

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

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

3 144 293

②1 N° d'enregistrement national : 22 14295

⑤1 Int Cl⁸ : G 01 N 27/30 (2023.01)

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

⑫② Date de dépôt : 22.12.22.

⑫③ Priorité :

⑫④ Date de mise à la disposition du public de la demande : 28.06.24 Bulletin 24/26.

⑫⑤ Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑫⑥ Références à d'autres documents nationaux apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public local à caractère industriel ou commercial — FR.

⑦② Inventeur(s) : THOMAS Yohann, CHATARD Charles et GOUGIS Maxime.

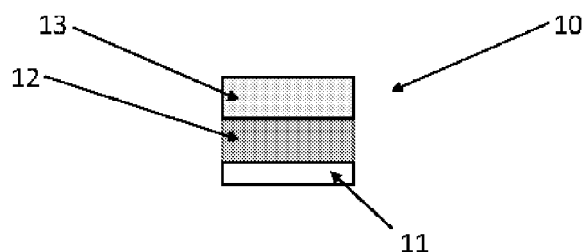
⑦③ Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public local à caractère industriel ou commercial.

⑦④ Mandataire(s) : BREVALEX.

⑤④ ÉLECTRODE SENSIBLE AU PH, SON PROCÉDÉ DE PRÉPARATION ET SES UTILISATIONS.

⑤⑦ La présente invention concerne une électrode sensible au pH (10) comprenant : (i) une couche conductrice (12) disposée sur un support isolant (11) et (ii) une couche sensible au pH (13) disposée sur la couche conductrice (12), ladite couche sensible au pH comprenant un transducteur électrochimique et des éléments sensibles au pH répartis dans cette couche sensible au pH, lesdits éléments sensibles au pH étant choisis dans le groupe constitué par les oxydes de métaux de transition et les molécules redox sensibles au pH. La présente invention concerne également un capteur pH tout solide comprenant une telle électrode et leurs utilisations pour mesurer le pH dans un milieu liquide.

Figure pour l'abrégé : Fig. 2



FR 3 144 293 - A1



Description

Titre de l'invention : ÉLECTRODE SENSIBLE AU PH, SON PROCÉDÉ DE PRÉPARATION ET SES UTILISATIONS

Domaine technique

- [0001] La présente invention appartient au domaine des capteurs électrochimiques utiles pour la détermination de paramètres chimiques, notamment au domaine des capteurs de pH et, en particulier, au domaine des capteurs pH tout solide.
- [0002] La présente invention propose une électrode sensible au pH notamment utile pour un capteur pH tout solide dans laquelle le transducteur électrochimique et les éléments sensibles au pH sont combinés dans une seule et même couche.
- [0003] La présente invention concerne également un procédé de préparation d'une telle électrode sensible au pH ainsi qu'un capteur pH tout solide comprenant une telle électrode et ses différentes utilisations.

ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

- [0004] Le potentiel hydrogène communément noté « pH » correspond à la mesure, en solution, de l'activité chimique des ions hydrogène. Il s'agit de l'un des paramètres chimiques les plus importants pour la surveillance des processus chimiques et biologiques. Il est couramment utilisé, par exemple, dans le domaine médical, dans le domaine des sciences de la vie, dans l'industrie chimique, dans l'industrie alimentaire et notamment lors des procédés de bioproduction et dans la surveillance de l'environnement et notamment dans le suivi de la qualité des eaux.
- [0005] Le pH est généralement mesuré à l'aide d'électrodes de pH en verre. Même si ces dernières ont une bonne sensibilité et une bonne stabilité, elles présentent toutefois un certain nombre d'inconvénients, tels qu'une impédance élevée, une fragilité mécanique, une instabilité dans les solutions très acides et à température élevée, une réponse lente et une vulnérabilité à l'encrassement des membranes. De plus, pour les applications où le volume de la solution dont on souhaite connaître le pH est restreint, les électrodes en verre ne sont pas adaptées en raison des difficultés de miniaturisation.
- [0006] D'autres types de capteurs pH ont donc été proposés pour résoudre les problèmes techniques des électrodes de pH en verre. Parmi ces derniers, on peut citer les capteurs pH tout solide qui ont l'avantage d'être robustes, facilement intégrables et miniaturisables.
- [0007] Ces capteurs pH tout solide comprennent une électrode sensible au pH et une électrode de référence. Il convient de préciser que la mesure du pH est obtenue au travers d'une mesure potentiométrique, i.e. la différence de potentiel entre l'électrode sensible au pH et l'électrode de référence. Le potentiel de l'électrode sensible au pH a,

en effet, une relation linéaire avec le pH de la solution étudiée selon l'équation de Nernst. Le potentiel de circuit ouvert (en anglais « Open Circuit Potential ») mesuré par rapport à l'électrode de référence est donc utilisé pour mesurer le potentiel de l'électrode et déterminer des valeurs caractéristiques du milieu étudié. Etant donnée la relation linéaire du potentiel de l'électrode en fonction du pH, une courbe de calibration peut être réalisée (avec les paramètres déterminés expérimentalement que sont la pente et l'ordonnée à l'origine).

[0008] La relation de Nernst peut s'écrire comme suit :

[0009] [Math.1]

$$E = E_0 + 2,303 \frac{RT}{F} \log[H_3O^+]$$

[0010] Avec E correspondant au potentiel mesuré, E_0 à l'offset, R à la constante des gaz parfaits, T à la température, F à la constante de Faraday. A 25°C et avec $n = 1$, l'équation devient :

[0011] [Math.2]

$$E = E_0 - 0.05916 \text{ pH}$$

[0012] Comme illustré à la [Fig.1], les capteurs pH tout solide comprennent un substrat isolant **1** sur lequel sont disposées l'électrode sensible au pH **2** et l'électrode de référence **3**, les deux électrodes étant séparées l'une de l'autre par un matériau isolant **4** comme un polymère isolant ou une résine isolante.

[0013] L'électrode sensible au pH **2** est constituée de plusieurs couches avec :

[0014] - une couche conductrice **5** en contact avec le substrat isolant **1**, cette couche permet de relier électriquement le capteur à la partie électronique de mesure,

[0015] - une couche de transduction **6** disposée sur la couche conductrice **5**, cette couche permet de convertir une activité d'une espèce en solution en un potentiel électrique et

[0016] - une couche pH **7** disposée sur la couche de transduction **6**, cette couche est la partie sensible du capteur puisqu'elle est sensible à la concentration des protons (donc du pH) dans une solution.

[0017] L'électrode de référence **3** est disposée sur une couche conductrice **8** elle-même en contact avec le substrat isolant **1**, une couche de transduction **9** pouvant éventuellement séparer l'électrode de référence **3** et la couche conductrice **8** i.e. être disposée entre l'électrode de référence **3** et la couche conductrice **8**.

[0018] L'élaboration de l'électrode sensible au pH passe donc par la réalisation de différentes étapes afin d'obtenir les différentes couches constitutives de l'électrode, avec

un premier dépôt de la couche de transduction et un second dépôt de la couche sensible au pH.

[0019] Plusieurs types d'éléments sensibles au pH peuvent être utilisés pour former la couche pH et ont été répertoriés dans la littérature :

[0020] - les oxydes de métaux de transition : IrO_x, RuO_x, WO_x, ...,

[0021] - les polymères comme, par exemple, la polyaniline (PANI) et le polypyrrole (PPY),
et

[0022] - les membranes sélectives ioniques (ou « ISE » en anglais pour « Ion Selective Electrode »), et

[0023] - les molécules redox sensibles au pH telles que la quinone et l'antraquinone.

[0024] La PANI existe avec une variété d'états d'oxydation qui sont à la fois sensibles au pH et au potentiel. Afin d'améliorer ses propriétés, l'ajout de nanomatériaux comme des nanotubes de carbone peut se révéler nécessaire [1].

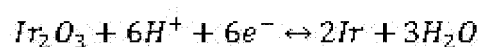
[0025] Les ISE présentent le désavantage de nécessiter des étapes d'activation et/ou de conditionnement. Il est à noter que la composition de la solution de conditionnement ainsi que le temps de conditionnement sont très critiques et impactent très fortement les propriétés de l'électrode sensible au pH ainsi élaborée et, de fait, celles du capteur pH, notamment en termes de sensibilité et de stabilité dans le temps [2].

[0026] Parmi les matériaux sensibles au pH listés ci-dessus, l'oxyde d'iridium est particulièrement apprécié. En effet, il présente de nombreux avantages parmi lesquels une réponse linéaire, résistant aux environnements sévères et une faible résistivité. De plus, sa facilité de fabrication et sa biocompatibilité en font un excellent candidat pour des applications biomédicales.

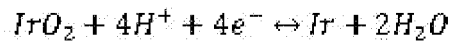
[0027] Le principe de fonctionnement d'un capteur pH réside sur la formation de groupements hydroxyles insolubles à la surface de l'oxyde métallique en solution. Cette formation permet le déplacement des protons entre les groupements hydroxyles et des échanges avec les protons de la solution. En d'autres termes, les interactions entre la surface et le pH de la solution produisent un changement du potentiel de surface. En évidence, la réaction d'équilibre, causée par la sensibilité au pH d'un capteur à base d'oxyde d'iridium, est dépendante de la réaction d'échange électronique comme représentée par les équations ci-dessous qui impliquent les états d'oxydation 3 et 4 de l'iridium.

[0028] Trois possibles mécanismes sont impliqués dans cet équilibre :

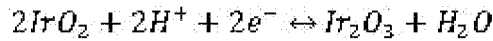
[0029] [Math.3]



[0030] [Math.4]



[0031] [Math.5]



[0032] Par ailleurs, la couche pH à base d'oxydes de métaux de transition peut être obtenue par différentes méthodes comme, par exemple, une électrodéposition, un traitement thermique, un procédé sol-gel mais aussi des méthodes de dépôt de type pulvérisation de métal ou d'oxyde métallique [3]. Ces dernières sont relativement lourdes à mettre en œuvre puisque devant être réalisées en salle blanche.

[0033] D'autres techniques ont été proposées.

[0034] Kampouris *et al*, 2009 mettent en œuvre une couche de transduction à base de carbone, obtenue par sérigraphie [4]. Leur solution comprend néanmoins une étape supplémentaire de fonctionnalisation du carbone par des molécules redox sensibles au pH.

[0035] Jović *et al*, 2018 utilisent un procédé multi-étapes de dépôt par impression jet d'encre [5]. Les auteurs ont réalisé 5 couches successives, chacune constituée d'une couche de polymère en tant que transducteur et d'une couche d'oxyde d'iridium. Par ailleurs, leur substrat nécessite également une préparation préalable aux dépôts.

[0036] Les électrodes sensibles au pH notamment utiles dans les capteurs de pH tout solide sont réalisées en plusieurs étapes de synthèse et, pour certaines, dans des conditions difficilement industrialisables.

[0037] Les inventeurs se sont donc fixé pour but de proposer une électrode sensible au pH pour capteur pH tout solide, susceptible d'être miniaturisée, qui puisse être préparée par un procédé rapide et facile à mettre en œuvre, sans affecter la sensibilité de l'électrode ainsi préparée.

Exposé de l'invention

[0038] La solution proposée par les inventeurs est simple, rapide et peu coûteuse car elle propose de réaliser, en une seule étape et en une seule couche, la partie sensible au pH avec la couche de transduction de l'électrode sensible au pH.

[0039] A la date de l'invention, il n'était pas évident que le fait d'associer, dans une même couche, le transducteur électrochimique et les éléments sensibles au pH permettent d'obtenir des électrodes avec une sensibilité au pH comparable à celle obtenue lorsque ce transducteur et ces éléments se trouvent dans deux couches distinctes et préparées indépendamment l'une de l'autre.

[0040] Ainsi, la présente invention concerne une électrode sensible au pH **10** comprenant :

- [0041] - une couche conductrice **12** disposée sur un support isolant **11** et
- [0042] - une couche sensible au pH **13** disposée sur la couche conductrice **12**, ladite couche sensible au pH comprenant un transducteur électrochimique et des éléments sensibles au pH répartis dans cette couche sensible au pH,
- [0043] lesdits éléments sensibles au pH étant choisis dans le groupe constitué par les oxydes de métaux de transition et les molécules redox sensibles au pH.
- [0044] Une schématisation de l'électrode sensible au pH selon l'invention est donnée à la [Fig.2].
- [0045] Dans ce qui suit et ce qui précède, les expressions « sensible au pH », « sensible aux ions H+ » et « sensible aux ions hydrogène » sont équivalentes et utilisables de façon interchangeable.
- [0046] Comme précédemment expliqué, l'élément essentiel de l'invention est la combinaison, dans une même et unique couche de l'électrode, du transducteur électrochimique et des éléments sensibles au pH répartis dans tout le volume de la couche sensible au pH. En d'autres termes, les éléments sensibles au pH se présentent sous forme dispersée, enrobée et/ou incorporée dans le transducteur électrochimique. On peut également parler d'un transducteur électrochimique fonctionnalisé par les éléments sensibles au pH. Cette organisation est donc clairement différente de l'organisation en deux couches distinctes avec une couche de transduction et une couche sensible au pH ou d'une couche comprenant un transducteur électrochimique, seule la surface de cette couche étant fonctionnalisée par des éléments sensibles au pH.
- [0047] Dans l'électrode selon l'invention, la couche conductrice est appliquée sur, supportée par un support (ou substrat) isolant i.e. la face inférieure de la couche conductrice est en contact direct avec la surface du support isolant. Par conséquent, aucun élément ou aucune autre couche ne se trouve entre la couche conductrice et le support isolant.
- [0048] Le support isolant de l'électrode sensible au pH selon l'invention peut être n'importe quel substrat isolant et notamment n'importe quel substrat isolant typiquement utilisé dans les capteurs de pH tout solide. Il peut également être sensiblement plan ou, au contraire, concave ou convexe et d'une forme quelconque telle qu'une forme carrée, rectangulaire, ronde ou ovale.
- [0049] Avantageusement, le support isolant est en un matériau isolant choisi dans le groupe constitué par le papier, les oxydes non conducteurs, les polymères non conducteurs, les matériaux isolants amorphes, les matériaux isolants cristallins et l'une quelconque de leurs combinaisons.
- [0050] En particulier, le support isolant de l'électrode sensible au pH selon l'invention est en un matériau isolant choisi dans le groupe constitué par le papier, le dioxyde de silicium (SiO_2), l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), l'oxyde de magnésium (MgO), un verre contenant généralement des silicates, un verre de silice, une céramique, du diamant, le

polysulfure de phénylène, le polyéthylèneimine, le polytétrafluoroéthylène, le polyimide, le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polycarbonate, le polyméthyl méthacrylate, le polysulfone, le polyetherimide, le polyether ether cétone, le parylène NTM, le NuflonTM, le silicone, la résine époxyde et l'une quelconque de leurs combinaisons.

- [0051] Le support isolant mis en œuvre dans l'invention peut être souple ou rigide. Il peut s'agir d'un substrat typiquement utilisé pour les circuits imprimés (ou « PCB » pour « Printed Circuit Board »). Un tel type de substrat est généralement constitué de couches isolantes en résine époxyde renforcée par une trame de fibres de verre ou de papier.
- [0052] Plus particulièrement, le support isolant de l'électrode sensible au pH selon l'invention est en un matériau isolant choisi dans le groupe constitué par le papier, une céramique, une résine époxyde éventuellement renforcée par des fibres de verre ou de papier et du polyimide (comme un film de polyimide du type Kapton®).
- [0053] La couche conductrice de l'électrode sensible au pH selon l'invention permet de relier électriquement cette électrode à la partie électronique de mesure. Elle peut être en tout matériau conducteur de l'électricité et notamment n'importe quel matériau conducteur de l'électricité typiquement utilisé dans les capteurs de pH tout solide.
- [0054] Avantageusement, la couche conductrice est en un matériau conducteur de l'électricité choisi dans le groupe constitué par les métaux tels que les métaux nobles, les carbones et les polymères ou copolymères conducteurs de l'électricité.
- [0055] A titre d'exemples de métal utilisable pour la couche conductrice de l'électrode selon l'invention, on peut citer l'or, le cuivre, l'inox, l'argent, le nickel, l'aluminium, le titane, le platine, le palladium, le ruthénium, l'iridium, le molybdène ou un de leurs alliages.
- [0056] A titre d'exemples de carbone utilisable pour la couche conductrice de l'électrode selon l'invention, on peut citer le graphite, le graphite pyrolytique hautement orienté, le graphène, l'oxyde de graphène, l'oxyde de graphène réduit, le carbone, le carbone activé, le carbone vitreux, le noir de carbone, le carbone de type diamant (ou DLC pour « Diamond Like Carbon ») et le diamant dopé avec du bore (ou BDD pour « Boron Doped Diamant »).
- [0057] A titre d'exemples de polymère ou copolymère conducteur de l'électricité utilisable pour la couche conductrice de l'électrode selon l'invention, on peut citer la polyaniline (PANI), le poly(3,4-éthylènedioxythiophène) couplé au poly(styrène sulfonate) de sodium (PEDOT:PSS) et le polypyrrole
- [0058] Dans l'électrode sensible au pH selon l'invention, la couche conductrice a typiquement une épaisseur comprise entre 10 nm et 1 mm, notamment entre 100 nm et 100 µm et, en particulier, entre 1 µm et 20 µm.

- [0059] Dans l'électrode sensible au pH selon l'invention, la couche sensible au pH est appliquée sur, supportée par la couche conductrice i.e. la face inférieure de la couche sensible au pH est en contact direct avec la face supérieure de la couche conductrice. Par conséquent, aucun élément ou aucune autre couche ne se trouve entre la couche conductrice et la couche sensible au pH. A noter que, lorsque l'électrode sensible au pH est utilisée pour connaître le pH d'un milieu liquide, la face supérieure et éventuellement tout ou partie des côtés de la couche sensible au pH de cette électrode est en contact avec ledit milieu liquide. Au contraire, les côtés de la couche conductrice ne doivent pas être en contact avec ce milieu liquide. Pour ce faire, un matériau isolant comme un polymère isolant ou une résine isolante est appliqué sur la couche conductrice que présente l'électrode sensible au pH selon l'invention.
- [0060] Le transducteur électrochimique présent dans la couche sensible au pH de l'électrode selon l'invention est l'élément de cette dernière dont la fonction est de retranscrire la reconnaissance chimique de la couche sensible au pH en un signal électrique i.e. un signal physique mesurable, sensible et facilement exploitable.
- [0061] Tout transducteur électrochimique classiquement utilisé dans les capteurs pH tout solide est utilisable dans le cadre de la présente invention. Typiquement, le transducteur électrochimique présent dans la couche sensible au pH est obtenu à partir de carbones, d'encres carbone ou de polymères semi-conducteurs. Lorsque qu'une encre carbone ou un polymère semi-conducteur est utilisé(e) pour préparer le transducteur électrochimique, ce dernier se présente sous forme d'une matrice polymérique dans laquelle les éléments sensibles au pH sont dispersés, enrobés et/ou incorporés dans l'invention.
- [0062] Le transducteur électrochimique est typiquement choisi parmi les nanomatériaux à base de carbone tel que décrit précédemment pour la couche conductrice de l'électrode comme, par exemple, des nanotubes de carbone mono-paroi ou multi-parois, des nanofils de carbone et du graphène.
- [0063] Par « encre carbone », on entend une encre se présentant sous forme d'une suspension ou dispersion comprenant des charges carbonées, un liant polymérique à partir duquel se forme la matrice polymère du transducteur électrochimique et un solvant du liant polymérique.
- [0064] Par « charges carbonées », on entend, dans l'invention, des charges à base d'un matériau carboné, typiquement nanométriques et se présentant sous forme de poudre, de grains, de paillettes, de particules, de fils, de fibres creuses, de filaments, de tubes, de rubans, de feuillets, de clusters ou d'un de leurs mélanges. A titre d'exemples plus particuliers de charges carbonées, on peut citer des grains de graphite, des paillettes de graphite, des particules de graphite, des grains de graphite pyrolytique hautement orienté, des feuillets de graphène, des feuillets d'oxyde de graphène, des feuillets

- d'oxyde de graphène réduit, du fullerène, des paillettes de carbone vitreux, des particules de carbone vitreux ou des nanotubes de carbone mono-paroi ou multi-parois.
- [0065] Typiquement, le solvant du liant polymérique est un solvant organique, un mélange de solvants organiques, de l'eau ou d'un mélange d'eau et de solvant(s) organique(s). Par « solvant organique », on entend, dans le cadre de la présente invention, un solvant qui appartient à la famille des cétones, des éthers-oxydes, des esters, des alcools, des hydrocarbures notamment aromatiques ou des terpènes.
- [0066] L'encre carbone utilisable dans le cadre de l'invention peut être préparée, de façon extemporanée, en mélangeant ensemble ses différents constituants. En variante, cette encre peut être une encre accessible dans le commerce. A titre d'exemples d'encres commerciales utilisables dans le cadre de la présente invention, on peut citer l'encre à base de graphite C10903P14 (Gwent Electronic. Materials Ltd, Montypool, Royaume-Uni), l'encre à base de carbone BQ242 (DuPont, Bristol, Royaume-Uni) et l'encre à base de carbone pour impression jet d'encre telles que l'encre JR-700 (Novacentrix, Austin, US). Une encre commerciale plus particulièrement utilisable dans le cadre de la présente invention est l'encre à base de carbone BQ242 (DuPont, Bristol, Royaume-Uni).
- [0067] Tout polymère semi-conducteur habituellement utilisé comme transducteur électrochimique et notamment comme transducteur électrochimique dans les capteurs de pH tout solide est utilisable dans le cadre de la présente invention. Typiquement, le polymère semi-conducteur à partir duquel le transducteur électrochimique de la couche sensible au pH de l'électrode selon l'invention est obtenu est du PEDOT :PSS ou du poly(3-octylthiophene-2,5-diyl) (ou « POT » de formule $C_{12}H_{18}S$, polymère conjugué semi-conducteur hydrophobe). Un polymère semi-conducteur plus particulièrement utilisable dans le cadre de la présente invention est le POT. En effet, comme illustré dans la partie expérimentale ci-après, ce polymère permet de préparer des électrodes sensibles au pH avec des propriétés reproductibles.
- [0068] Dans la couche sensible au pH de l'électrode selon l'invention, outre le transducteur électrochimique, on trouve des éléments sensibles au pH choisis dans le groupe constitué par les oxydes de métaux de transition et les molécules redox sensibles au pH.
- [0069] Les oxydes de métaux de transition dans l'électrode sensible au pH selon l'invention peuvent être n'importe quels oxydes de métaux de transition et notamment n'importe quels oxydes de métaux de transition typiquement utilisés dans les capteurs de pH tout solide. Avantageusement, les oxydes de métaux de transition utilisés dans l'invention sont choisis dans le groupe constitué par les oxydes de titane (TiO_2), les oxydes de ruthénium (RuO_2), les oxydes de palladium (PdO_2), les oxydes de platine (PtO_2), les oxydes d'iridium (IrO_2), les oxydes de tungstène (WO_2) et leurs mélanges. En par-

ticulier, les oxydes de métaux de transition utilisés dans l'invention sont choisis dans le groupe constitué par les oxydes de ruthénium (RuO_2), les oxydes d'iridium (IrO_2) les oxydes de tungstène (WO_2) et leurs mélanges. Dans un mode de réalisation particulier, les oxydes de métaux de transition utilisés dans l'invention sont des oxydes de ruthénium (RuO_2). Dans un autre mode de réalisation particulier, les oxydes de métaux de transition utilisés dans l'invention sont des oxydes d'iridium (IrO_2).

- [0070] Avantageusement, les oxydes de métaux de transition utilisés dans l'invention se trouvent sous forme nanométrique et notamment sous forme de poudre, de grains, de paillettes, de particules ou d'un de leurs mélanges.
- [0071] Les molécules redox sensibles au pH dans l'électrode sensible au pH selon l'invention peuvent être n'importe quelles molécules redox sensibles au pH et notamment n'importe quelles molécules redox sensibles au pH typiquement utilisées dans les capteurs de pH tout solide. Avantageusement, les molécules redox sensibles au pH utilisables dans la couche sensible au pH de l'électrode selon l'invention sont choisies dans le groupe constitué par les quinones comme, par exemple, la 1,2-napthaquinone (NQ), les anthraquinones comme, par exemple, la phénanthraquinone (PAQ), les anthracènes comme, par exemple, le 9,10-anthracène et le 9-nitroanthracène, l'azobenzène, la diphenylamine, le bleu de méthylène, le 3-nitrofluoranthène, le 6-nitrochrysène et la thionine.
- [0072] Dans la couche sensible au pH de l'électrode selon l'invention, le ratio en matières sèches éléments sensibles au pH/transducteur électrochimique est compris entre 1% et 50%, notamment entre 2% et 20% et, en particulier, entre 4% et 8%.
- [0073] Dans l'électrode sensible au pH selon l'invention, la couche sensible au pH a typiquement une épaisseur comprise entre 1 μm et 100 μm , notamment entre 1 μm et 50 μm et, en particulier, entre 2 μm et 30 μm .
- [0074] La présente invention concerne également un procédé de préparation d'une électrode sensible au pH telle que précédemment définie. Ce procédé comprend :
- [0075] - le dépôt, sur une couche conductrice de l'électricité déposée sur un support isolant, d'une solution ou d'une suspension comprenant un transducteur électrochimique ou un de ses précurseurs et des éléments sensibles au pH choisis dans le groupe constitué par les oxydes de métaux de transition et les molécules redox sensibles au pH puis
- [0076] - le séchage de cette solution ou de cette suspension moyennant quoi on obtient une couche sensible au pH comprenant un transducteur électrochimique et dans laquelle des éléments sensibles au pH sont répartis.
- [0077] Par « précurseur d'un transducteur électrochimique », on entend notamment un polymère semi-conducteur et une encre carbone tels que précédemment définis.
- [0078] Dans le procédé selon l'invention, la solution ou la dispersion est déposée, sur la couche conductrice, via une technique choisie parmi un dépôt par sérigraphie ; un

dépôt par immersion ou trempage, également connu sous la dénomination anglaise « dip coating » ; un dépôt par centrifugation ou dépôt à la tournette, également connu sous la dénomination anglaise « spin coating » ; un dépôt par vaporisation ou pulvérisation manuelle connu sous la dénomination anglaise « spray coating » ; un dépôt par contact utilisant un timbre imbibé par l'encre et connu sous la dénomination anglaise « contact printing » ; un dépôt de type « microgoutte », également connu sous la dénomination anglaise « drop coating » ; un dépôt par impression jet d'encre, également connue sous la dénomination anglaise « inkjet printing » ; un dépôt par typographie ; un dépôt par flexographie et un dépôt par impression offset.

- [0079] Avantageusement, lors du procédé selon l'invention, la solution ou la dispersion est déposée sur la surface du support par sérigraphie, lorsque le précurseur du transducteur électrochimique est une encre carbone.
- [0080] En variante, lors du procédé selon l'invention, la solution ou la dispersion est déposée sur la surface du support par drop-coating ou par impression jet d'encre, lorsque le précurseur du transducteur électrochimique est un polymère semi-conducteur.
- [0081] L'étape de séchage lors du procédé selon l'invention est réalisée à une température comprise entre 20°C et 200°C, notamment entre 40°C et 150°C et, en particulier, entre 60°C et 130°C. Typiquement, l'homme du métier saura définir la durée de l'étape de séchage, sans effort inventif, en fonction de la température, du type de substrat, de l'épaisseur et du type de transducteur électrochimique mis en œuvre.
- [0082] Le procédé selon l'invention peut en outre comprendre une étape préalable consistant à préparer une couche conductrice telle que précédemment définie, déposée sur un support isolant tel que précédemment défini. Une telle étape est une étape classique dans la préparation des électrodes et notamment des électrodes de capteurs de pH tout solide.
- [0083] La présente invention concerne également un capteur pH tout solide comprenant au moins une électrode sensible au pH telle que précédemment définie.
- [0084] Dans le capteur pH tout solide selon l'invention, l'électrode sensible au pH est associée à une électrode de référence dans une organisation telle que définie à la [Fig.1]. Ainsi, tout ce qui a été décrit pour la [Fig.1] s'applique *mutatis mutandis* au capteur pH tout solide selon l'invention. Toute électrode de référence classiquement utilisée dans les capteurs pH tout solide est utilisable dans le cadre de l'invention.
- [0085] La présente invention concerne enfin l'utilisation d'une électrode sensible au pH telle que précédemment définie ou d'un capteur de pH tout solide tel que précédemment défini pour mesurer le pH dans un milieu liquide en contact avec ladite électrode ou ledit capteur.
- [0086] A titre d'exemples d'applications d'une telle utilisation, on peut citer dans le suivi de

la dégradation des matériaux, par exemple les bétons, dans la surveillance d'ouvrages de génie civil comme, par exemple, des ponts, des tunnels ou des pipelines, la surveillance de puits de pétrole, dans l'analyse environnementale et notamment pour la qualité de l'eau, dans la surveillance de fonds marins, dans l'analyse physiologique et le diagnostic médical, dans l'industrie chimique, dans l'industrie alimentaire et notamment lors des procédés de bioproduction, dans le contrôle des processus de re-traitements des matières nucléaires ou encore dans la surveillance du stockage et de l'entreposage des déchets radioactifs.

[0087] D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront encore à l'homme du métier à la lecture des exemples ci-après donnés à titre illustratif et non limitatif, en référence aux figures annexées.

Breve description des dessins

[0088] [Fig.1] déjà présentée correspond à la schématisation d'un capteur pH potentiométrique classique i.e. appartenant à l'état de la technique.

[0089] [Fig.2] déjà présentée correspond à la schématisation d'une électrode sensible au pH selon l'invention.

[0090] [Fig.3] présente un exemple de courbes expérimentales obtenues par changements successifs de solutions de test de différents pH avec des capteurs sérigraphiés ($n=7$) versus une référence externe commerciale Ag/AgCl dans une solution sous agitation de PBS 1X avec HCl ou NaOH à 25°C (INV-1).

[0091] [Fig.4] présente un graphique représentant les sensibilités au pH mesurée pour différentes configurations de capteurs, le R^2 de tous les points étant égal à 0,99 et la plage de pH mesurée étant de 4.09 à 10.09.

[0092] [Fig.5] présente une hystérésis en mV d'électrodes fabriquées à partir de différentes formulations versus une référence commerciale Ag/AgCl dans un tampon PBS 1X. L'hystérésis est calculée suite à un changement de pH de l'ordre de +/- 1 unité pH (avec n , le nombre de capteurs).

[0093] [Fig.6A] présente les temps de réponse de pH 7,37 à 4,97 pour différentes formulations, à 90% et 99%.

[0094] [Fig.6B] présente les temps de réponse de pH 7,37 à 4,97 pour différentes formulations, à 90%.

[0095] [Fig.7A] présente les temps de réponse de pH 4,97 à 7,37 pour différentes formulations, à 90% et 99%.

[0096] [Fig.7B] présente les temps de réponse de pH 4,97 à 7,37 pour différentes formulations, à 90%.

[0097] [Fig.8] présente les régressions linéaires de capteurs pH fabriqués à partir d'une encre carbone BQ-242 fonctionnalisée avec des particules d'oxydes d'iridium dans du

PBS 1X et différents milieux de cultures cellulaires commerciaux (INV-1).

[0098] **EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS**

I. Préparation des électrodes sensibles au pH.

[0099] I.1. Electrodes sensibles au pH conformes à l'invention.

[0100] Pour illustrer la présente invention, plusieurs transducteurs électrochimiques ont été testés à savoir : deux encres carbones commerciales (Dupont BQ242 et Novacentrix JR-700, ci-après désignée « NOVA ») et un polymère semi-conducteur, poly(3-octylthiophene 2,5-diyl) (POT).

[0101] Pour l'élément sensible au pH, des poudres d'oxydes métalliques commerciales ont été utilisées : poudre d'oxyde d'iridium (Alfa Aesar) et poudre d'oxyde de ruthénium (Alfa Aesar).

[0102] Ainsi, les combinaisons des transducteurs électrochimiques et d'oxydes métalliques, telles que présentées dans le Tableau 1 ci-dessous ont été utilisées pour préparer des électrodes sensibles au pH selon l'invention.

[0103] [Tableaux1]

	Transducteur électrochimique	Oxyde métallique
INV-1	BQ242	IrO ₂
INV-2	POT	IrO ₂
INV-3	NOVA	IrO ₂
INV-4	BQ242	RuO ₂

[0104] Ces électrodes sensibles au pH sont préparées comme suit :

[0105] - Etape de formulation et mélange :

[0106] *INV-1 et INV-4* : utilisation de l'encre commerciale BQ242 sans modification et mélange avec de la poudre d'oxydes métalliques (IrO₂ pour INV-1 et RuO₂ pour INV-4), le ratio en matière sèche d'IrO₂ (ou de RuO₂) par rapport à BQ242 étant de 6% ;

[0107] *INV-3* : utilisation de l'encre commerciale NOVA sans modification et mélange avec de la poudre d'IrO₂, le pourcentage en matière sèche d'IrO₂ par rapport à NOVA étant de 6% ;

[0108] *INV-2* : solubilisation du POT dans du tétrahydrofurane et mélange avec de la poudre d'IrO₂, le ratio en matière sèche d'IrO₂ par rapport à POT étant de 6% ;

[0109] - Dépôt :

[0110] *INV-1, INV-3 et INV-4* : procédé de sérigraphie

[0111] *INV-2* : procédé de drop-coating

[0112] - Séchage : 2-3 heures à 80°C.

[0113] I.2. Electrodes sensibles au pH de l'art antérieur.

[0114] Afin de mettre en évidence les bonnes propriétés des matériaux selon l'invention, des

contre-exemples ont été réalisés et étudiés dans les mêmes conditions :

- [0115] CE-1 : IrO₂ électrodéposé sur couche de transducteur (encre BQ242)
- [0116] CE-2 : IrO₂ électrodéposé sur couche conductrice en or (sans utilisation de transducteur).
- [0117] La procédure pour réaliser CE-1 et CE-2 a été adaptée des références [6-8] :
- [0118] - Formulation de la solution d'électrodéposition : mélange de chlorure d'iridium hydraté (concentration finale de 0,15 g/dL), peroxyde d'hydrogène à 30% en masse (1 mL/dL), acide oxalique dihydraté (0,73 g/dL) et ajout de carbonate de potassium anhydre pour atteindre un pH de 10,5,
- [0119] - Préparation de la surface recevant l'électrodépôt par un traitement plasma O₂,
- [0120] - Electrodepôt en immergeant l'échantillon dans la solution d'électrodéposition par application de 25 cycles de cyclovoltammétrie de -0.5 à -0.7 V vs Ag/AgCl à 50 mV/s.

II. Caractérisation et tests.

[0121] II.1. Méthodes.

[0122] Les capteurs sont immergés dans des solutions (de 20 mL à 2 L) sous agitation, connectés à des potentiostats qui permettent de mesurer les valeurs des potentiels à circuit ouvert pour différentes solutions (changements de solution de pH connus ou ajouts dosés d'acide [H₂SO₄ ou HCl] ou de base [NaOH]).

[0123] II.2. Résultats.

[0124] *Changements successifs de solutions de différents pH*

[0125] La [Fig.3] représente un résultat typique obtenu lors d'une expérience avec des changements de solutions. Ici l'électrode est immergée successivement dans des solutions de pH variables mais connus, le premier palier correspondant à une solution de pH = 7,11, puis 7,34, 4,09, 7,34, 10,09 et ainsi de suite.

[0126] *Sensibilité au pH*

[0127] Les différentes configurations de capteurs ont été étudiées et les sensibilités au pH exprimées en mV/unité pH représentées à la [Fig.4].

[0128] Les résultats montrent que l'intégration en une seule couche de l'élément sensible et du transducteur conduit aux meilleures performances des différents capteurs testés en termes de sensibilité. Les valeurs obtenues sont en effet très proches de la valeur théorique de 59 mV/unité pH définie par la théorie (voir Math 2).

[0129] Les résultats de INV-2 présentent des réponses d'électrodes sensibles au pH très proches les unes des autres. L'utilisation du POT maintient donc une très bonne reproductibilité de ces électrodes.

[0130] *Hystérésis des électrodes*

[0131] La répétabilité des électrodes sensibles au pH a été caractérisée par le biais de l'hystérésis des électrodes suite à un changement de paliers de +/- 1 unité pH. La [Fig.5] illustre les résultats obtenus avec les différentes formulations développées. Il

peut être observé que la majorité des électrodes développées présentent une faible hystérésis de l'ordre de 1 mV.

[0132] *Temps de réponse des électrodes*

[0133] Le temps de réponse des formulations développées pour le suivi du pH a été caractérisé par la mesure des temps de montée et de descente à 90% et à 99%. Ces temps correspondent aux intervalles de temps entre l'instant où la valeur de potentiel mesuré varie suivant un échelon et l'instant où la valeur mesurée dépasse (et demeure au-delà de) 90% (et 99%) de sa différence d'amplitude. L'échelon de pH a été choisi afin de représenter des valeurs proches du minimum et du maximum de la plage de mesure déterminée lors de la spécification du cahier des charges.

[0134] Les Figures 6A et 6B ainsi que les Figures 7A et 7B présentent les résultats mesurés pour différentes formulations développées. La première représente les temps de réponse à 90% et 99% lors d'un passage de pH de 7,37 à 4,97 (Figures 6A et 7A) et la seconde les temps de réponse à 90% lors d'un passage de pH de 4,97 à 7,37 (Figures 6B et 7B).

[0135] *Courbes de calibration avec différentes électrodes sensibles au pH*

[0136] Le comportement des électrodes sensibles au pH fabriquées à partir d'une encre carbone et des particules d'oxydes d'iridium a été caractérisé en réalisant des paliers de pH (en suivant le même protocole que la phase précédente). Une étude comparative a donc été menée avec 10 capteurs pH similaires dans les milieux de cultures commerciaux suivants :

[0137] - Phosphate-Buffered Salin, PBS 1X (ThermoFischer) ;

[0138] - RPMI-1640 Medium, avec bicarbonate et sans L-glutamine (SigmaAldrich) ;

[0139] - William's Medium E 1X (Gibco) ;

[0140] - DMEM, avec 4500 mg/L de glucose et sans L-glutamine et Napyrivate (Millipore);

[0141] - Minimum Essential Medium Eagle, avec sels et bicarbonate de sodium et sans L-glutamine (SigmaAldrich).

[0142] La [Fig.8] présente les courbes de calibrations obtenues avec les différents capteurs dans chaque milieu.

[0143] Quel que soit le milieu dans lequel les paliers de pH ont été réalisés, aucune différence significative des courbes de calibrations n'a été mesurée par rapport à celles dans le PBS 1X, montrant ainsi aucune influence de ces milieux de culture sur le comportement des électrodes sensibles au pH développées.

Références bibliographiques

[0144] [1] Kaempgen & Roth, 2006, "Transparent and flexible carbon nanotube/polyaniline pH sensors", Journal of Electroanalytical Chemistry, vol. 586, pages 72-76.

[0145] [2] Bakker, 1996, "Determination of improved selectivity coefficients of polymer membrane ion-selective electrodes by conditioning with a discriminated ion", J.

Electrochem. Soc., vol. 143, L83.

- [0146] [3] Chen *et al*, 2019, “Patterned iridium oxide film as neural electrode interface: Biocompatibility and improved neurite outgrowth with electrical stimulation”, *Mater. Sci. Eng.: C*, vol. 103, 109865.
- [0147] [4] Kampouris *et al*, 2009, “Screen printed electrochemical platforms for pH sensing”, *Analytical Methods*, vol. 1, pages 25-28.
- [0148] [5] Jović *et al*, 2018, “Large-scale layer-by-layer inkjet printing of flexible iridium-oxide based pH sensors”, *J. Electroanal. Chem.*, vol. 819, pages 384–390.
- [0149] [6] Uria *et al*, 2016, “Miniaturized metal oxide pH sensors for bacteria detection”, *Talanta*, vol. 147, pages 364–369.
- [0150] [7] Elsen *et al*, 2009, “Effects of Electrodeposition Conditions and Protocol on the Properties of Iridium Oxide pH Sensor Electrodes”, *J. Electrochem. Soc.*, vol. 156, F1.
- [0151] [8] Mailley *et al*, 2002, “Electrochemical and structural characterizations of electro-deposited iridium oxide thin-film electrodes applied to neurostimulating electrical signal”, *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 21, pages 167–175.

Revendications

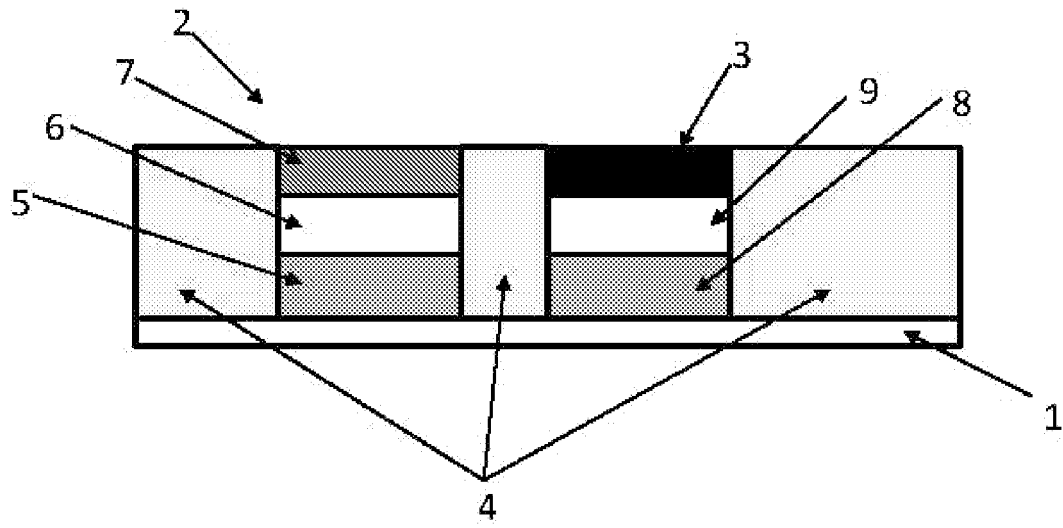
- [Revendication 1] Electrode sensible aux pH (10) comprenant :
- une couche conductrice (12) disposée sur un support isolant (11) et
 - une couche sensible au pH (13) disposée sur la couche conductrice (12), ladite couche sensible au pH comprenant un transducteur électrochimique et des éléments sensibles au pH répartis dans cette couche sensible au pH,
- lesdits éléments sensibles au pH étant choisis dans le groupe constitué par les oxydes de métaux de transition et les molécules redox sensibles au pH.
- [Revendication 2] Electrode sensible aux pH selon la revendication 1, caractérisée en ce que ledit support isolant est en un matériau isolant choisi dans le groupe constitué par le papier, une céramique, une résine époxyde éventuellement renforcée par des fibres de verre ou de papier et du polyimide.
- [Revendication 3] Electrode sensible aux pH selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce que ladite couche conductrice est en un matériau conducteur de l'électricité choisi dans le groupe constitué par les métaux tels que les métaux nobles, les carbones et les polymères ou copolymères conducteurs de l'électricité.
- [Revendication 4] Electrode selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisée en ce que ledit transducteur est obtenu à partir de carbones, d'encres carbone ou de polymères semi-conducteurs.
- [Revendication 5] Electrode selon la revendication 4, caractérisée en ce que ledit polymère semi-conducteur est du poly(3-octylthiophene-2,5-diyl).
- [Revendication 6] Electrode selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisée en ce que lesdits oxydes de métaux de transition sont choisis dans le groupe constitué par les oxydes de ruthénium (RuO_2), les oxydes d'iridium (IrO_2) les oxydes de tungstène (WO_2) et leurs mélanges.
- [Revendication 7] Electrode selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisée en ce que, dans ladite couche sensible au pH, le ratio en matières sèches éléments sensibles au pH/transducteur électrochimique est compris entre 1% et 50%, notamment entre 2% et 20% et, en particulier, entre 4% et 8%.
- [Revendication 8] Procédé de préparation d'une électrode sensible au pH selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, ledit procédé comprenant :
- le dépôt, sur une couche conductrice de l'électricité déposée sur un

support isolant, d'une solution ou d'une suspension comprenant un transducteur électrochimique ou un de ses précurseurs et des éléments sensibles au pH choisis dans le groupe constitué par les oxydes de métaux de transition et les molécules redox sensibles au pH puis - le séchage de ladite solution ou de ladite suspension moyennant quoi on obtient une couche sensible au pH comprenant un transducteur électrochimique et dans laquelle des éléments sensibles au pH sont répartis.

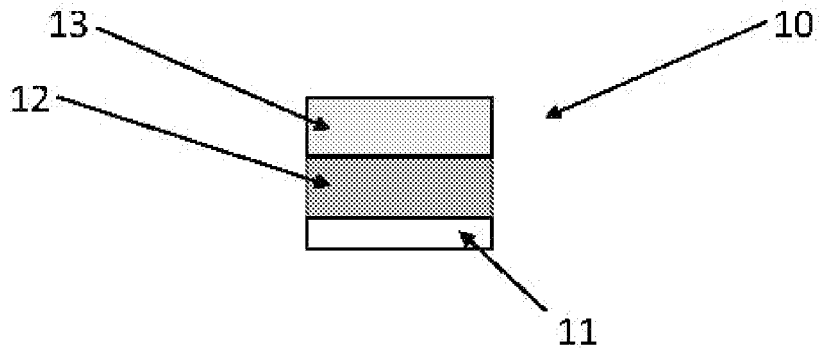
[Revendication 9] Capteur pH tout solide comprenant au moins une électrode sensible au pH selon l'une quelconque des revendications 1 à 7.

[Revendication 10] Utilisation d'une électrode sensible au pH selon l'une quelconque des revendications 1 à 7 ou d'un capteur pH tout solide selon la revendication 9, pour mesurer le pH dans un milieu liquide en contact avec ladite électrode ou ledit capteur.

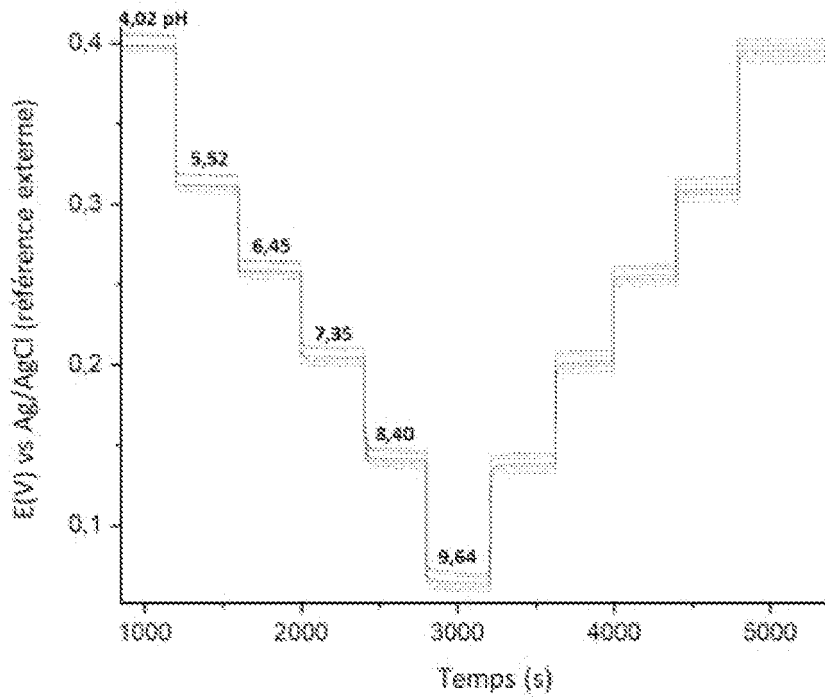
[Fig. 1]



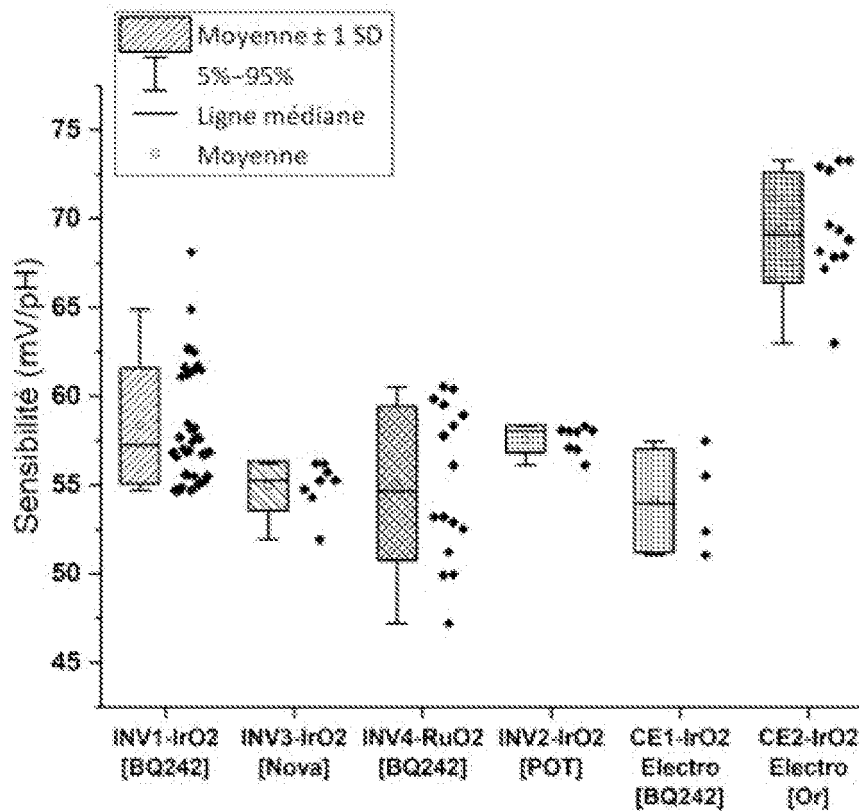
[Fig. 2]



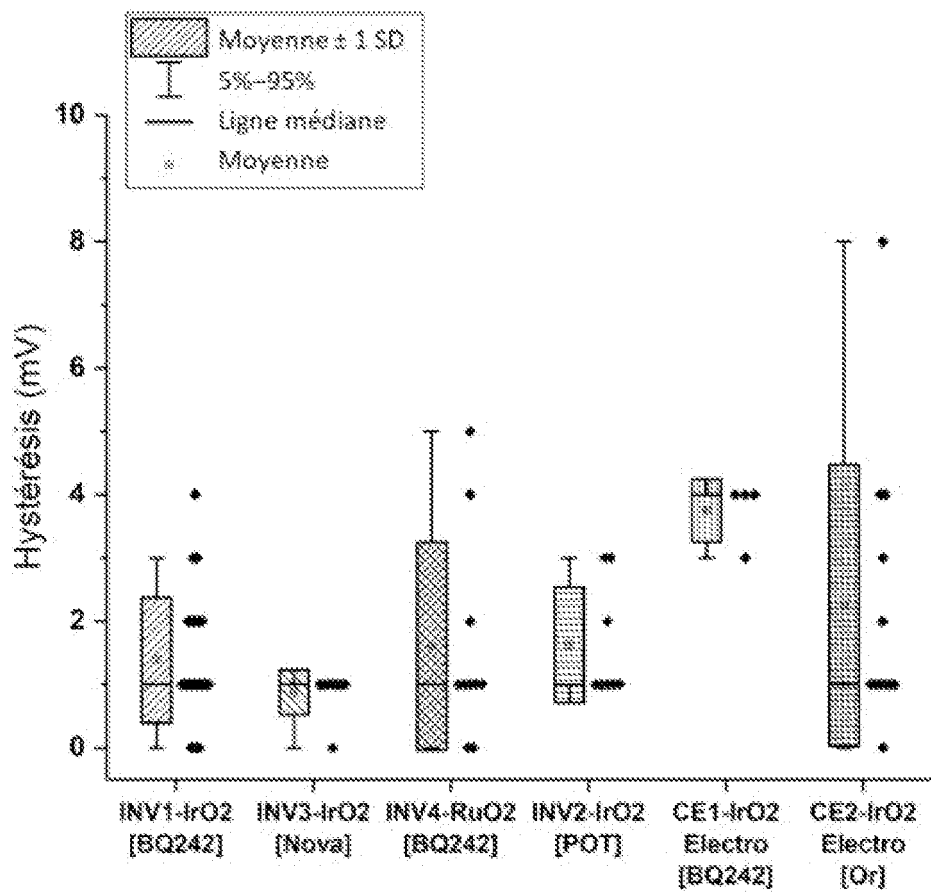
[Fig. 3]



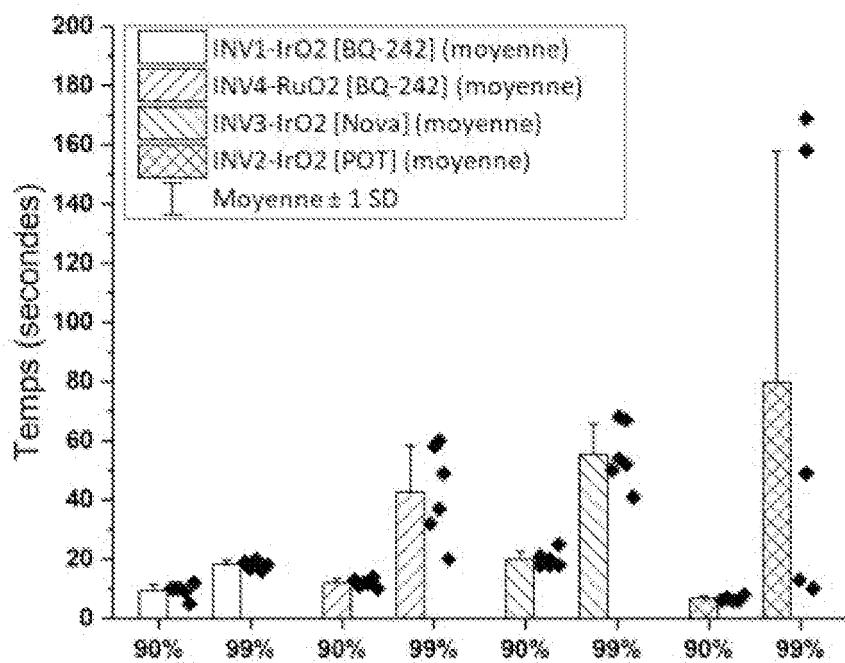
[Fig. 4]



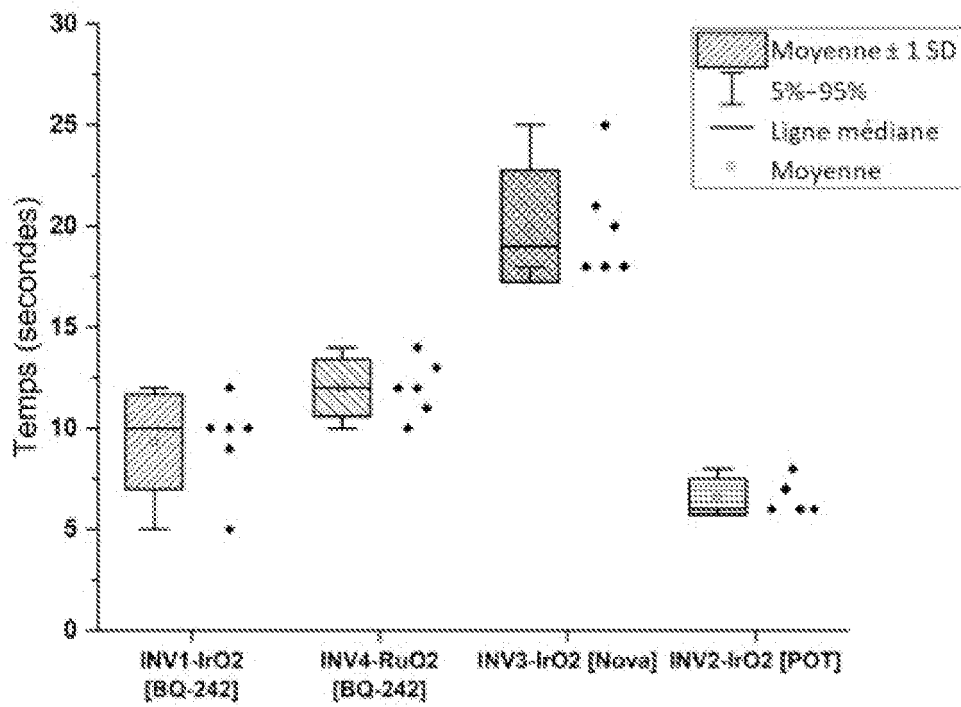
[Fig. 5]



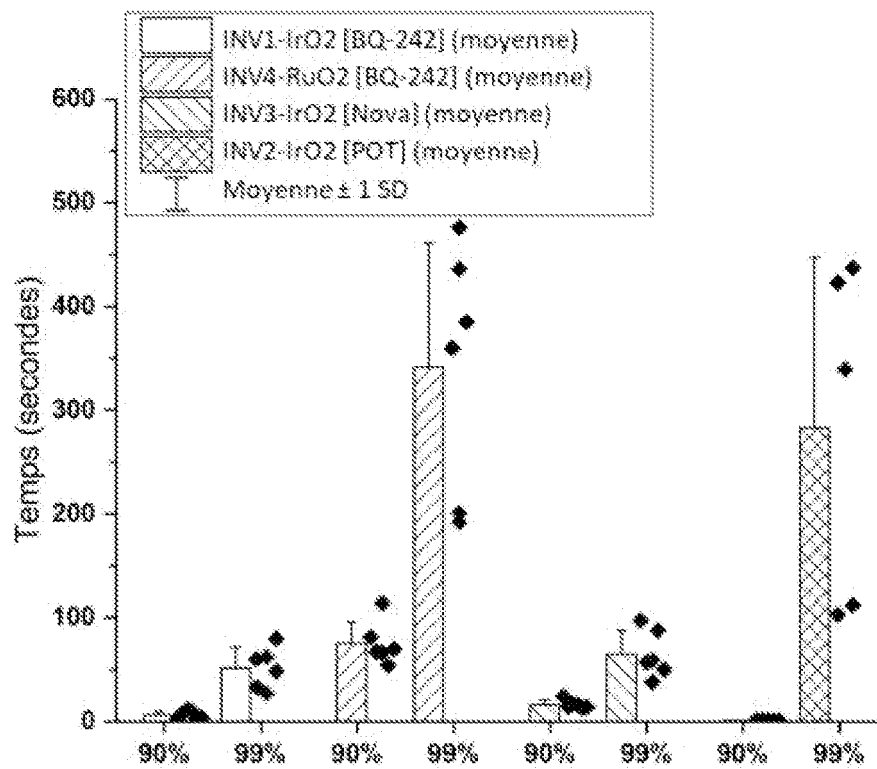
[Fig. 6A]



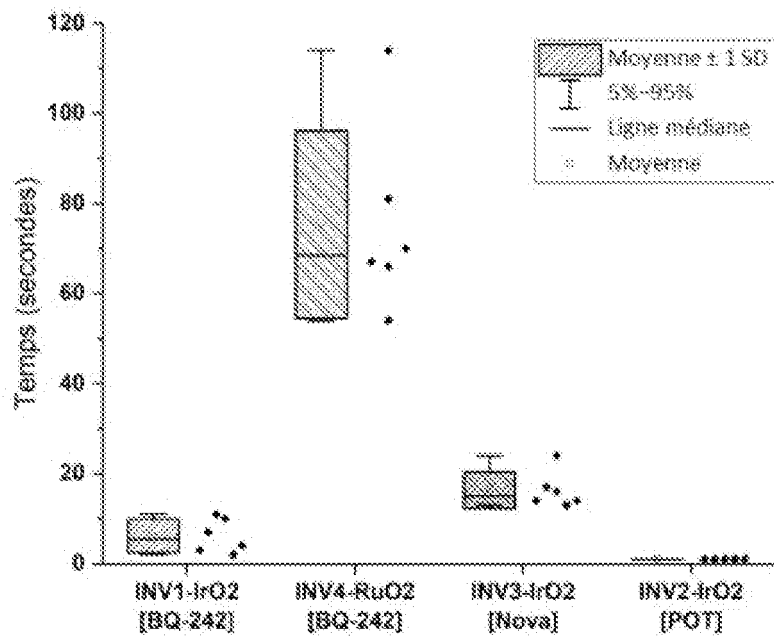
[Fig. 6B]



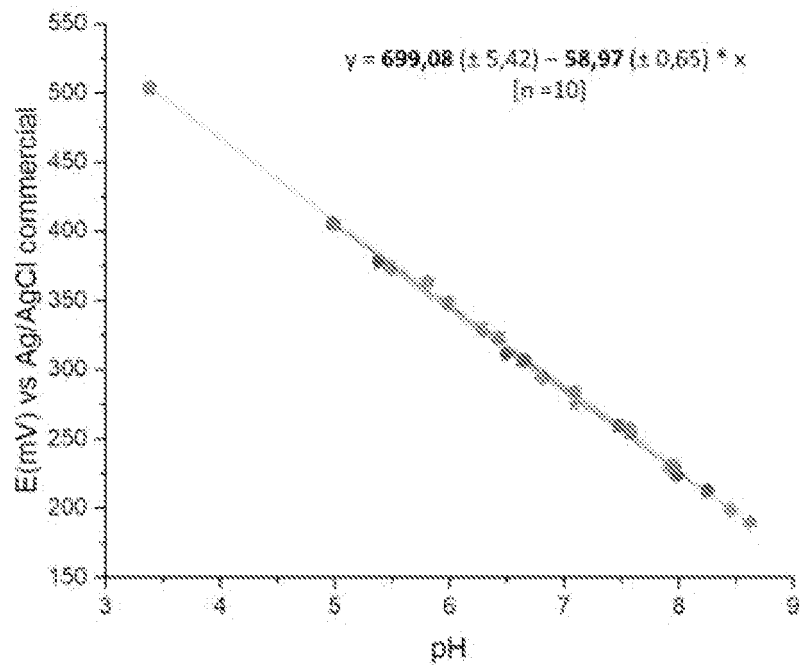
[Fig. 7A]



[Fig. 7B]



[Fig. 8]



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

FA 916882
FR 2214295

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	KR 2022 0003285 A (UNIV KYONGGI IND & ACAD COOP FOUND [KR] ET AL.) 10 janvier 2022 (2022-01-10)	1-5,7-10	G01N 27/30
Y	* le document en entier * -----	6	
Y	US 2017/205372 A1 (JOHNSON CHRISTOPHER [US] ET AL) 20 juillet 2017 (2017-07-20) * abrégé * * alinéa [0354] * -----	6	
A	US 2019/293529 A1 (RAJAN NITIN K [US] ET AL) 26 septembre 2019 (2019-09-26) * abrégé * * alinéas [0200], [0218] * -----	1-10	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			G01N
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
13 septembre 2023		Ruchaud, Nicolas	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
A : arrière-plan technologique		D : cité dans la demande	
O : divulgation non-écrite		L : cité pour d'autres raisons	
P : document intercalaire		
		& : membre de la même famille, document correspondant	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2214295 FA 916882**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **13-09-2023**
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
KR 20220003285 A	10-01-2022	AUCUN	

US 2017205372 A1	20-07-2017	EP 3320107 A1	16-05-2018
		EP 3708673 A1	16-09-2020
		US 2017008825 A1	12-01-2017
		US 2017205372 A1	20-07-2017
		US 2017226037 A1	10-08-2017
		WO 2017005587 A1	12-01-2017

US 2019293529 A1	26-09-2019	CA 3085018 A1	13-06-2019
		CN 111712709 A	25-09-2020
		EP 3695214 A1	19-08-2020
		JP 7254077 B2	07-04-2023
		JP 2021505851 A	18-02-2021
		JP 2023082085 A	13-06-2023
		US 2019293529 A1	26-09-2019
		WO 2019113226 A1	13-06-2019
