiquent que les meilleurs essais de stabilisation (destruction des germes pathogènes et élimination des odeurs) et de déshydratation (hausse de la siccité des boues déshydratées) sont obtenus par ajout d'ion chlorure dans les boues, lequel réactif est favorable à la production *in situ* d'acide hypochloreux (HClO) nécessaire à la désinfection et à la désodorisation de ces biosolides. L'analyse de boues traitées et déshydratées indique cependant la possibilité de générer des sous-produits, tels que le chloroforme (2,8 à 6,7 mg/kg MS), le chlorure de vinyle (41 mg/kg MS), le toluène (28,5 mg/kg MS), le chlorophénol (2,1 mg/kg MS), dichlorophénol (3,5 mg/kg MS) et trichlorophénols (5,0 mg/kg MS), lesquels sont considérés comme cancérigènes.

Ces sous-produits sont en effet obtenus suite à la réaction de HClO sur certains composés organiques spécifiques appelés précurseurs (phénols, substances humiques et fulviques etc.) couramment rencontrés dans les eaux usées et boues d'épuration.

- 5 **[00119]** Dans l'optique d'éviter la formation de ces sous-produits toxiques, l'électrolyte NaCl peut être substitué par Na₂SO₄. L'ajout de réactif Na₂SO₄ permet en effet d'enrichir les boues en ions sulfates dont l'oxydation anodique conduit à la formation de persulfate ou d'acide persulfurique (H₂S₂O₈), un oxydant bactéricide très puissant capable d'oxyder les composés organiques et inorganiques
10 malodorants. Ainsi, une cinquième série d'essais a été effectuée selon la procédure décrite à l'Exemple 5.

EXEMPLE 5

Traitement de boues d'épuration municipales avec une source d'ions sulfate à titre d'électrolyte support

- 15 **[00120]** Cinq litres de boues mixtes non digérées, préalablement acidifiées (35,4 à 44,2 kg H₂SO₄/tbs) et contenant 2,5 à 10 g/L de Na₂SO₄ (74,5 à 298 kg Na₂SO₄/tbs) ont été électrolysées dans le même réacteur (décrit précédemment, Figure 2) pendant une période de 60 minutes sous une intensité de courant de 8,0A. Une concentration de peroxyde d'hydrogène de 0.2 et 0.3 g/L (5,70 et 9,51 kg
20 H₂O₂/tbs respectivement) a été dans certains cas nécessaire pour améliorer les performances du procédé. La concentration initiale en solides totaux des boues utilisées pour les essais était de 33,6 g/L, soit 3,4% de solides. Une fois traitées, les boues ont été floculées à l'aide d'un polymère organique vendu sous la marque de commerce Percol 789™, alors que les boues non traitées ont été floculées à l'aide
25 d'un polymère vendu sous la marque de commerce Percol 757™. La déshydratation subséquente des boues a été effectuée à l'aide d'une unité de filtration sous vide (SV2). Ces essais de stabilisation électrochimique, suivis de la floculation et déshydratation des boues ont été effectués et comparés aux boues non-traitées. Le Tableau 5 compare les conditions expérimentales et les principaux résultats de
30 déshydratation des boues.

TABLEAU 5 ESSAIS DE PRÉ-CONDITIONNEMENT ET DE STABILISATION ÉLECTROCHIMIQUE DE BOUES MIXTES NON-DIGÉRÉES D'UNE STATION D'ÉPURATION D'EAUX USÉES MUNICIPALES

Paramètres	Essais				
	CONT	J	K	L	M
pH final	5,4	4,17	4,03	4,12	4,11
POR final (mV)	-138	-70	-55	-35	-22
Température (°C)	10,2	23,7	24,3	27,3	22
Intensité (A)	0,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Conductivité (mS/cm ²)	0,8	6,5	6,3	4,7	10,2
Durée traitement (min)	0,0	60	60	60	60
Unité de filtration	SV2	SV2	SV2	SV2	SV2
Consommation (kg/tbs)					
H ₂ SO ₄	0,0	36,3	41,7	35,4	44,2
Na ₂ SO ₄	0,0	149	149	74,5	298
H ₂ O ₂	0,0	5,7	0,0	9,51	0,0
Polymère	5,0	4,5	4,5	4,5	3,7
Énergie (kWh/tbs)	0,0	586	532	708	422
Valeur fertilisante					
DCO filtrat (mg/L)	2850	3480	3253	3481	3269
N-NH ₄ filtrat (mg/L)	182	191	181	178	185
P-PO ₄ filtrat (mg/L)	53,0	63	120	32	174
Microorganismes					
Coliformes fécaux (UFC/100 mL)	9,2 x 10 ⁵	271	271	271	536
Coliformes totaux (UFC/100 mL)	1,61 x 10 ⁷	536	13095	271	5655
Déshydratation					
Siccité finale (% p/p)	21,6	28,1	24,9	26,4	22,4
Réduct. masse (% p/p)		23,3	13,2	18,2	3,7

SV2 : unité de filtration sous vide ayant une surface filtrante de 201

5 cm²

[00121] Les pH finaux des boues traitées se situent entre 4,03 et 4,17 alors que les valeurs finales de POR sont comprises entre -70 et -22 mV. Dans le cas des boues non traitées, des valeurs moyennes de pH de $5,36 \pm 0,07$ et de POR de -138 ± 14 mV ont été mesurées.

[00122] La température moyenne initiale des boues était de $10,2 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$, alors que celle des boues traitées variait entre 22 et 27°C . Lors des essais, la conductivité du milieu est passée d'une valeur moyenne de $0,8 \pm 0,1 \text{ mS/cm}^2$ (boues initiales) à une valeur finale se situant entre 4,7 et $10,2 \text{ mS/cm}^2$ (boues traitées). La conductivité du milieu est donc relativement bonne. Aussi, une consommation énergétique variant entre 422 et 708 kWh/tbs a été requise pour la stabilisation des boues. La consommation énergétique est d'autant moins importante que la conductivité électrique augmente.

[00123] Le dosage optimal de polymère pour la floculation des boues non-traitées se situait approximativement à 5,0 kg/tbs. En comparaison, des concentrations de 3,7 et 4,5 kg polymère/tbs ont été requises pour la floculation des boues traitées.

[00124] Une valeur moyenne de siccité de 21,6 % (p/p) a été mesurée lors de l'essai contrôle (CONT) de déshydratation des boues non-traitées effectué en triplicata. L'application du procédé électrochimique (essais J, K, L et M) a permis d'accroître la siccité à des valeurs comprises entre 22,4 et 28,1% (p/p), soit des gains de 0,8 à 6,5 points de siccité. Cette hausse de la siccité des boues déshydratées permet de réduire la quantité de boues générées, soit entre 3,7 et 23,3% (p/p).

[00125] L'efficacité désinfectante du procédé a également été évaluée par la mesure des concentrations de germes indicateurs de contamination bactérienne (coliformes fécaux et totaux) dans les boues liquides (traitées et non-traitées). Les résultats obtenus montrent une élimination efficace de ces indicateurs de pathogènes. Ainsi, des concentrations relativement élevées de coliformes fécaux et totaux de $9,2 \times 10^5$ et $1,6 \times 10^7$ UFC/g b.s. ont été respectivement mesurées dans les boues non traitées. En comparaison, des concentrations résiduelles de coliformes fécaux comprises entre 271 et 536 UFC/g b.s. (>99.0% de réduction de coliformes fécaux) ont été mesurées dans les boues traitées. Les mesures de concentrations résiduelles de coliformes totaux effectuées sur les boues traitées

indiquent des concentrations comprises entre 536 et 13 095 UFC/g b.s. (>99.9% de réduction de coliformes totaux).

[00126] D'autre part, la valeur fertilisante des boues suite à l'application du procédé a été évaluée par la mesure des concentrations d'éléments nutritifs (DCO, P-PO₄ et N-NH₄) dans les filtrats de déshydratation des boues. À l'exception de la concentration de P-PO₄ mesurée lors des essais K et M, l'ensemble des paramètres enregistrés montre que l'application du procédé n'induit pas une perte considérable de la valeur fertilisante des boues. Par exemple, une hausse de la concentration de DCO variant entre 12 et 18% et une légère hausse de N-NH₄ variant entre 1.6 et 5% ont été mesurées suite à l'application du traitement électrochimique. En particulier lors de l'essai L, une baisse de la concentration de P-PO₄ dans le filtrat de déshydratation des boues traitées a été enregistrée. Une partie non négligeable des éléments fertilisants est donc maintenue dans la fraction solide des boues traitées.

[00127] En somme, l'analyse de l'ensemble des résultats présentés au Tableau 5 montre que l'essai L serait l'essai optimal pour la stabilisation et le conditionnement des boues municipales étudiées. Cet essai requiert une dose optimale de 74,5 kg Na₂SO₄/tbs, une concentration de 35,4 kg H₂SO₄/tbs, une concentration de 9,51 kg H₂O₂/tbs et une dose de 4,5 kg polymère/tbs. Une consommation énergétique de 708 kWh/tbs est également requise pour le traitement électrochimique des boues. Une siccité relativement élevée de 26,4 % (p/p) et un abattement de coliformes fécaux et totaux allant jusqu'à 4 unités logarithmiques (> 99,9% de réduction de coliformes) sont obtenus.

[00128] La concentration de polluants organiques dans les boues traitées issues de l'essai optimal L a été analysée et comparée aux boues non traitées. Les principaux contaminants organiques retrouvés dans ces boues sont regroupés au Tableau 6.

TABLEAU 6 CONCENTRATIONS DES TRIHALOMÉTHANES (THM), DES HYDROCARBURES AROMATIQUES MONOCYCLIQUES (HAM) ET DES COMPOSÉS PHÉNOLIQUES DANS LES ÉCHANTILLONS DE BOUES LIQUIDES NON-TRAITÉES ET TRAITÉES, MESURÉES LORS DE L'APPLICATION DES CONDITIONS OPTIMALES DE TRAITEMENT DES BOUES MIXTES NON-DIGÉRÉES

5

Polluants organiques	Unités	Boues non traitées	Boues traitées
Trihalométhanes (THM)			
Chlorure de vinyle	µg/L	< 8	< 8
Dichlorométhane	µg/L	< 200	< 200
Chloroforme	µg/L	54	22
Tétrachlorure de carbone	µg/L	< 4	< 4
1,1,2-Tétrachloroéthane	µg/L	< 20	< 20
Bromoforme	µg/L	< 4,0	< 4,0
Hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM)			
Benzène	µg/L	< 8,0	< 8,0
Toluène	µg/L	10000	1400
Chlorobenzène	µg/L	< 8	< 8
Éthylbenzène	µg/L	< 4	15
Styrène	µg/L	< 4,0	< 4,0
1,3,5-triméthylbenzène	µg/L	5,2	< 4,0
1,2,4- triméthylbenzène	µg/L	16	< 4,0
1,3-dichlorobenzène	µg/L	< 4	< 4
1,4-dichlorobenzène	µg/L	26	5,5
Composés phénoliques			
Phénol	µg/L	130	53
o-crésol	µg/L	23	160
m-crésol	µg/L	13	53
p-crésol	µg/L	2200	770
2-chlorophénol	µg/L	< 7,0	< 5,0
3-chlorophénol	µg/L	< 7,0	< 50
4-chlorophénol	µg/L	< 1,0	1,8
2,4 et 2,5 Dichlorophénol	µg/L	< 10,0	< 7,0
3,5-Dichlorophénol	µg/L	< 7,0	< 5,0
2,3-Dichlorophénol	µg/L	< 5,0	< 5,0
2,4,5-Trichlorophénol	µg/L	< 5,0	< 4,0
2,3,4-Trichlorophénol	µg/L	< 4,0	< 3,0
3,4,5-Trichlorophénol	µg/L	< 5,0	< 4,0
2,3,4,5-Tétrachlorophénol	µg/L	< 4,0	< 3,0
Pentachlorophénol	µg/L	< 4,0	< 3,0

[00129] Les concentrations des trihalométhanes (THM) mesurées dans les boues traitées et non traitées étaient pour la plupart inférieures aux limites de détection, à l'exception du chloroforme. Une concentration de 54 µg/L a été enregistrée dans les boues non traitées comparativement à 22 µg/L mesurée dans les boues traitées, soit une réduction de plus de 50% de chloroforme.

[00130] En ce qui concerne les hydrocarbures aromatiques monocycliques, la plus forte concentration mesurée dans les boues non traitées était 10 000 µg/L de toluène, comparativement à 1 400 µg/L enregistrée dans les boues traitées, soit une élimination de 86% de toluène lors du traitement.

10 **[00131]** Par ailleurs, l'analyse des composés phénoliques dans les boues initiales (boues non traitées) indique une concentration de 130 µg/L de phénol et une concentration de 2 236 µg/L de crésol (o-crésol, m-crésol et p-crésol). En comparaison, l'application du traitement électrochimique permet de réduire la concentration de phénol et de crésol à des valeurs respectives de 53 µg/L (soit une
15 réduction de 59% de phénol) et 963 µg/L (soit une réduction de 57% de crésol).

[00132] En définitive, le traitement électrochimique proposé permet de stabiliser les boues du point de vue microbiologique, d'accroître la siccité des boues déshydratées et de conserver la valeur fertilisante des boues tout en favorisant une élimination importante des polluants organiques.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de conditionnement de boues d'épuration caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

acidification des boues d'épuration de manière à atteindre un pH entre
5 environ 3,5 et environ 5 pour générer des boues acidifiées; et

électrolyse des boues acidifiées dans une cellule électrolytique comprenant des électrodes dont au moins une anode et au moins une cathode, la cellule étant capable de générer *in situ* un oxydant bactéricide choisi parmi l'acide hypochloreux et l'acide persulfurique, pour générer des boues électrolysées,

10 les boues électrolysées ayant une déshydratabilité et une stabilité plus élevée que les boues d'épuration.

2. Procédé tel que défini à la revendication 1, dans lequel la cellule électrolytique comprend à l'anode des électrodes insolubles à forte surtension d'oxygène.

15 3. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 2, dans lequel des ions chlorure sont ajoutés aux boues avant l'électrolyse.

4. Procédé tel que défini à la revendication 3, dans lequel les ions chlorures sont ajoutés à une concentration variant entre environ 0,6 et environ 6,0 g Cl⁻/L.

20 5. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 3 et 4, dans lequel des ions chlorures sont ajoutés aux boues et où les ions sont choisis parmi le groupe composé du NaCl, du CaCl₂, du MgCl₂, du NH₄Cl, du KCl et du FeCl₃.

25 6. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 3 et 5, dans lequel les ions chlorures sont ajoutés sous forme de NaCl à une concentration d'au plus 10 g NaCl/L.

7. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 3 à 5, dans lequel les ions chlorures sont ajoutés sous forme de NaCl à une concentration d'au plus 8 g NaCl/L.

8. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 2, dans lequel des ions sulfates et du peroxyde sont ajoutés aux boues avant l'électrolyse.

5 9. Procédé tel que défini à la revendication 8, dans lequel les ions sulfates sont ajoutés à une concentration variant entre environ 1,7 et environ 6,7 g $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$.

10. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 8 et 9, dans lequel les ions sulfates sont ajoutés aux boues et où les ions sont choisis parmi le groupe composé du Na_2SO_4 , du $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, du CaSO_4 et du MgSO_4 .

10 11. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 2, dans lequel les ions sulfates sont ajoutés sous forme de Na_2SO_4 à une concentration variant entre environ 2,5 et environ 10 g $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{L}$ et le peroxyde à une concentration variant entre environ 0,2 et environ 0,3 g $\text{H}_2\text{O}_2/\text{L}$.

15 12. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 11, dans lequel la cellule électrolytique fonctionne à une intensité variant entre environ 2 et environ 15A, ce qui correspond à une densité de courant anodique variant entre environ 1,2 et environ 8,8 A/dm^2 .

20 13. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 11, dans lequel la cellule électrolytique fonctionne à une intensité variant entre environ 5 et environ 10A, ce qui correspond à une densité de courant anodique variant entre 2,9 et environ 5,9 A/dm^2 .

14. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 13, dans lequel l'électrolyse est appliquée pour une durée variant entre environ 10 et environ 120 minutes.

25 15. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 13, dans lequel l'électrolyse est appliquée pour une durée variant entre environ 30 et 60 minutes.

30 16. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 15, la cellule électrolytique est de type cylindrique unique comprenant des électrodes concentriques en métal et disposées de telle sorte qu'une anode soit immédiatement suivie d'une cathode.

17. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 15, la cellule électrolytique est de type cylindrique unique comprenant une série d'électrodes circulaires en métal et, placées en position stable et horizontale de telle manière qu'une anode soit immédiatement suivie d'une cathode.

5 18. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 15, la cellule électrolytique est de forme parallélépipédique comprenant une série d'électrodes planes et rectangulaires disposées de telle sorte qu'une anode soit immédiatement suivie d'une cathode.

10 19. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 18, la au moins une anode est fabriquée dans un matériau choisi parmi le titane recouvert d'oxyde de ruthénium (Ti/RuO₂), d'oxyde d'iridium (Ti/IrO₂), d'oxyde d'étain (Ti/SnO₂) de platine (Ti/Pt), et une combinaison de ces matériaux, et la au moins une cathode est fabriquée dans un matériau choisi parmi le titane (Ti), l'acier inoxydable (Inox) et une combinaison de ces matériaux.

15 20. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 19, dans lequel les électrodes sont en métal déployé.

21. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 20, dans lequel électrodes sont espacées de manière à créer une distance inter-électrode comprise entre environ 1 et environ 5 cm.

20 22. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 21, l'acidification des boues est effectuée par ajout d'un acide inorganique choisi parmi le groupe composé de l'acide sulfurique, l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique, l'acide phosphorique, un acide usé industriel et une combinaison d'au moins deux de ces acides.

25 23. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 22, dans lequel l'électrolyse est conduite à une température comprise entre environ 10 et environ 60°C sans apport extérieur de chaleur.

30 24. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 22, dans lequel l'électrolyse est conduite à une température comprise entre environ 20 et environ 40°C sans apport extérieur de chaleur.

25. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 24, dans lequel les boues électrolysées sont mélangées avec des boues d'épuration.

26. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 25, dans lequel les boues d'épuration ont une concentration initiale en solides totaux variant entre environ 5 et environ 50 g/L.

27. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 26, dans lequel les boues électrolysées sont floculées par l'addition d'un agent floculant pour générer des boues floculées.

28. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 27, dans lequel les boues floculées sont déshydratées.

29. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 26, dans lequel les boues électrolysées sont complètement ($\text{pH} \geq 7$) ou partiellement ($\text{pH} < 7$) neutralisées par addition d'un agent alcalin.

30. Procédé tel que défini à la revendication 28, dans lequel les boues déshydratées sont neutralisées par addition d'un agent alcalin immédiatement après la déshydratation.

31. Procédé tel que défini à la revendication 28, dans lequel les boues déshydratées sont neutralisées par addition d'un agent alcalin après une période de stockage des boues.

32. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 29 à 31, dans lequel l'agent alcalin employé pour neutraliser les boues est choisi parmi le groupe composé de la chaux, l'hydroxyde de sodium, le carbonate de calcium, l'hydroxyde d'ammonium, l'hydroxyde de magnésium, la dolomie, une base usée industrielle et une combinaison de deux ou plus de ces agents alcalins.

33. Procédé de conditionnement de boues d'épuration caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

acidification des boues d'épuration de manière à atteindre un pH entre environ 3,5 et environ 5 pour générer des boues acidifiées;

ajout d'ions choisis parmi le groupe composés des ions chlorures et des ions sulfates; et

électrolyse des boues acidifiées dans une cellule électrolytique comprenant des électrodes dont au moins une anode et au moins une cathode, la cellule étant capable de générer *in situ* un oxydant bactéricide choisi parmi l'acide hypochloreux et l'acide persulfurique, pour générer des boues électrolysées,

5 les boues électrolysées ayant une déshydratabilité et une stabilité plus élevée que les boues d'épuration.

34. Procédé tel que défini à la revendication 33, dans lequel les étapes d'acidification et d'ajout d'ions sont réalisées successivement.

10 35. Procédé tel que défini à la revendication 33, dans lequel les étapes d'acidification et d'ajout d'ions sont réalisées simultanément.

36. Procédé tel que défini à l'une ou l'autre des revendications 1 à 35, opéré en mode choisi parmi le groupe composés des modes cuvée, semi-continu et continu.

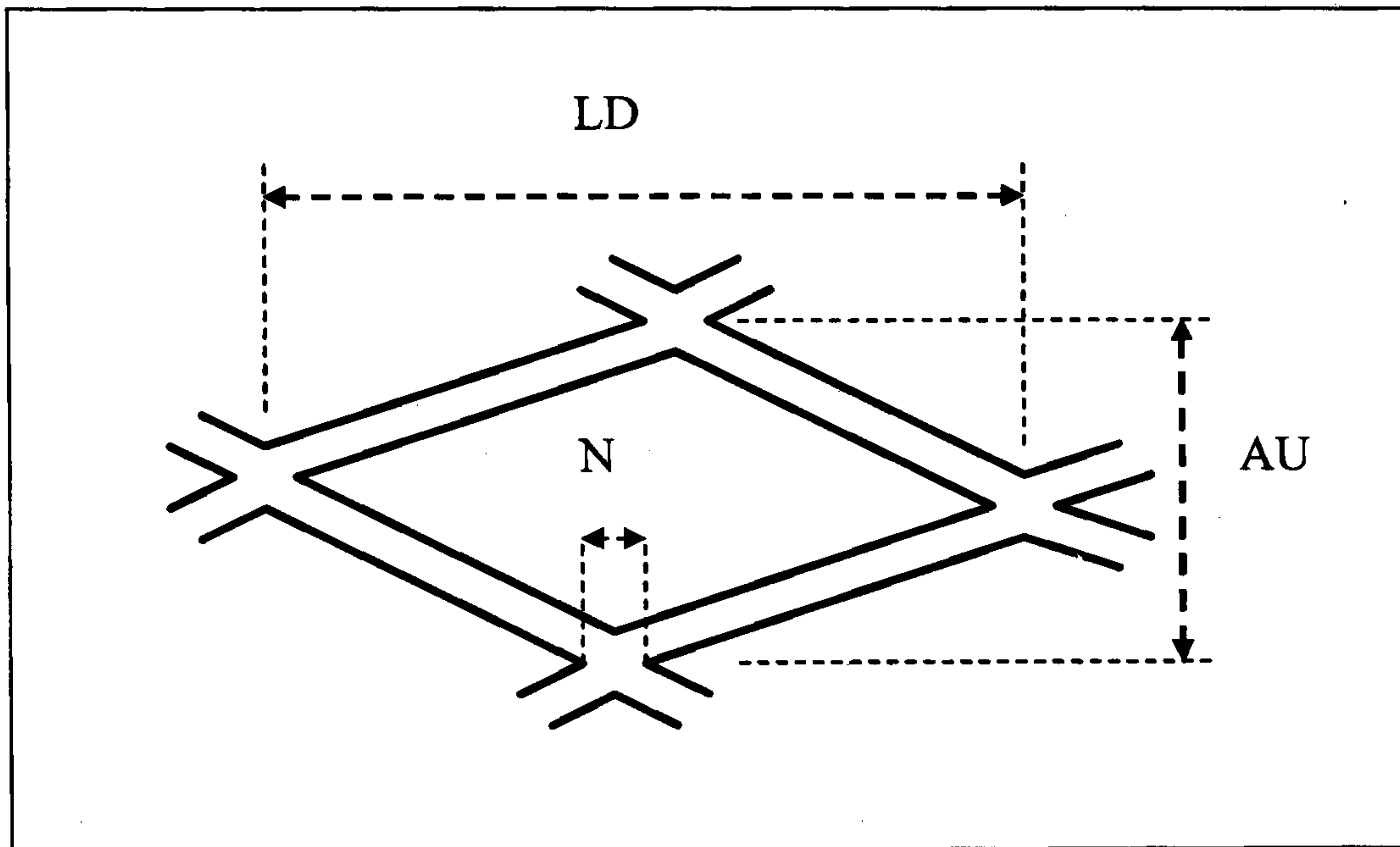


FIGURE 1

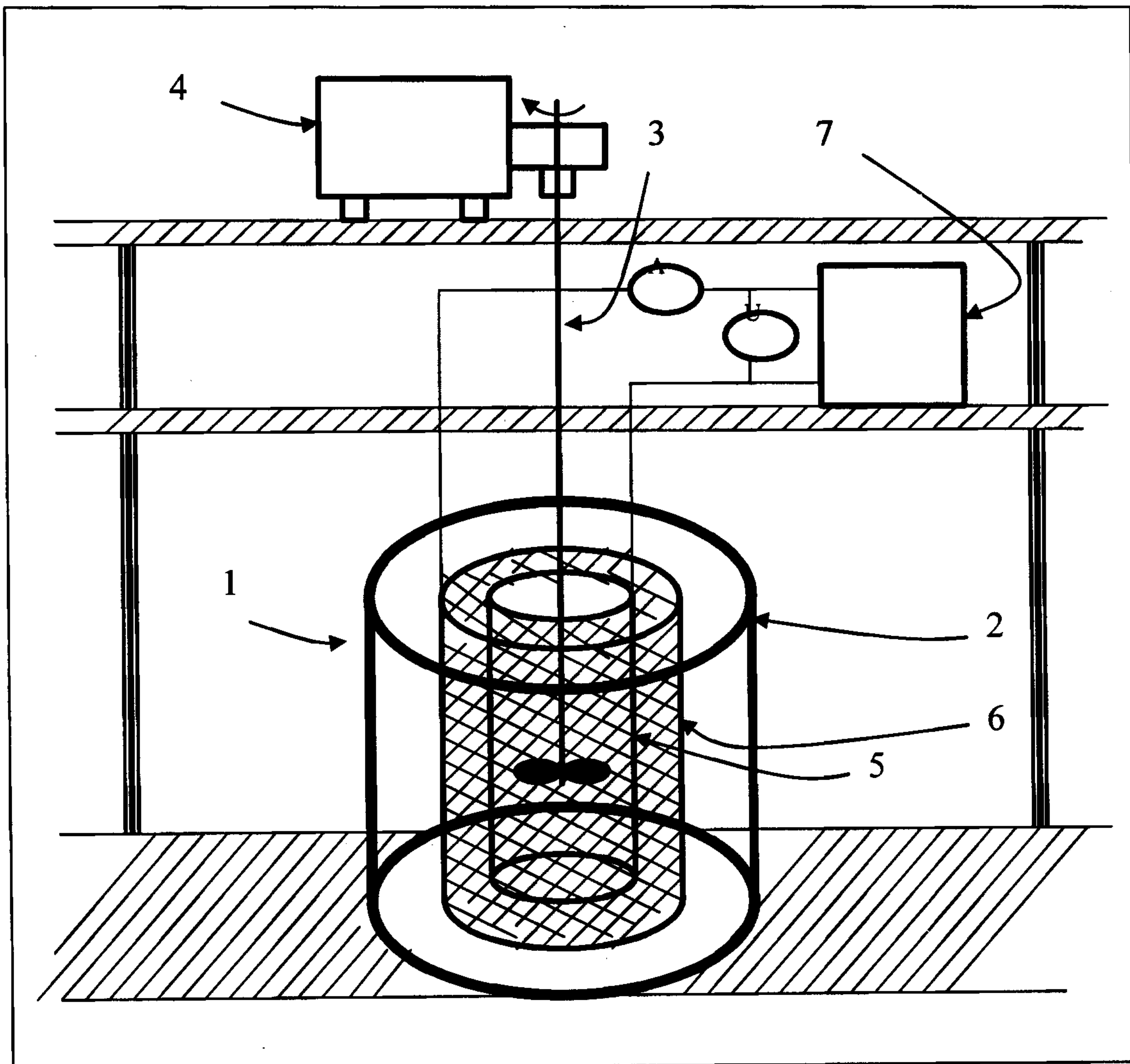


FIGURE 2

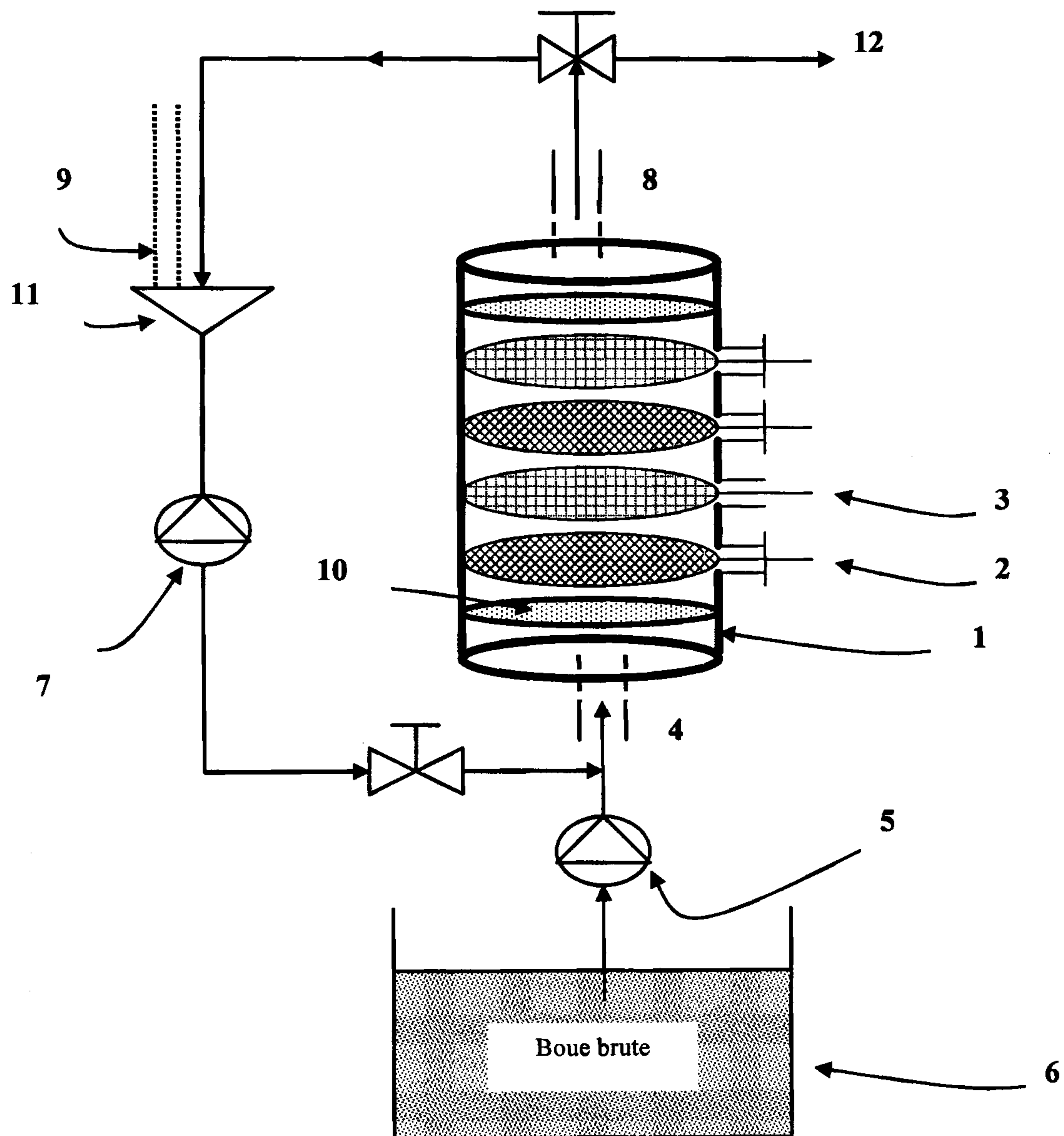


FIGURE 3

