

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

①1 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 573 779

②1 N° d'enregistrement national :

84 18094

⑤1 Int Cl* : C 25 B 11/06, 1/04.

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 28 novembre 1984.

③0 Priorité :

④3 Date de la mise à disposition du public de la
demande : BOPI « Brevets » n° 22 du 30 mai 1986.

⑥0 Références à d'autres documents nationaux appa-
rentés :

⑦1 Demandeur(s) : *Etablissement public dit : CENTRE NA-
TIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS). —
FR.*

⑦2 Inventeur(s) : Louis Nadjjo et Bineta Keita.

⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire(s) : Michel Nony.

⑤4 Nouvelles électrodes activées à l'aide d'hétéropolyacides, leur préparation et leur application, notamment comme cathodes pour l'électrolyse de l'eau en milieu acide.

⑤7 L'invention concerne notamment des électrodes activées par traitement avec au moins un hétéropolyacide, et leur préparation par un procédé consistant principalement à mettre en contact l'électrode à traiter avec une solution aqueuse d'hétéropolyacide de faible concentration, en milieu acide, puis à appliquer à ladite électrode un potentiel cathodique. Le matériau d'électrode peut être tout matériau conducteur, y compris Au, Hg, Pt, W, le carbone vitreux ou le graphite. Les matériaux ainsi traités sont stables et conservent indéfiniment leurs propriétés catalytiques.

Application notamment à la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau en milieu acide avec une cathode ainsi traitée.

FR 2 573 779 - A1

La présente invention a pour objet de nouvelles électrodes activées à l'aide d'hétéropolyacides, leur préparation et leur application, notamment comme cathodes dans des cellules d'électrolyse.

On sait que de nombreuses recherches sont actuellement effectuées dans le but de trouver des produits pouvant être substitués aux combustibles fossiles, et il est généralement admis que l'hydrogène sera dans l'avenir un produit de remplacement important.

Les méthodes industrielles de production d'hydrogène consistent, soit à réduire l'eau par le carbone ou les hydrocarbures, en fournissant de l'énergie, soit à décomposer l'eau par électrolyse.

Les techniques chimiques de réduction de l'eau présentent l'inconvénient d'utiliser comme produits de départ des combustibles fossiles, et fournissent de l'hydrogène moins pur que l'électrolyse de l'eau. En outre, ces techniques de réduction chimique de l'eau entraînent la formation de gaz carbonique dont on cherche actuellement à limiter les rejets.

L'électrolyse de l'eau est une technique potentiellement intéressante. Toutefois, pour électrolyser l'eau avec une vitesse appréciable, il est nécessaire d'appliquer une surtension relativement élevée qui implique une dépense d'énergie électrique supplémentaire.

Il est certes théoriquement possible de réduire au minimum ces surtensions par l'utilisation de cathodes à revêtement de platine, mais le platine est trop coûteux pour permettre d'obtenir l'hydrogène électrolytique à des prix de revient compétitifs même si on arrive à diminuer la charge de platine par unité de surface d'électrodes.

La présente invention a pour objet un nouveau procédé d'activation d'électrodes qui permet notamment d'utiliser comme cathodes des matériaux tels que le carbone vitreux ou le graphite, bien connus pour leur forte surtension de dégagement d'hydrogène, avec des performances égales ou même supérieures à celles du platine.

L'invention permet donc l'utilisation d'électrodes qui sont réalisées en un matériau peu coûteux, et qui présentent en outre l'avantage de n'être pas sensibles à la présence d'impuretés connues pour avoir un effet d'empoisonnement des catalyseurs de la réaction de dégagement d'hydrogène.

D'une façon générale, la présente invention a pour objet des électrodes constituées par un matériau conducteur dont la surface est activée par traitement à l'aide d'au moins un hétéropolyacide.

Les hétéropolyacides sont des acides dérivés de deux ou plusieurs autres acides, tels que les anions de chaque acide conservent leur identité structurale au sein du radical complexe ou de la molécule formée. Le terme

hétéropolyacide est attribué plus particulièrement aux acides complexes dans lesquels tous les anions sont formés d'oxydes.

On sait que les hétéropolyacides, notamment ceux dérivés du tungstène et du molybdène, constituent une série d'espèces chimiques qui ont fait l'objet de nombreuses études et dont l'analogie de propriétés a été mise en évidence dans plusieurs domaines.

Les hétéropolyacides, ou les hétéropolyanions correspondants, leur préparation et certaines de leurs propriétés ont été décrits notamment dans les ouvrages suivants :

Nouveau Traité de Chimie Minérale, sous la direction de Paul Pascal, tome XIV, en particulier pages 17-19 et 903-981 ; P. Souchay, "Polyanions et polycations" Gauthier-Villars Editeur, Paris, 1963 ; et P. Souchay, "Ions minéraux condensés" Masson et Cie Editeurs, Paris, 1969.

On sait que les hétéropolyacides proviennent de l'association de certains anhydrides métalliques avec des acides oxygénés, cette association étant complétée par la fixation éventuelle d'eau. On obtient ainsi toute une série de complexes appelés hétéropolyacides, qui sont particulièrement nombreux dans le cas des anhydrides molybdique et tungstique.

En outre, il est possible de substituer partiellement l'anhydride vanadique aux anhydrides molybdique et tungstique.

Parmi les acides qu'il est possible d'associer aux anhydrides mentionnés ci-dessus, on citera notamment les acides silicique, phosphoriques, orthoborique, germanique, arsénique, antimonique, etc...

On sait que l'on caractérise habituellement ces hétéropolyacides par le rapport M/X,

avec M=Mo ou W ou encore partiellement V,
et X=B, Si, Ge, P, As, Sb, etc...

Les hétéropolyacides, qui sont préparés, de façon générale, par l'action des anhydrides des métaux considérés sur des solutions des acides oxygénés choisis, en milieu acide, se transforment souvent les uns en les autres en fonction notamment du pH. En outre, on peut souvent isoler plusieurs hydrates.

On les représente généralement par une formule simplifiée faisant apparaître d'une part le nombre d'hydrogènes acides et d'autre part les anions, puisque, comme indiqué précédemment, les anions conservent leur identité dans les hétéropolyacides.

On peut également représenter ces acides ou les anions correspondants de façon encore plus simple avec une formule abrégée faisant apparaître les hydrogènes acides et les atomes constituant les anions, comme cela sera montré plus loin sur des exemples.

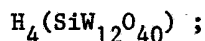
Les hétéropolyacides les plus courants sont ceux dans lesquels le rapport M/X est égal à 12. On appelle généralement ces polyacides : "hétéropolyacides de la série 12". Ces produits peuvent être facilement préparés, et plusieurs d'entre eux sont des produits commerciaux.

Les hétéropolyanions de la série 11 (pour lesquels le rapport M/X est égal à 11) se transforment en acides de la série 12 en milieu suffisamment acide, de sorte que l'utilisation de produits de la série 11 comme produits de départ revient à utiliser en fait, en milieu fortement acide, les produits de la série 12.

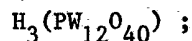
D'autres séries d'hétéropolyacides peuvent être utilisées pour le traitement d'activation d'électrodes selon l'invention.

Parmi les hétéropolyacides, on peut citer notamment les acides :

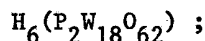
- silico-12-tungstique de formule abrégée



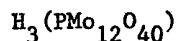
- phospho-12-tungstique de formule abrégée



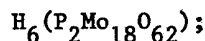
- 2-phospho-18-tungstique de formule abrégée



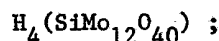
- phospho-12-molybdique de formule abrégée



- 2-phospho-18-molybdique de formule abrégée



- silico-12-molybdique de formule abrégée



- boro-12-tungstique ;

- germano-12-tungstique .

- 2-arsénio-18-tungstique ;

- phospho-12-molybdique ;

- 2-phospho-5-molybdique ;

- germano-12-molybdique.

Parmi les hétéropolyacides utilisables selon l'invention, on peut également citer les dérivés d'hétéropolyacides dans lesquels le vanadium remplace partiellement le molybdène ou le tungstène, par exemple les dérivés germanovanadomolybdiques de formule $H_4(GeMo_{10}V_2O_{39})$, ou les analogues germanovanadotungstique, phosphovanadomolybdique, phosphovanadotungstique, silicovanadomolybdique, silicovanadotungstique, etc. Ces dérivés doivent être considérés comme des dérivés de la série 12, car leur formule est du type $XM_xV_y \dots$, avec $x+y=12$.

L'invention s'étend à l'utilisation des produits de réduction des hétéropolyacides, tels que par exemple les composés appelés dérivés céruléo-molybdiques et céruléo-tungstiques.

La présente invention a donc pour objet de nouvelles électrodes activées, caractérisées par le fait qu'elles sont activées par traitement avec au moins un hétéropolyacide.

Une caractéristique des électrodes de l'invention est que la présence, sur la surface de l'électrode traitée, des éléments constitutifs de l'hétéropolyacide, peut être mise en évidence par des techniques d'analyse appropriées telles que par exemple la technique de spectroscopie d'électrons pour l'analyse chimique, dite aussi méthode E.S.C.A. (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) ; voir par exemple KANE et LARRABEE, Characterization of Solid Surfaces, Plenum Press (1974).

L'invention a notamment pour objet des électrodes à la surface desquelles sont déposées des formes réduites d'hétéropolyacides.

Les matériaux d'électrodes qui peuvent être activés à l'aide d'hétéropolyacides sont tous les matériaux conducteurs d'électricité utilisables comme électrodes, en particulier des métaux et également des matériaux connus à base de carbone conducteur tels que par exemple le carbone vitreux ou le graphite.

L'invention a également pour objet l'utilisation d'au moins un hétéropolyacide, ou d'une forme réduite d'une hétéropolyacide, dans le traitement d'activation d'une électrode, et en particulier l'utilisation d'au moins un hétéropolyacide mentionné précédemment.

Le procédé de traitement d'activation des électrodes à l'aide d'hétéropolyacides est caractérisé par le fait que l'on met en contact, en milieu acide, ladite électrode avec une solution aqueuse diluée d'au moins un hétéropolyacide, et que l'on porte ladite électrode à un potentiel cathodique.

De préférence, on opère à pH inférieur à 3. On opère notamment à un pH allant de 0 à 3, et de préférence de 0 à 1.

On effectue le traitement en particulier dans une solution aqueuse d'un acide fort, tel que par exemple l'acide sulfurique, l'acide chlorhydrique, l'acide perchlorique, etc..

Bien entendu, le traitement est effectué avec un hétéropolyacide qui est stable au pH de traitement.

De préférence, la solution de traitement d'électrodes contient l'hétéropolyacide à une faible concentration, en particulier à une concentration inférieure à 10^{-3} mole/l, et notamment inférieure à 10^{-4} mole/l.

Généralement, la concentration de l'hétéropolyacide est comprise entre des concentrations de l'ordre de 10^{-8} M et des concentrations de l'ordre de 10^{-3} M.

On applique à l'électrode en contact avec la solution de traitement une tension cathodique suffisante pour obtenir à ladite électrode une forme réduite de l'hétéropolyacide. Pour cela, on applique à l'électrode ledit potentiel cathodique et on réduit l'hétéropolyacide de départ par électrolyse.

Généralement, on soumet l'électrode à traiter à un potentiel pouvant aller de -0,4 à -1,3 volt par rapport à l'électrode saturée au calomel.

On observe que le courant augmente avec le temps et finit par se stabiliser, à une valeur élevée (cette stabilisation correspond à la vitesse maximale de dégagement de l'hydrogène au potentiel de l'électrode). L'électrode peut alors être considérée comme traitée. La période de traitement est d'autant plus courte que le potentiel de traitement est plus négatif. Le temps de traitement varie généralement de 3 à 60 minutes environ.

Sur l'électrode non traitée, l'étude du comportement électrochimique des hétéropolyanions par voltamétrie cyclique, montre, avant la vague de réduction des protons, plusieurs vagues de réduction réversibles à la vitesse de balayage de 100mV/s. Selon le degré d'avancement du traitement de l'électrode, le potentiel de réduction des protons se déplace de plus en plus dans le sens positif, ce qui empêche progressivement l'observation éventuelle des vagues de réduction de l'hétéropolyanion.

Les électrodes ainsi traitées conservent leurs propriétés sans précautions de protection particulières. Ainsi une électrode traitée et stockée à l'air ou dans de l'eau pendant plus de trois mois, puis plongée à nouveau dans la solution d'hétéropolyacide, présente, sans période d'induction, l'activité observée en fin de traitement.

De même, on constate que l'électrode ainsi stockée, puis plongée dans une solution sans hétéropolyacide, a conservé son activité dans la réaction de dégagement de l'hydrogène par électrolyse.

Bien entendu, le traitement des électrodes peut aussi être effectué in situ, au début d'une opération d'électrolyse de l'eau en milieu acide, en ajoutant simplement l'hétéropolyacide au bain d'électrolyse.

L'invention a également pour objet un procédé d'électrolyse dans lequel on utilise comme électrode une électrode activée à l'aide d'un hétéropolyacide, telle que définie précédemment.

L'invention concerne notamment l'utilisation d'une telle électrode comme cathode d'électrolyse dans un électrolyte solide ou liquide, et en particulier dans une opération d'électrolyse de l'eau en milieu acide.

Il est évident pour les spécialistes que la méthode d'activation d'électrodes selon l'invention présente de nombreux avantages.

Le traitement utilise des produits non volatils et non toxiques qui ne présentent donc pas de dangers de pollution.

Le procédé de préparation des électrodes est particulièrement facile à mettre en oeuvre.

Les hétéropolyacides présentent une très grande stabilité dans un domaine de températures allant depuis des températures de l'ordre de -70°C jusqu'à des températures supérieures à $+250^{\circ}\text{C}$.

La durée de stockage à l'air ou à l'eau des électrodes traitées est pratiquement infinie.

Un point très important est que ces électrodes, contrairement aux électrodes à base de métaux précieux, sont insensibles aux polluants habituels qui agissent comme poisons du catalyseur. Il faut noter à ce propos que le traitement peut donc être effectué avec des hétéropolyacides de degré de pureté commerciale, sans que cela nuise à l'efficacité des électrodes traitées. Il s'agit là d'un avantage extrêmement important car on sait que l'activité des électrodes à base de métaux précieux est rapidement amoindrie par les impuretés qui agissent comme poison entravant l'activité catalytique.

Un autre avantage des électrodes traitées selon l'invention est leur grande stabilité en fonctionnement, même sous de fortes densités de courant.

On notera enfin que l'avantage économique apporté par le procédé de l'invention est très important, compte tenu du coût modique des matériaux tels que le carbone, dont l'utilisation industrielle comme cathode à hydrogène était jusqu'à présent impossible en raison de la trop forte surtension de dégagement d'hydrogène observée pour ces matériaux.

Une expérience type de durée de fonctionnement a été faite avec des électrodes de carbone vitreux activées selon le procédé de l'invention.

Les densités de courant dans les électrolyseurs industriels vont de $0,1 \text{ A.cm}^{-2}$ à 1 A.cm^{-2} . Les tests de durée ont donc été faits avec une densité de courant de 1 A.cm^{-2} . Les résultats sont indiqués dans l'exemple 1 ci-après.

La comparaison avec l'électrode de platine est la plus significative. Les densités de courant obtenues sur platine ne peuvent se maintenir dans le temps sans surtension supplémentaire qu'à condition que les solutions électrolysées soient très pures. En effet, des concentrations de l'ordre de 10^{-5} M de certains ions comme Pb^{2+} et Hg^{2+} suffisent à empoisonner les catalyseurs au platine ou au palladium ; voir par exemple A. HELLER, E. AHARON-SHALOM, W.A. BONNER et B. MILLER, J. Am. Chem. Soc. 104 (1982) 6942, et J.A. BRUCE, T. MURAHASHI et M.S. WRIGHTON, J. Phys. Chem. 86 (1982) 1552.

Au contraire, aucune précaution particulière n'est prise dans le cas de la présente étude et même le mercure déposé sous forme d'électrode stationnaire sur l'or a pu être activé.

Comme preuve supplémentaire de la résistance du catalyseur aux polluants, divers acides d'origines diverses (HCl , HClO_4 , H_2SO_4) ont été utilisés sans purification préalable, et cela sans aucun inconvénient.

Cette insensibilité aux ions polluants de l'électrode traitée selon l'invention est particulièrement intéressante pour l'utilisation dans les électrolyseurs à électrolyte polymère solide.

Les électrodes de carbone vitreux et de graphite traitées selon l'invention ont fonctionné sous une densité de courant de 1 A. cm^{-2} pendant plus de 1000 heures sans aucun signe de défaillance. Les volumes d'hydrogène par heure et par unité de surface d'électrode correspondent pratiquement, dans le cas du carbone vitreux, à un rendement de 100% en courant.

D'autres avantages ressortiront des études d'activité et de durée rapportées dans la partie expérimentale ci-après.

Les exemples suivants illustrent l'invention sans toutefois la limiter.

EXEMPLE 1

L'électrode soumise au traitement est en carbone vitreux (origine : Carbone-Lorraine). On plonge cette électrode dans une solution aqueuse d'acide sulfurique de $\text{pH}=0$ contenant $4,8 \cdot 10^{-5} \text{ M}$ de $\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}\text{H}_4$.

Cette électrode de carbone vitreux est potentiostatée à $-1,2 \text{ V}$, par rapport à l'électrode au calomel saturée.

La contre électrode en platine est dans un compartiment qui est séparé du compartiment contenant l'électrode de travail et la référence par un fritté de porosité 4.

L'électrolyte est le même dans les deux compartiments.

La densité de courant monte progressivement puis se stabilise au bout de 3 minutes environ.

La courbe intensité-potentiel obtenue à la suite de ce traitement correspond à la réaction de dégagement d'hydrogène. L'analyse de cette courbe permet la détermination de la densité de courant d'échange pour cette réaction. Typiquement, on obtient $\log i_o = -2$ (i_o en A. cm^{-2}).

Avant traitement, on obtenait sur la même électrode en l'absence de $\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}\text{H}_4$ une densité de courant d'échange beaucoup plus faible ($\log i_o = -7,2$) pour la réaction de dégagement d'hydrogène. A cette variation de courant d'échange correspond un gain en potentiel de l'ordre de 1 Volt. (voir tableau II ci-après).

La même électrode a été utilisée pour un test de durée. Dans ce

dernier cas, l'électrolyte est une solution aqueuse d'acide sulfurique 3N et la densité de courant, mesurée à - 0,5V par rapport à l'électrode au calomel saturée, est de 1 A.cm^{-2} . L'hydrogène a été identifié par chromatographie et la mesure de sa quantité ($416 \text{ ml.h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) correspond à un rendement de 100% en courant. La durée du test est supérieure à 1500 heures. On ne constate aucune tendance à l'empoisonnement de l'électrode activée.

L'analyse E.S.C.A. d'une électrode de carbone vitreux avant et après traitement montre pour la surface modifiée la présence des éléments Si et W.

EXEMPLE 2

Caractérisation des électrodes traitées selon l'invention.

La caractérisation quantitative des matériaux, avant et après traitement, a été faite par détermination des densités de courants d'échange, i_0 , comparées à celle du platine. Les résultats sont rassemblés dans le tableau I ci-après sous forme de $(-\log i_0)$. Les résultats après traitement soutiennent avantageusement la comparaison avec les meilleures cathodes à hydrogène de la littérature. En effet, les courants d'échange les plus importants observés sur métaux nus sont dans l'ordre suivant (entre parenthèses sont données les valeurs extrêmes de $-\log i_0$) :

Pd (3,3 à 2,8) > Pt (3,5 à 2,9) > Re (3) > Rh (3,6 à 3,2) > Ru (4,2)

Référence : S. TRASATTI, J. Electroanal. Chem. 39 (1972) 163.

Il apparaît, à la lecture du tableau I, que dans tous les cas, et quelle que soit la nature du matériau utilisé, une amélioration considérable et spectaculaire est obtenue. Il faut remarquer plus particulièrement le cas du carbone vitreux (CV) traité, qui devient environ dix fois plus performant que le platine. De plus, ce matériau est peu coûteux. Les résultats concernant le graphite ne figurent pas dans le tableau I, car sa surface réelle est trop mal connue. Cependant, les observations sont tout à fait identiques à celles obtenues avec les autres matériaux. Ce dernier exemple est très important à cause du coût très faible du graphite, et de sa grande surface, qui l'ont déjà fait adopter, en association avec des catalyseurs au platine, dans certains électrolyseurs en milieu acide.

D'un point de vue pratique, il est encore plus frappant de décrire les améliorations apportées aux divers matériaux au cours de leur fonctionnement réel. Le tableau II ci-après rassemble les valeurs de potentiel, mesurées par rapport à l'électrode au calomel saturée (ECS) pour une densité de courant fixée, avant et après traitement des matériaux selon la méthode décrite à l'exemple 1. Dans tous les cas, on observe un gain considérable en potentiel et les résultats décrits à l'exemple 1 attestent de la stabilité des performances en cours de fonctionnement.

TABLEAU I

Densités de courant d'échange pour la réaction de dégagement d'hydrogène sur divers matériaux avant et après modification selon le procédé de l'invention.

Matériau	$-\log i_0$ (avec i_0 en A. cm ⁻²)
Pt	3 à 3,3
Pt modifié	2,5 à 2,8
Au	5,7
Au modifié	2,5
W	6,8
W modifié	2,6
CV (carbone vitreux)	7,2 à 8,5
CV modifié	2 à 2,3
Hg	11 à 12,7
Hg modifié	3,9 à 4,1

TABLEAU II

Améliorations en potentiel ΔE_i mesurées pour la réaction de dégagement d'hydrogène. E_i désigne le potentiel mesuré lorsque la densité de courant est $i = 1,5 \text{ mA.cm}^{-2}$, avant et après modification de l'électrode. Les valeurs de E_i sont tirées des voltammogrammes obtenus à une vitesse de balayage de 100 mV/s en milieu 1N H_2SO_4 .

Matériau	$-E_i$ (Volt/E.C.S.)	ΔE_i (Volt)
Pt	0,30	0,03
Pt* modifié	0,27	
Au	0,60	0,38
Au* modifié	0,22	
W	0,56	0,35
W* modifié	0,21	
CV (carbone vitreux)	1,25	1,08
CV* modifié	0,17	
Hg	1,30	0,90
Hg modifié	0,40	

* Les électrodes ont été traitées, comme décrit à l'exemple 1, dans une solution

$(\text{H}_2\text{SO}_4, \text{pH} = 0)$ à $4,8 \cdot 10^{-5}$ M de $\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}\text{H}_4$.

REVENDICATIONS

1. Electrodes activées constituées en matériau conducteur d'électricité, caractérisées par le fait qu'elles sont activées par traitement avec au moins un hétéropolyacide, et que les éléments constitutifs dudit hétéropolyacide sont présents sur la surface de l'électrode traitée.
2. Electrodes selon la revendication 1, caractérisées par le fait que lesdits éléments constitutifs dudit hétéropolyacide sont le molybdène ou le tungstène, éventuellement en association avec le vanadium.
3. Electrodes selon la revendication 2, caractérisées par le fait que lesdits éléments constitutifs comprennent, en outre, au moins un élément choisi parmi le bore, le silicium, le germanium, le phosphore, l'arsenic et l'antimoine.
4. Electrodes selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisées par le fait que ledit matériau conducteur est à base de carbone.
5. Electrodes selon la revendication 5, caractérisée par le fait que ledit matériau est du carbone vitreux.
6. Electrodes selon la revendication 4, caractérisée par le fait que ledit matériau est du graphite.
7. Procédé de préparation des électrodes activées telles que définies dans l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé par le fait que l'on met en contact une électrode constituée par un matériau conducteur d'électricité, en milieu acide, avec une solution aqueuse diluée d'au moins un hétéropolyacide, et que l'on porte ladite électrode à un potentiel cathodique.
8. Procédé selon la revendication 7, caractérisé par le fait que l'on opère à pH inférieur à 3.
9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 7 et 8, caractérisé par le fait que la solution de traitement d'électrodes contient l'hétéropolyacide à une concentration inférieure à 10^{-3} mole/l.
10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 7 à 9, caractérisé par le fait que la concentration en hétéropolyacide de la solution de traitement est comprise entre des concentrations de l'ordre de 10^{-8} M et des concentrations de l'ordre de 10^{-3} M.
11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 7 à 10, caractérisé par le fait qu'en outre, on applique à l'électrode une tension cathodique suffisante pour obtenir à l'électrode une forme réduite de l'hétéropolyacide.

12. Procédé selon l'une quelconque des revendications 7 à 11, caractérisé par le fait que ledit potentiel cathodique est d'au moins -0,4 volt par rapport à l'électrode au calomel saturée.

13. Procédé selon la revendication 12, caractérisé par le fait que l'on soumet l'électrode à traiter à un potentiel pouvant aller de -0,4 à -1,3 volt par rapport à l'électrode saturée au calomel.

14. Procédé selon l'une quelconque des revendications 7 à 13, caractérisé par le fait que l'on effectue ledit traitement jusqu'à stabilisation du courant.

15. Procédé selon l'une quelconque des revendications 7 à 14, caractérisé par le fait que l'on applique ledit potentiel cathodique pendant 3 à 60 minutes.

16. Procédé selon l'une quelconque des revendications 7 à 15, caractérisé par le fait que l'hétéropolyacide est choisi parmi les hétéropolyacides dérivés du molybdène et du tungstène, ainsi que parmi les dérivés analogues correspondant au remplacement partiel du molybdène ou du tungstène par le vanadium.

17. Procédé selon l'une quelconque des revendications 7 à 16, caractérisé par le fait que l'hétéropolyacide est choisi parmi les acides silico-12-tungstique, phospho-12-tungstique, 2-phospho-18-tungstique, phospho-12-molybdique, 2-phospho-18-molybdique, silico-12-molybdique, boro-12-tungstique, germano-12-tungstique, 2-arsénio-18-tungstique, phospho-12-molybdique, 2-phospho-5-molybdique, et germano-12-molybdique, ainsi que les analogues germanovanadomolybdiques, germanovanadotungstiques, phosphovanadomolybdiques, phosphovanadotungstiques, silicovanadomolybdiques et silicovanadotungstiques correspondants.

18. Utilisation d'au moins un hétéropolyacide, ou d'une forme réduite d'un hétéropolyacide, dans le traitement d'activation d'une électrode.

19. Utilisation selon la revendication 18, caractérisée par le fait que ledit hétéropolyacide est tel que défini dans l'une quelconque des revendications 16 et 17.

20. Application d'une électrode activée telle que définie dans l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisée par le fait que l'on utilise une telle électrode activée dans un procédé d'électrolyse, notamment comme cathode dans un électrolyte solide ou liquide.

21. Application selon la revendication 20, caractérisée par le fait que l'on utilise ladite électrode activée comme cathode dans une opération d'électrolyse de l'eau en milieu acide.