



(12) FASCICULE DE BREVET

- (11) N° de publication : **MA 30113 B1** (51) Cl. internationale : **C02F 1/00**
- (43) Date de publication : **02.01.2009**

-
- (21) N° Dépôt : **29947**
- (22) Date de Dépôt : **28.05.2007**
- (71) Demandeur(s) :
- **ESSADKI ABDELHAFID, ESTC, DEPT.GENIE DE PROCEDE, KM 7 ROUTE D'ELJADIDA BP 8012 OASIS CASABLANCA (MA)**
 - **BENNAJAH MOUNIR, 5 BIS, AVENUE DES PARCS AIN SEBAA CASABLANCA (MA)**
- (72) Inventeur(s) : **BENNAJAH MOUNIR ; ESSADKI ABDELHAFID**
- (74) Mandataire : **ABDELHAFID ESSADKI**

-
- (54) Titre : **ELECTROCOAGULATION/ELECTROFLOTATION DANS UN REACTEUR GAZOSIPHON A BOUCLE EXTERNE POUR LE TRAITEMENT DES EAUX POLLUEES**
- (57) Abrégé : « Conception d'un réacteur gazosiphon à boucle externe (external-loop airlift reactor) pour le traitement des effluents liquides par Electrocoagulation/Electroflotation ». Inventeurs : Essadki Abdel hafid et Bennajah Mounir La présente invention concerne un appareil de traitement des rejets liquides (eau de lavage, défluorisation, déphosphatation, dénitrification, élimination du Chrome, élimination du Cadmium et d'Arsenic, récupération du Cobalt, eaux urbaines, eaux industrielles...). La technologie du procédé repose sur l'introduction de deux électrodes (cathode et anode) dans un réacteur gazosiphon à boucle externe. La dépollution de l'eau s'effectue par voie électrochimique. Les polluants sont récupérés sous forme de floccs à la surface libre du réacteur (de l'appareil). Les bulles d'hydrogène produites au niveau de la cathode, à l'issue de l'électrolyse de l'eau entraînent les particules déstabilisées du polluant, vers le haut du réacteur formant un flocc, facilement récupérable. L'énergie mécanique qui sert pour l'agitation et même pneumatique pour la flottation ont été remplacées par la seule l'énergie électrique qui sert en même temps à l'agitation, la flottation et l'électrocoagulation.

« Conception d'un réacteur gazosiphon à boucle externe (external-loop airlift reactor) pour le traitement des effluents liquides par Electrocoagulation/Electroflotation ».

Inventeurs : Essadki Abdel hafid et Bennajah Mounir

Abrégé :

La présente invention concerne un appareil de traitement des rejets liquides (eau de lavage, défluorisation, déphosphatation, dénitrification, élimination du Chrome, élimination du Cadmium et d'Arsenic, récupération du Cobalt, eaux urbaines, eaux industrielles...). La technologie du procédé repose sur l'introduction de deux électrodes (cathode et anode) dans un réacteur gazosiphon à boucle externe. La dépollution de l'eau s'effectue par voie électrochimique. Les polluants sont récupérés sous forme de floes à la surface libre du réacteur (de l'appareil). Les bulles d'hydrogène produites au niveau de la cathode, à l'issue de l'électrolyse de l'eau entraînent les particules déstabilisées du polluant, vers le haut du réacteur formant un floe, facilement récupérable. L'énergie mécanique qui sert pour l'agitation et même pneumatique pour la flottation ont été remplacées par la seule l'énergie électrique qui sert en même temps à l'agitation, la flottation et l'électrocoagulation.

«Conception d'un réacteur gazosiphon à boucle externe (external-loop airlift reactor) pour le traitement des effluents liquides par Electrocoagulation/Electroflotation».

La présente invention concerne un appareil de traitement des rejets liquides (eau de lavage, défluoration, déphosphatation, dénitrification, élimination du Chrome, élimination du Cadmium et d'Arsenic, récupération du Cobalt, eaux urbaines, eaux industrielles...). La technologie du procédé repose sur l'introduction de deux électrodes (cathode et anode) dans un réacteur gazosiphon à boucle externe. La dépollution de l'eau s'effectue par voie électrochimique. Les polluants sont récupérés sous forme de floes à la surface libre du réacteur (de l'appareil). Les bulles d'hydrogène produites au niveau de la cathode, à l'issue de l'électrolyse de l'eau entraînent les particules déstabilisées du polluant, vers le haut du réacteur formant un floe, facilement récupérable.

Comme tout réacteur gazosiphon à boucle externe, celui-ci est composé de deux compartiments : le riser et le downcomer.

Les réacteurs gazosiphons connus aussi sous le nom (Airlift) sont des réacteurs biphasiques (liquide-gaz) ou triphasiques (liquide-gaz-solide). Ils sont généralement constitués de deux compartiments principaux (Riser et Downcomer), l'injection du gaz à l'intérieur du compartiment Riser provoque une circulation du liquide ascendante dans ce compartiment, alors qu'au deuxième compartiment, le liquide redescend vers le bas du réacteur. La phase continue peut être liquide ou une suspension solide. L'introduction du gaz dans l'un des deux compartiments du réacteur provoque une différence de rétention gazeuse entre les deux zones, aérée et non aérée, une force motrice est alors créée, induisant la circulation du liquide dans le réacteur. Lorsque le débit de gaz entrant au Riser est important, la vitesse du liquide est alors élevée.

Les réacteurs AIRLIFT sont fréquemment utilisés dans l'industrie chimique et biotechnologique, et des bioprocédés (exp : la production du vinaigre ou de l'acide citrique...etc). On énumère de nombreuses études récentes relatives à la croissance des micro-organismes dans les réacteurs Airlift. Il existe notamment des applications de ce type d'appareil dans le domaine pétrochimique (exp. l'hydrogénisation du benzène en cyclohexane catalysé par du Nickel...).

Malgré l'application avec succès de ces réacteurs dans le domaine industriel l'utilisation des réacteurs Airlift en tant que réacteurs électrochimiques n'a jamais été proposée, d'autant plus leur utilisation électrochimique pour la dépollution des rejets liquides.

L'électrocoagulation est souvent réalisée dans un réacteur agité, et la récupération des boues (flocs) est souvent faite après arrêt de l'électrolyse. La sédimentation des polluants sous forme des flocs est une opération relativement lente. Souvent pour le cas de l'électrocoagulation dans les réacteurs agités la flottation des flocs est réalisée par injection de l'air comprimée. dans ce cas le distributeur du gaz joue un rôle important dans l'opération, l'efficacité de la flottation augmente lorsque la taille des bulles d'air diminue.

Originalité et Description

L'originalité de l'invention réside :

- Dans l'idée de réaliser un procédé électrochimique (électrolyse) dans un appareil de génie chimique (réacteur gazosiphon), généralement utilisé dans des applications biochimiques et de transfert de gaz liquide.
- Dans le choix optimal de la position des électrodes dans un compartiment du réacteur nommé riser. Ce choix permet d'assurer, d'une part, une circulation du liquide et donc une agitation pour homogénéiser et d'autre part de préserver le floc en haut de l'appareil pendant le temps nécessaire du procédé. Une loi a été proposée reliant la vitesse du liquide dans chaque compartiment du réacteur en fonction de la densité de courant appliquée (courant électrique divisé par la surface de l'anode) et de la position des électrodes.

De plus, le temps de séjour (volume dans la zone de séparation divisé par le débit induit) du liquide (effluent) dans la chambre de séparation constitue un facteur important dans la stabilité du floc. Une relation a été établie dans le but de déterminer le temps de séjour optimal de l'effluent dans la chambre de séparation.

Ce réacteur est un pilote opérationnel, extrapolable à grande échelle (industrie textile, centrale de traitement des eaux...).

Notre innovation consiste à créer une force motrice, en faisant circuler l'effluent liquide, non pas en introduisant l'air comprimée, mais plutôt par les bulles d'hydrogène produite au niveau de la cathode au compartiment Riser, cette dernière crée donc la force motrice du liquide.

Dans le but de concevoir un procédé stable, fonctionnant dans les conditions optimale d'efficacité et de dépense énergétique, des études hydrodynamiques, des calculs d'optimisation, et de simulation par des outils informatique ont été sujet d'étude. Plusieurs paramètres et phénomènes ont été pris en compte lors du dimensionnement de cet appareil, notamment celui de la recirculation des bulles produite au Riser et leur entraînement par le liquide vers le deuxième compartiment (Downcomer). (problème fréquemment rencontré dans les réacteur airlift).

La position optimal des électrodes est le résultat de nombreux essais, sur différents rejets liquide (Minéraux (Fluor, Phosphate, Nitrates, Chrome, Cadmium Arsenic, Cobalt...), organique, rejets de textile, eau du réseau urbain ...), ces effluents on été choisis à des charges différentes en polluants allant jusqu'à 2g/l, ils étaient traitées avec succès à des taux résiduels en polluant acceptable par des normes internationaux.

Dans ce contexte la position des électrodes est ajustée pour chaque type de polluant en raison de structure du floc formé, qui diffère d'un type de rejet à un autre, et qui est sensible à la vitesse de circulation du liquide, donc à la position des électrodes.

Pour cela plusieurs essais de stabilité de floes approuvée par différentes techniques d'analyses (Absorbance, turbidité) ont permis de déterminer la position optimale des électrodes permettant ainsi une bonne circulation du liquide tout en gardant un floc stable.

Description du dispositif expérimental : dimensionnement

L'appareil utilisé dans ce projet pour réaliser la dépollution par électrocoagulation/électroflotation est un réacteur gazosiphon (Airlift) à boucle externe fabriqué à base de l'altuglas de 1.79 m de haut. Le schéma du réacteur et ses dimensions sont représentés dans la partie « Schéma du réacteur ».

Le volume utile du liquide est 20 l, il correspond à une hauteur du liquide à la chambre de séparation du gaz de 14 cm. Les diamètres des pieds ascendants et descendants du réacteur (fréquemment appelées riser et du downcomer) sont respectivement 94 mm et 50 mm. Le rapport entre les sections droites des deux compartiments downcomer et du riser (A_d/A_r) est 0.28, cette valeur permet un fonctionnement optimal. La distance entre les axes de ces jambes ou colonnes est de 675 mm. Le riser et le downcomer sont connectés en bas du réacteur par une colonne de 50 mm de diamètre.

Afin de réduire au minimum la chute de pression (les pertes de charge) et d'éviter les zones mortes, le rayon de courbure des coudes à été choisis à une valeur de 12,5 cm.

Les plaques d'aluminium sont de forme rectangulaire (longueur = 300 mm, largeur = 70 mm et épaisseur = 1 mm) ont été employées comme électrodes (anode et cathode). La distance entre les électrodes est optimisée à 20 mm. Les électrodes ont été introduites dans la colonne du compartiment riser.

L'intensité du courant appliquée aux bornes des électrodes a été assurée par une alimentation stabilisée à courant continu (Générateur de courant).

Exemple des résultats de traitement d'un polluant de textile industriel et de défluoration :

Le rejet traité est une eau de textile de teinte rouge constitué de deux produits toxiques (naphtol et l'acide naphtoiique), les analyses de l'effluent ont dévoilés une Demande Chimique d'oxygène (DCO) initiale de 2500 mg/l et une absorbance (coloration) initiale de 0.25, avec le procédé discontinue (sans pompe), un volume de rejet traité de 20 l. Il a fallu appliquer une densité de courant de 17,14 mA/cm² pendant 15 minutes de traitement pour diminuer la DCO à 80% (figure 1) et atteindre une absorbance proche de celle d'une eau potable (absorbance = 0.05), cela nous a permis d'être compétitifs, et de classer notre appareil parmi les premiers procédés propres de traitement des eaux au niveau mondiale.

Exemple de résultats de traitement d'un effluent minéral synthétisé (eau contaminé avec le fluor)

Cette étude nous a particulièrement intéressé en raison du sérieux problème que rencontre notre pays pour le traitement des eaux souterraines dans certaines villes exp. :KHERIBGA et les régions environnantes.

Pour cela, différentes charges initiales on été essayés allant jusqu'à 30 mg/l des ions fluorures. 10 minutes étaient suffisantes pour une densité de 17,14 mA/cm² pour ramener les 20 L à traiter à 1,5 mg/l (Norme mondiale de santé pour les fluorures) (figure 2).

Lois régissant le fonctionnement :

La position des électrodes dans le compartiment Riser à été étudiée, chaque variation de position ou de densité de courant génère une vitesse de liquide circulant différente, pour cela après chaque variation de la position d'électrodes, on réalisait des mesure d'absorbance et de turbidité pour s'assurer de la stabilité du floc formé. Ainsi une relation a été déterminée entre la vitesse du liquide dans le downcomer, la densité de courant j et la hauteur de dispersion h_D (voir schéma de l'appareil figure 5).

$$U_{Ld} = 5.8 \cdot \left(\frac{h_D}{h_{Dmax}} \right) \cdot j^{0.20} \quad (I)$$

U_{Ld} : Vitesse du liquide dans le compartiment Downcomer (cm/s)

j : Densité de courant (intensité appliquée/surface de l'électrode) exprimée en mA/cm².

h_D : Hauteur de dispersion : distance entre le bat de l'électrode et la surface libre du réacteur (parcours des bulles).

h_{Dmax} : Hauteur maximum du dispersion correspondant à la position basse des électrodes dans le riser.

Le débit Q (litre/s) peut être déduit :

$$Q = U_{ld} * A_d \quad \text{(II)}$$

A_d est l'aire de la section droite de la colonne « downcomer ».

Dans notre cas, le downcomer est une colonne cylindrique de diamètre d .

Pour tous les polluants traités les résultats d'études ont révélé que la destruction ou l'érosion des floes est une fonction de la vitesse du liquide, donc du débit de liquide induit dans le réacteur.

Pour l'exemple du colorant de textile, la vitesse maximale du liquide au (downcomer) qu'on peut atteindre tout en gardant un floe stable est 8 cm/s, valeur à partir de laquelle la vitesse du liquide devient importante entraînant ainsi une partie du floe en bas de l'appareil, l'efficacité s'affaiblit dans ce cas (figure 3).

Le phénomène de destruction, ou la simple érosion du floe, a été aussi exprimé en terme de temps de séjour τ du liquide qui parcourt la zone de séparation du réacteur :

$$\tau = V_s / Q \quad \text{(III)}$$

V_s est le volume de la zone de séparation, Q est le débit de l'effluent induit par une combinaison des deux paramètres (la position des électrodes et la densité de courant) comme le stipule les relations (I) et (II). La figure 4 montre l'absorbance en fonction du temps de séjour dans le cas du rejet Rouge de textile. Nous avons constaté que l'absorbance atteint une valeur proche de 0.05, le temps de séjour doit être alors supérieure ou égale à 50 secondes.

Ce réacteur fonctionne aussi en continu c'est-à-dire en tant que réacteur ouvert doté d'une entrée et une sortie (avec pompe ou une entrée du liquide entraîné), notre appareil présente donc une simplicité de changement d'échelle du discontinu vers le continu, tout en gardant les mêmes performances. Notons que le changement d'échelle pour un besoin industriel à grand volume, demande juste une prise en compte des lois proposées et une conservation des rapports entre les différentes grandeurs propre au réacteur (Temps de séjour du liquide dans la chambre de séparation supérieur à 50 s (figure 4), rapport surface de l'électrode sur le volume traité, rapport de sections des compartiments, hauteur de la zone de séparation assurant le même rapport volume de la zone de séparation sur le volume total, débit du liquide / volume traité...).

En conclusion :

Le brevet que nous présentons est un réacteur de type gazosiphon à boucle externe dont l'innovation peut se décliner en :

- l'utilisation de ce type de réacteur pour la première fois en tant que réacteur électrochimique pour la dépollution des effluents liquides par électrocoagulation/électroflotation.
- l'introduction de deux électrodes dans le compartiment « riser », dont la position a été calculée de sorte à ce que le débit soit déterminé avec précision dans le but de le conserver à une valeur assurant la stabilité du floc en surface, et un degré de mélange acceptable, pour une bonne efficacité du procédé. Le débit est déduit de la vitesse du liquide dans le downcomer (relation (II)) et cette dernière peut être déduite de la relation (I). Ainsi on peut dimensionner le réacteur en se basant sur le temps de séjour (relation (III)) qui devrait être supérieure ou égale à 50, de ce faite le débit et le volume de la zone de séparation peuvent être calculés en se basant sur les relations (I) et (II).
- l'invention d'un appareil facile à dimensionner adapté à différent type d'utilisations (utilisation domestique pour recycler l'eau de la machine à laver, utilisation dans des grandes production de textile, centrale de traitement des eaux potables) et fonctionnant tant en discontinu qu'en continu.

Schéma du réacteur :

La figure 5 schématise le réacteur gazosiphon (airlift) à boucle externe comme réacteur électrochimique pour la dépollution des effluents liquides où les deux électrodes sont introduites dans le compartiment « riser » à une profondeur calculée pour assurer une circulation du liquide et une stabilité du floc formé.

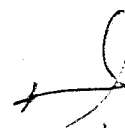
Les différents éléments et du réacteur sont comme suit :

- 1- ampèremètre : pour la mesure du courant électrique introduit
- 2- Générateur de tension continu ou de courant.
- 3- Les électrodes (cathode et anode) : largeur $l = 7$ cm, longueur $H_3 = 30$ cm. distance entre cathode et anode $e = 2$ cm.

- 4- Zone de séparation ou zone de récupération de polluant sous forme de floc : hauteur du liquide dans cette zone est h , hauteur totale est $H_1 = 20$ cm ; H_6 : hauteur de dispersion (h_D), $H_6 + H_4$: hauteur de dispersion maximum (h_{Dmax}).
- 5- Jambe descendante du réacteur : « downcomer ».
- 6- Jambe ascendante du réacteur : « riser » : $H_2 = 107$ cm, $H_3 = 40$ cm, H_4 : distance entre le bas du « riser » et le bas des électrodes entre 47 cm et 58 cm.
- 7- Tube pour maintenir le niveau du liquide constant dans le réacteur et présente la sortie du réacteur lorsqu'il fonctionne en continu.
- 8- Vidange ou entrée du réacteur lorsqu'il fonctionne en continu.

Revendications :

1. Réacteur gazosiphon à boucle externe (external-loop air lift reactor) pour le traitement des effluents liquides par Electrocoagulation/Electroflotation comprenant deux compartiments principaux : Riser (6) et Downcomer (5) **caractérisé en ce que** deux électrodes (3) sont introduites dans le compartiment « riser » (6) à une profondeur calculée pour assurer une circulation du liquide et une stabilité du floc formé. L'énergie électrique, produite par un générateur de tension ou de courant (2) réalise d'une part la dissociation de l'anode, qui forme un coagulant, et d'autre part la génération des bulles d'hydrogène qui provoquent une circulation du liquide, donc une homogénéisation du réacteur, et aussi une flottation des particules coagulées. Ces dernières forment ainsi un floc à la surface du réacteur qui peut être récupéré facilement par raclage ou simple débordement.
2. Réacteur gazosiphon à boucle externe (external-loop air lift reactor) selon la revendication 1 **caractérisé en ce que** les dimensions du réacteur sont faites en respectant d'une part les différents rapports et d'autre part en se basant sur les relations (I), (II) et (III) de manière à ce que les bulles formées ne recirculent pas dans le downcomer (5) et servent seulement à faire flotter et faire circuler le liquide sans détruire le floc formé
3. Réacteur gazosiphon à boucle externe (external-loop airlift reactor) selon les revendications 1 et 2 **caractérisé en ce que** l'élimination de fluorures, de nitrates, de phosphate, de Chrome, de Cadmium, d'Arsenic et le traitement des eaux de textile sont réalisés par électrocoagulation dans ce réacteur.
4. Réacteur gazosiphon à boucle externe (external-loop airlift reactor) selon les revendications 1, 2 et 3 **caractérisé en ce que** le traitement d'une eau de textile contenant deux polluants : acide naphthoïque-2 et le naphthol-2 est réalisé par électrocoagulation dans ce réacteur.
5. Réacteur gazosiphon à boucle externe (external-loop airlift reactor) selon les revendications précédentes **caractérisé en ce que** ce réacteur fonctionne en continu.



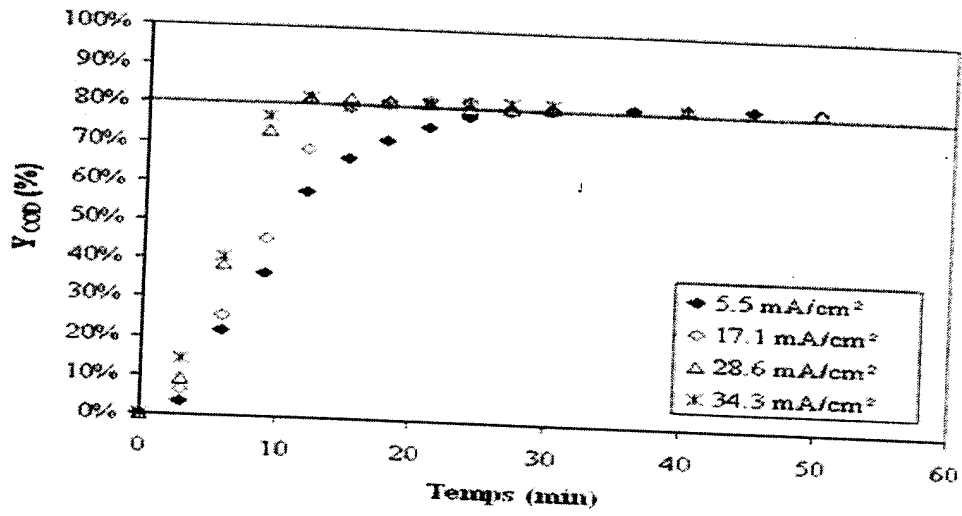


Figure 1

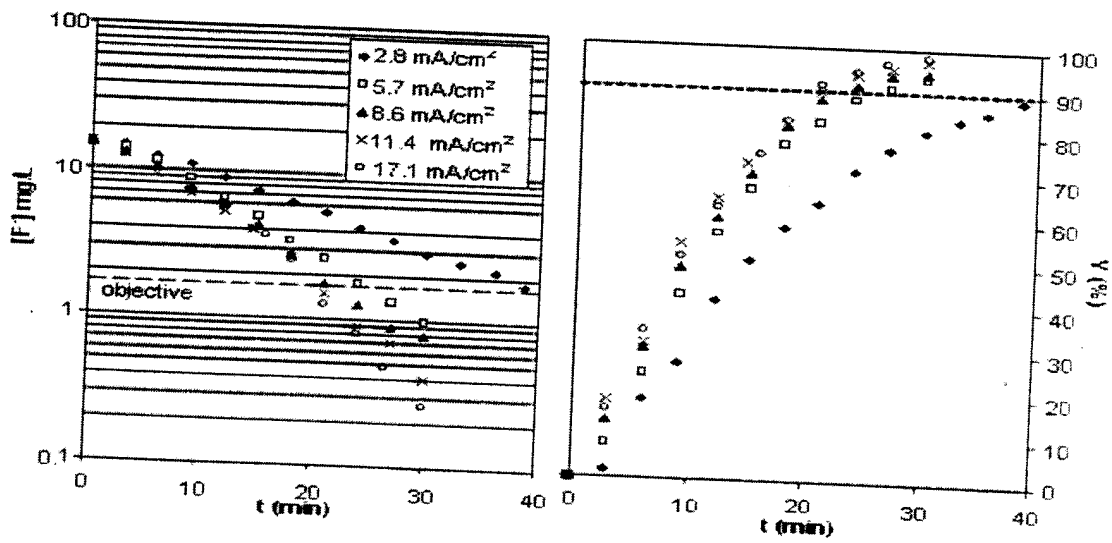


Figure 2

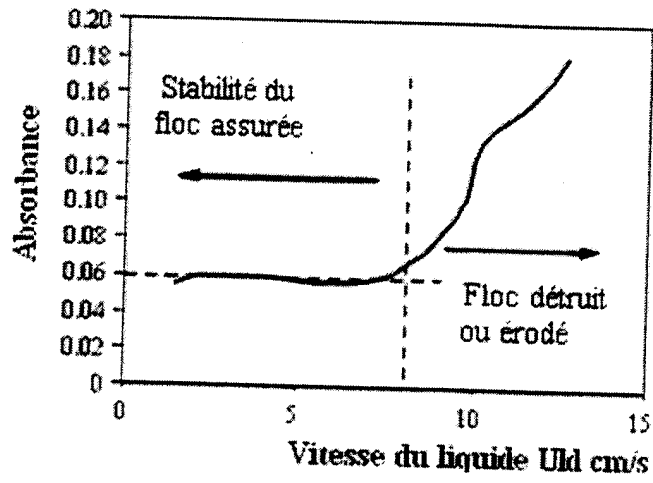


Figure 3

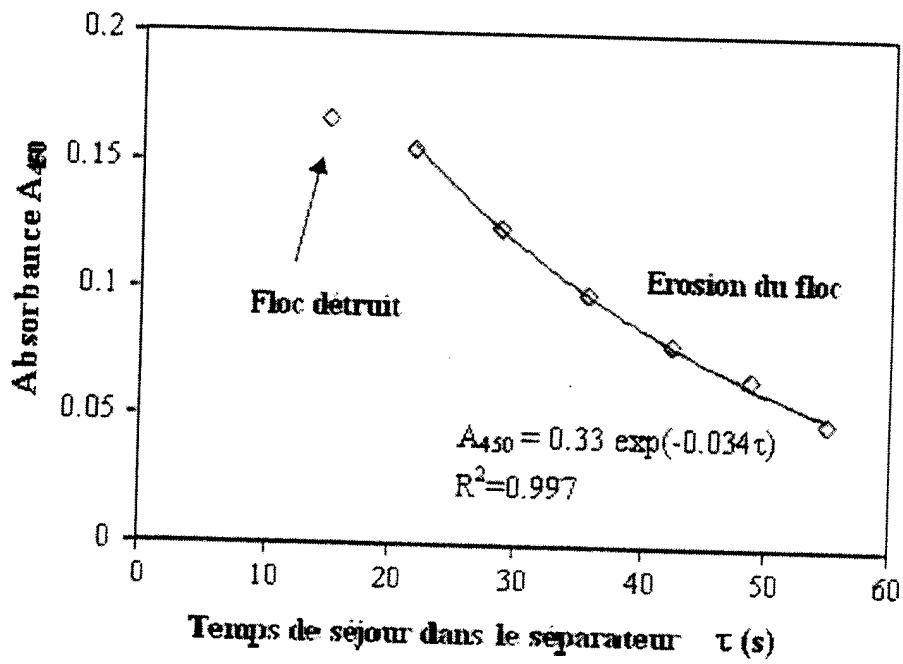


Figure 4

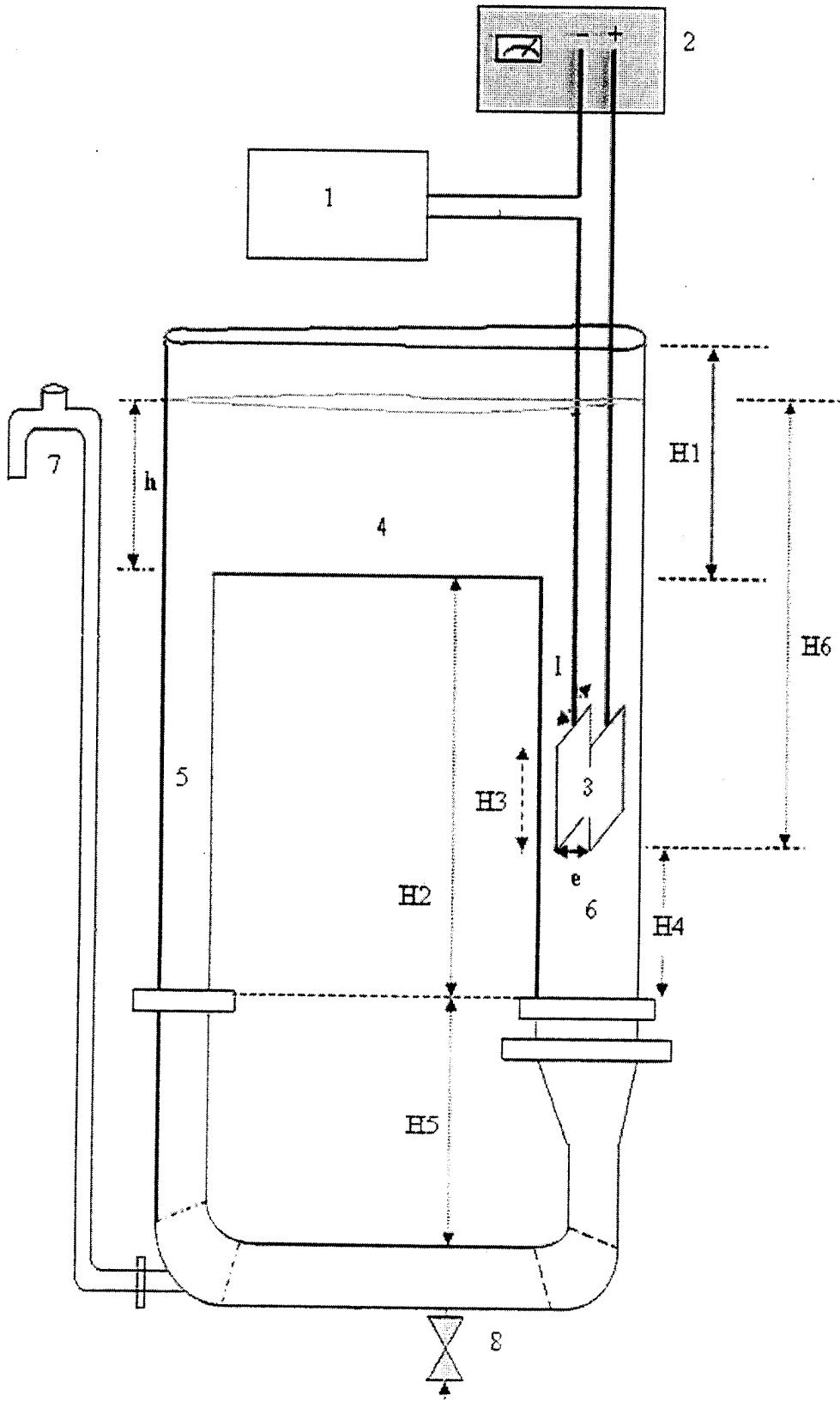


Figure 5