

Veille bibliographique sur les capteurs en développement (non commercialisés) pour la mesure in situ et en continu des substances réglementées DCE et des composés majeurs permettant la caractérisation globale des eaux

M. Masson, F. Lestremau

juin 2017

Document final

En partenariat avec



Avec le soutien de



Contexte de programmation et de réalisation

Ce rapport a été réalisé dans le cadre du programme scientifique et technique AQUAREF pour l'année 2016, dans le cadre du thème « Valider et transférer des méthodes et technologies innovantes ».

Auteur (s) :

Matthieu Masson
Irstea
matthieu.masson@irstea.fr

François Lestremau
INERIS
francois.lestremau@ineris.fr

Vérification du document :

Nathalie Guigues
LNE
nathalie.guigues@lne.fr

Frédéric Gal
BRGM
f.gal@brgm.fr

Les correspondants

Onema : Pierre-François Staub, pierre-francois.staub@afbiodiversite.fr

Etablissement : Marina Coquery, marina.coquery@irstea.fr

Référence du document : Matthieu Masson, François Lestremau - Veille bibliographique sur les capteurs en développement (non commercialisés) pour les substances réglementées DCE et pour les composés majeurs permettant la caractérisation globale des eaux - Rapport AQUAREF 2016 - 58 p.

Droits d'usage :	Public
Couverture géographique :	International
Niveau géographique :	National
Niveau de lecture :	Professionnels, experts
Nature de la ressource :	Document

INTRODUCTION	8
1. DEFINITIONS ET CLASSIFICATION DES CAPTEURS	9
1.1 Modes d'utilisation des capteurs	9
1.2 Différents types de capteurs.....	10
1.3 Caractérisation des performances des capteurs	11
2. ANALYSE GLOBALE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES RETENUES.....	12
2.1 Méthodologie appliquée pour réaliser le panorama	12
2.2 techniques analytiques les plus utilisées	17
2.3 Origine géographique des développements.....	19
3. SYNTHESE DES CAPTEURS PAR FAMILLES DE COMPOSES	20
3.1 Micropolluants organiques	20
3.1.1 Pesticides	20
3.1.2 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	20
3.1.3 Phénols (hors bisphénol A)	21
3.1.4 Phtalates et Bisphénol A.....	21
3.2 Métaux et métalloïdes	22
3.2.1 Cadmium.....	22
3.2.2 Plomb	22
3.2.3 Mercure	22
3.2.4 Nickel.....	23
3.2.5 Cuivre	23
3.2.6 Arsenic	24
3.2.7 Chrome	24
3.2.8 Argent	24
3.2.9 Autres éléments	25
3.3 Paramètres majeurs.....	25
3.3.1 Demande chimique en oxygène (DCO).....	25
3.3.2 Demande biochimique en oxygène (DBO)	25
3.3.3 nitrate, nitrite et ammonium.....	26
3.3.4 Calcium et carbonate	26
4. CHOIX DE CAPTEURS INTERESSANTS A TESTER SUR LE TERRAIN.....	27
5. CONCLUSIONS	29
RÉFÉRENCES	30

Liste des annexes :

Annexe 1 : tableau de synthèse des articles étudiés (les LD et LQ exprimées en concentrations molaires ont été converties en concentrations massiques).

Annexe 2 : informations bibliographiques sur les articles étudiés et des organismes de recherche principaux associés aux articles.

VEILLE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES CAPTEURS EN DEVELOPPEMENT (NON COMMERCIALISES) POUR LES SUBSTANCES REGLEMENTEES DCE ET POUR LES COMPOSES MAJEURS PERMETTANT LA CARACTERISATION GLOBALE DES EAUX

M. Masson (Irstea), F. Lestremau (INERIS)

RESUME

Depuis les années 2000, le nombre de références bibliographiques sur les capteurs dans les eaux douces et les eaux résiduaires est en constante augmentation. Un travail de synthèse bibliographique des capteurs en développement (i.e. non commercialisés) pour l'analyse de composés chimiques dans les matrices environnementales a été réalisé afin d'avoir une vue d'ensemble sur les substances qui pourront être analysées par des systèmes de mesures in situ et en continu dans un futur proche.

Ce panorama non exhaustif recense 167 articles publiés principalement ces 5 dernières années. Les composés chimiques retenus pour ce panorama font partie des listes des substances de l'état chimique des eaux de surface et des polluants spécifiques de l'état écologique des eaux de surface, de la liste des substances pertinentes à surveiller, et de la liste des paramètres physico-chimiques pour les cours d'eau de la Directive Cadre sur l'Eau (Arrêté du 7 août 2015). Sur la base de définitions et généralités sur les capteurs, différents critères ont été retenus pour décrire chaque capteur retenu dans ce panorama : substance(s) analysée(s), type de capteur (capteur chimique, biocapteur), technique analytique utilisée, type(s) d'eau testé(s), niveau d'avancement de développement, gamme de concentration de mesure, limites de détection ou de quantification obtenues.

Les capteurs recensés se basent principalement sur des techniques électrochimiques (voltamétrie, ampérométrie, potentiométrie...) et optiques (spectrophotométrie, fluorescence, résonance des plasmons de surface...). Une synthèse générale des capteurs par grandes familles de composés est proposée pour les pesticides, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les phénols, les phtalates et le bisphénol A, les métaux et métalloïdes (Cd, Pb, Hg, Ni, Cu, As, Cr, Ag...) ainsi que pour les paramètres majeurs (demande chimique en oxygène, demande biochimique en oxygène, nitrate, nitrite, ammonium, calcium et carbonate).

De façon générale, les performances des capteurs sont évaluées dans des eaux synthétiques et des eaux réelles (eaux de surface, de robinet, résiduaires...) qui peuvent être dopées. Cependant, la quasi-totalité des capteurs ne sont pas testés en conditions réelles sur le terrain ou sur le long terme. Les limites de détection obtenues peuvent être très variables pour une même famille de composés. Pour certaines substances, les limites de détection sont trop élevées pour envisager des analyses pertinentes dans les eaux de surface (par exemple pour le nickel ou le bisphénol A). Cependant, quelques capteurs, couvrant la plupart des grandes familles de composés, peuvent se révéler très intéressants à tester sur le terrain. Ces capteurs présentant un état d'avancement élevé et des limites de détection bien adaptées aux concentrations dans les matrices environnementales sont listés dans ce rapport.

Mots clés (thématique et géographique) :

Capteur, eau de surface, eau résiduaire, micropolluants organiques, métaux, paramètres majeurs, limite de détection, gamme de mesure.

COMPILATION ON SENSORS IN DEVELOPMENT (NOT COMMERCIALIZED) FOR THE MONITORING OF SUBSTANCES INCLUDED IN THE WATER FRAMEWORK DIRECTIVE AND MAJOR COMPONENTS USED FOR THE CHARACTERIZATION OF WATER BODIES
M. Masson (Irstea), F. Lestremau (INERIS)

ABSTRACTS

Since 2000, the number of references on sensors in freshwater and wastewater has been constantly increasing. In order to have an overall view of the substances that may be easily analyzed by in situ and continuous systems in a near future, a bibliographic compilation of the sensors in development (i.e. not commercialized) for the analysis of chemical compounds in the environmental matrices has been carried out.

This non-exhaustive panorama lists 167 articles published mainly during the last 5 years. The chemical compounds selected are included in the different lists of the WFD (decree of 7 August 2015). From definitions and general information on the sensors, different criteria were used to describe the selected sensors: analyzed substance(s), type of sensor (chemical sensor, biosensor), analytical technique, type(s) of tested water, level of development progress, measuring range, limits of detection or quantification.

The sensors are mainly based on electrochemistry (voltammetry, amperometry, potentiometry...) and optical techniques (colorimetry, fluorescence, resonance of surface plasmon...). A general synthesis of sensors by families of compounds is proposed for pesticides, polycyclic aromatic hydrocarbons, phenols, phthalates and bisphenol A, metals and metalloids (Cd, Pb, Hg, Ni, Cu, As, Cr, Ag ...) as well as for major parameters (chemical oxygen demand, biochemical oxygen demand, nitrate, nitrite, ammonium, calcium and carbonate).

In general, the performances of the sensors are evaluated in synthetic waters and in real waters (surface water, tap water, wastewater...) which can be doped. Nearly all the sensors are not tested in field conditions or over long-term. The detection limits obtained can be very variable for the same family of compounds. For few compounds, the detection limits are too high to be considered as relevant sensors for the monitoring of surface waters (e.g. nickel or bisphenol A). However, some sensors having a high state of progress and detection limits well adapted to the concentrations in the environmental matrices would be instructive to test in field conditions. These sensors, covering a wide range of compounds, are listed in this report.

Key words (thematic and geographical area):

Sensor, surface water, wastewater, organic micropollutants, metals, major parameters, detection limit, measuring range

INTRODUCTION

L'utilisation de systèmes de mesure in situ et en continu ou sur site pour évaluer la qualité chimique des eaux de surface ou des eaux résiduaire se développe de plus en plus depuis deux décennies. Ces systèmes permettent de réaliser des analyses de composés ciblés directement dans le milieu avec une fréquence d'analyse généralement accrue. En les couplant à des dispositifs permettant la communication à distance, il est possible de récupérer ou visualiser les données acquises en temps réel. Ainsi, les avantages significatifs des systèmes de mesure en continu, et ce pourquoi ils sont largement utilisés, sont (i) l'absence de manipulation de l'échantillon pouvant entraîner une modification des paramètres à mesurer ; (ii) une fréquence de mesure accrue donnant une lecture dynamique ; (iii) la possibilité de visualiser les données en temps réel, permettant une réactivité très importante et une intervention rapide (e.g. Commissariat général au développement durable, 2014). Les systèmes de mesure in situ et en continu apparaissent donc comme une stratégie complémentaire à la surveillance « classique » (i.e. échantillonnage, conditionnement de l'échantillon et analyse en laboratoire). C'est dans ce sens que le guide européen CIS n°19 (2009), sur la surveillance des paramètres chimiques dans les eaux de surface, mentionne qu'il est souhaitable d'introduire d'autres techniques que l'analyse d'échantillons ponctuels par des méthodes d'analyses classiques afin d'améliorer la qualité de l'évaluation de l'état chimique et écologique des eaux.

Une récente analyse de marché a montré que plus d'une centaine de compagnies travaillent sur la mesure en continu à travers le monde, et de ce fait, de très nombreux systèmes de mesure sont proposés sur le marché (Olsson et al., 2014). Dans ce sens, Gantois et al. (2016) ont dressé un panorama des capteurs et analyseurs en ligne commercialisés pour la mesure des paramètres physico-chimiques dans l'eau. Ces systèmes permettent l'analyse de paramètres physico-chimiques majeurs (par exemple pH, oxygène dissous, nitrates...) et globaux (comme la matière organique), de micropolluants organiques (comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques) et de contaminants inorganiques (par exemple le cadmium, l'arsenic, le mercure...). Mais ces méthodes alternatives de surveillance sont généralement limitées par i) un nombre restreint de substances analysées, ii) une adaptation difficile des technologies aux différents milieux, iii) des niveaux de concentrations peu élevés dans le milieu, iv) l'absence de réglementation et de normes ainsi qu'un faible niveau d'information sur les conditions et les protocoles d'utilisation jugé souvent insuffisant (Guigues et al., 2013). Afin de surmonter ces limites, des travaux réalisés dans le cadre d'AQUAREF ont permis une première évaluation de dispositifs de mesure en continu pour la surveillance des nutriments et de la matière organique dans les eaux de surface (Guigues et al., 2016).

Les compagnies qui commercialisent les systèmes de mesure in situ et en continu sont impliquées dans la recherche et le développement de leurs systèmes. Mais elles bénéficient très souvent de la recherche conduite en amont, qu'elle soit fondamentale ou appliquée, largement menée par le milieu académique. Ainsi, de nombreux laboratoires développent de nouvelles techniques analytiques ou améliorent des techniques existantes pour la mesure de substances organiques ou inorganiques dans les eaux. Ce travail est réalisé en partie au travers de la conception de nouveaux capteurs. Selon l'IUPAC, les capteurs sont des dispositifs qui transforment une information chimique en un signal mesurable et sont capables de fournir des informations sur la composition chimique de son environnement.

L'objectif de ce travail est de réaliser un premier inventaire bibliographique (non exhaustif) de capteurs en développement (i.e. non commercialisés) afin d'avoir une vue d'ensemble sur les substances qui pourront être analysées par des systèmes de mesures in situ et en continu ou sur site dans un futur proche et sur les techniques analytiques les plus utilisées et les plus prometteuses. Cette étude permet aussi d'avoir un aperçu des laboratoires et pays qui sont fortement impliqués dans le développement de nouveaux capteurs. La quantité de références bibliographiques sur ce sujet pouvant être très importante, nous nous sommes focalisés sur des capteurs permettant la mesure de mesurant substances réglementées DCE et des composés majeurs permettant la caractérisation globale des eaux.

1. DEFINITIONS ET CLASSIFICATION DES CAPTEURS

1.1 MODES D'UTILISATION DES CAPTEURS

Les capteurs peuvent être utilisés de deux manières différentes en fonction de leur implémentation dans les systèmes de mesure :

- en mode instantané : les capteurs sont pilotés manuellement mais le dispositif permet de réaliser des mesures ponctuelles directement sur site. Ces dispositifs peuvent être assimilés à des systèmes d'analyses portables.

- en mode continu : les capteurs permettent d'acquérir des informations sur la composition chimique de l'environnement par la mesure autonome et répétée d'un ou plusieurs paramètres d'intérêt. Les fréquences d'acquisition dépendent des systèmes mais l'ordre de grandeur se situe généralement entre une analyse par seconde à une analyse par heure.

Suivant leur configuration, les systèmes de mesure en continu peuvent être classés en deux grandes catégories (Gantois et al., 2016 ; Figure 1):

- les systèmes in situ : le capteur ou la sonde (c'est-à-dire le capteur et l'ensemble du système permettant l'acquisition des mesures et le stockage des données) réalise l'analyse directement dans le milieu ;

- les systèmes en ligne : un échantillon est automatiquement prélevé et distribué vers l'appareil de mesure. L'appareil de mesure peut être alors une réplique automatisée des appareils et méthodes d'analyses de laboratoire (par exemple techniques colorimétriques pour les anions, mesure de carbone organique par oxydation thermique ou chimique...).

Une troisième configuration dite « off line » ou sur site est également rencontrée. Dans ce cas, les mesures sont réalisées sur site immédiatement après avoir effectué un prélèvement manuel.

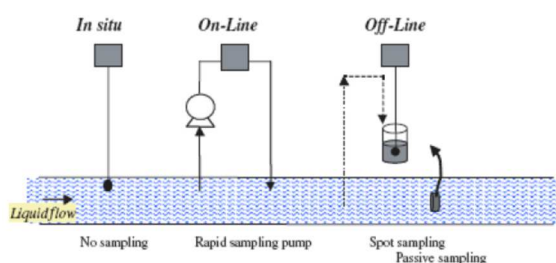


Figure 1 : Schéma du principe de mesure des capteurs et instruments in situ, en ligne et sur site

Il existe aussi des capteurs micro-fluidiques qui se basent sur de nouvelles techniques de traitement et de manipulation des fluides utilisant des canaux de diamètres allant d'une centaine de nanomètres à une centaine de micromètres. Ces capteurs, qui mesurent à peine quelques centimètres carrés, peuvent réaliser de multiples fonctions avant l'analyse comme la préparation, le mélange ou la dilution des échantillons.

1.2 DIFFERENTS TYPES DE CAPTEURS

Les capteurs sont composés d'un récepteur, partie sensible à la présence d'un composé distinct ou d'une famille de composés, et d'un transducteur qui génère un signal dont l'intensité est fonction de la concentration du (ou des) composé(s) ciblé(s) (Sekhar et al., 2010). Il existe différents critères pour classer les capteurs. Il est, par exemple, possible de différencier les capteurs selon la nature du transducteur ; les plus utilisés pour la caractérisation chimique des eaux sont :

- les transducteurs électrochimiques : mesure d'un signal électrique capté par une ou plusieurs électrodes (ampérométrie, potentiométrie, voltamétrie...) ;
- les transducteurs optiques : mesure d'absorbance UV-visible, mesure d'émission de fluorescence ou mesure des conditions de résonance (résonance plasmonique de surface) ;
- les transducteurs piézoélectriques : mesure de l'oscillation d'un cristal de quartz.

Comme les transducteurs, il existe différents types de récepteurs. Les récepteurs sont souvent composés d'une surface sensible et sélective dont les propriétés physicochimiques changent en présence du composé qui interagit avec elle. Ainsi, nous pouvons différencier deux grandes familles de capteurs en fonction de la nature de la couche sensible :

- les capteurs chimiques : ils n'intègrent pas d'éléments biologiques dans leur composition. Ils sont principalement utilisés en électrochimie sous forme d'électrodes ou de membranes sélectives. Des molécules sensibles au composé d'intérêt peuvent être fixées sur une surface pour améliorer la sélectivité du capteur.

- les capteurs biologiques ou biocapteurs : ils sont composés de récepteurs biologiques naturels ou synthétiques. Le signal physique obtenu est issu de la reconnaissance et de la fixation du composé sur le récepteur stimulus biologique. L'élément de reconnaissance biologique peut être un élément d'affinité biologique (anticorps, récepteurs, ADN) ou un élément de reconnaissance biocatalytique (enzymes, microorganismes).

1.3 CARACTERISATION DES PERFORMANCES DES CAPTEURS

Au niveau normatif, la norme internationale NF EN ISO 15839 (2006) décrit des procédures d'essais de performance du matériel d'analyse/capteurs directs dans l'eau. Un projet de norme sur les protocoles d'évaluation des dispositifs de mesure en continu et portables (prEN 17075) est aussi en cours de finalisation et devrait être publiée en 2018. Les performances des capteurs peuvent être décrits par de nombreuses caractéristiques qu'il est possible de déterminer en laboratoire.

Les performances métrologiques, évaluées en conditions contrôlées au laboratoire, sont :

- la répétabilité : écart type des mesures répétées sur une même solution pendant une période de temps courte (quelques heures) ;

- le biais : différence entre la moyenne des mesures répétées sur une même solution et la mesure obtenue au moyen d'une méthode de référence ;

- erreur : écart entre la mesure obtenue avec le dispositif de mesure et la mesure obtenue au moyen d'une méthode de référence ;

- l'écart au modèle de linéarité : condition dans laquelle les concentrations mesurées par le système sur des solutions d'étalonnage ont un rapport linéaire avec les valeurs de référence du composé à déterminer ;

- la limite de détection (LD) : concentration du composé la plus faible qui peut être détectée.

- la limite de quantification (LQ) : concentration du composé la plus faible pouvant être mesurée avec un niveau acceptable d'exactitude et de fidélité ;

- la gamme de mesure : variation possible de la concentration du composé à mesurer définie par une valeur minimale et une valeur maximale.

Les performances intrinsèques à chaque dispositif de mesure sont :

- le temps de réponse ;
- la dérive à court terme ;
- la sélectivité : degré de capacité du capteur à déterminer un composé particulier dans une matrice complexe sans interférences dues aux autres composants de ce mélange ;
- la sensibilité : paramètre qui exprime la variation du signal de sortie en fonction de la variation du signal d'entrée exprimée comme la pente de la régression linéaire du signal de sortie en fonction du signal d'entrée ;
- les interférences (physiques, chimiques, biologiques).

Les performances de fonctionnement, évaluées en conditions contrôlées au laboratoire, sont :

- la tension d'alimentation ;
- l'impédance de sortie ;
- la température de l'eau, le débit de l'eau, la force ionique de l'eau ...

Les performances liées à l'environnement, évaluées en conditions contrôlées au laboratoire, sont :

- la température ;
- l'humidité ambiante.

Les études sur le développement de capteurs et la détermination de leurs performances décrites dans les articles scientifiques ne font généralement pas référence à des textes normatifs pour justifier le choix des caractéristiques testées et le protocole et méthode employés pour obtenir ces informations. Cependant, une grande majorité des études faisant partie de ce panorama caractérisent les capteurs développés à l'aide de la plupart des caractéristiques mentionnées ci-dessus.

2. ANALYSE GLOBALE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES RETENUES

2.1 METHODOLOGIE APPLIQUEE POUR REALISER LE PANORAMA

Cette veille bibliographique sur les capteurs en développement se base essentiellement sur la littérature scientifique. Quelques informations obtenues dans des documents édités pour des conférences (acte de congrès) ont aussi été intégrés. Un aperçu du nombre de publications scientifiques par recherche de mots-clés basés sur les différents types d'eau est donné dans le Tableau 1. Cet aperçu ne permet pas de différencier les études qui développent des capteurs des études qui utilisent des capteurs pour décrire la qualité des eaux. Cette recherche fait apparaître

près d'un million d'articles en se basant sur le seul mot-clé « capteur » (« sensor »). Sur l'ensemble de ces articles, 1,1% est consacré aux eaux douces et 2,1% aux eaux marines. Seulement 0,4% des articles semble concerner les eaux résiduaires. Pour information, le pourcentage d'articles dans le domaine médical (associés aux mots-clés « médecine », « santé » et « fluide biologique ») est bien plus élevé avec 4,4%.

Tableau 1 : Nombre d'articles traitant des capteurs (sensor) dans différents domaines (eaux douces, eaux saumâtres et marines, eaux résiduaires, domaine médical) d'après une recherche avec le moteur de recherche Scopus dans les titres, résumés et mots-clés des articles (en date de juin 2017).

Domaines (définis par l'association de mots clés)	Nombre d'articles	% du total
sensor	905 489	
sensor AND (freshwater OR river OR lake OR surface water OR groundwater)	9 816	1.1%
sensor AND (marin OR sea OR estuary OR ocean)	19 245	2.1%
sensor AND (wastewater OR effluent OR sewage)	3 290	0.4%
sensor AND (medicine OR health OR biological fluid)	39 746	4.4%

Il est aussi intéressant d'observer l'évolution du nombre d'articles dans le temps (Figure 2a). Le nombre annuel d'articles contenant le terme « capteur » dans le domaine des eaux saumâtres et marines est faible et relativement stable dans les années 1980 (entre 74 et 147 articles), puis augmente régulièrement jusqu'en 2016 où 956 articles sont recensés. De façon générale, et tout particulièrement dans les années 1980 et 1990, le terme capteur fait référence à des mesures physiques dans le domaine de l'océanographie comme par exemple pour les mesures atmosphériques ; les mesures de courant, hauteur de vagues, température, couverture de glace ; ou des mesures par radar, sonar et satellite.

Le nombre annuel d'articles contenant le terme « capteur » dans le domaine des eaux douces est quasiment nul dans les années 1980 puis augmente très légèrement dans les années 1990 pour dépasser 100 articles en 2000. Dans les années 2000 et 2010, le nombre d'articles augmente plus rapidement pour atteindre plus de 631 en 2016. Cette évolution montre le fort intérêt pour les capteurs et donc pour la mesure in situ et en continu ou sur site dans les eaux de surface, principalement les rivières, dès les années 2000. Contrairement aux eaux marines, les études dans les eaux douces concernent plus largement des capteurs permettant de réaliser des mesures de qualité chimique des eaux.

Enfin, le nombre d'articles contenant le terme « capteur » dans le domaine des eaux résiduaires est plus faible que pour les deux autres types d'eaux (Figure 2b). Entre 1980 et 1995, le nombre d'articles est inférieur à 30 par année. Il augmente régulièrement entre 1995 et 2010 pour

atteindre 145 en 2010. Durant les années 2010, le nombre d'articles dans le domaine des eaux résiduaires reste relativement stable (compris entre 138 et 157 articles).

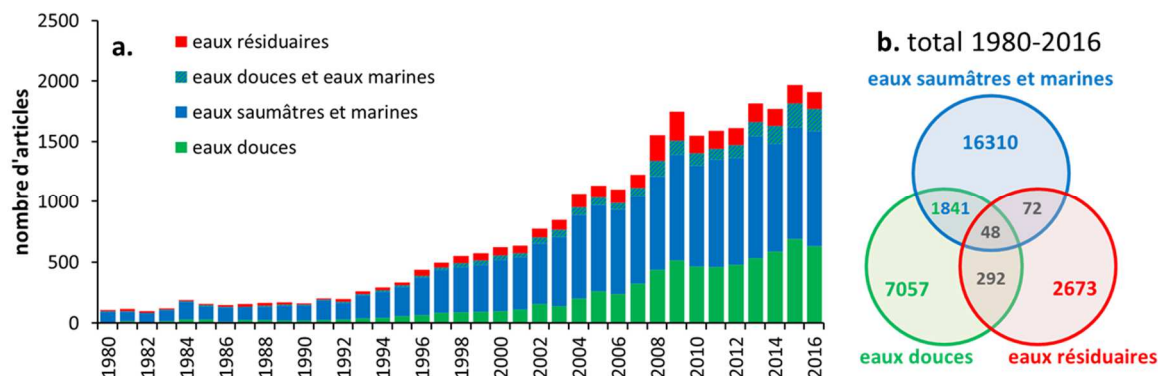


Figure 2 : (a) Evolution du nombre d'articles scientifiques traitant de capteur dans différents types d'eaux (eaux douces, eaux marines, eaux usées) d'après une recherche avec le moteur de recherche Scopus dans les titres, résumés et mots-clés des articles (en date de juin 2017). (b) Nombre total des articles trouvés entre 1980 et 2016.

Cet inventaire bibliographique (non exhaustif) de capteurs en développement a été réalisé en ne prenant en compte que les années les plus récentes afin d'avoir un aperçu des développements en cours. Ce travail permettra d'anticiper sur les substances qui pourront être analysées par des systèmes de mesures in situ et en continu ou sur site dans un futur proche et les techniques analytiques les plus utilisées et les plus prometteuses. Ainsi, nous nous sommes focalisés sur les 5 dernières années (2012-2017), même si quelques articles intéressants publiés avant 2012 ont été sélectionnés (Tableau 2). Au total, 167 articles scientifiques sont examinés dans cet inventaire. D'autres articles ont été étudiés mais n'ont pas été inclus dans ce panorama pour diverses raisons : informations trop partielles (résumé seulement accessible, trop peu de détails dans l'article), substances mesurées non retenues pour l'inventaire, article traitant essentiellement du développement de nouveaux matériaux de capteurs et pas assez de l'analyse des substances en conditions de laboratoire...

Tableau 2 : Nombre d'articles pris en compte dans cette étude en fonction de leur année de parution.

< 2010	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	TOTAL
15	7	12	20	18	24	25	32	14	167

Afin de fournir un panel représentatif des différentes technologies émergentes, ce panorama s'est focalisé sur les polluants qui font partie de la liste des substances de l'état chimique des eaux de surface et polluants spécifiques de l'état écologique des eaux de surface de la DCE (Arrêté du 7 août 2015). A ces polluants, il a été également ajouté quelques substances de la liste des substances pertinentes à analyser (Arrêté du 7 août 2015) comme le Bisphénol A qui constitue un polluant environnemental avéré (perturbateur endocrinien) et qui a fait l'objet d'un nombre important d'études. De plus, quelques paramètres majeurs de la liste des paramètres physico-

chimiques pour les eaux cours d'eau (Arrêté du 7 août 2015) ont aussi été recherchés car ils permettent de caractériser globalement la composition de l'eau. Les composés qui ont été spécifiquement recherchés pour réaliser ce panorama sont répertoriés dans le Tableau 3.

Pour prendre en compte l'état d'avancement du développement des capteurs, nous avons classé les tests réalisés dans la littérature en 4 niveaux :

1. Seulement des tests préliminaires ont été réalisés en laboratoire et les performances du capteur sont succinctes avec peu d'informations sur les tests réalisés en laboratoire.

2. Les performances du capteur sont évaluées (ex : limite de détection, linéarité, gamme de mesure, sélectivité) et des tests d'exactitude ont été réalisés en milieu contrôlé sur des eaux synthétiques.

3. Les performances du capteur sont bien détaillées et des tests d'exactitude ont été réalisés en milieu contrôlé sur des matrices réelles.

4. Les performances du capteur sont bien détaillées et des tests d'exactitude ont été réalisés sur le terrain.

Afin de se rendre compte du niveau des LD et LQ des capteurs, ces valeurs ont été systématiquement comparées aux LQ des couples « paramètre-matrice » de l'agrément des laboratoires effectuant des analyses dans le domaine de l'eau et des milieux aquatiques (Journal Officiel du 11 février 2017, NOR : DEVL1703763V ; Tableau 3).

Tableau 3 : Liste des substances spécifiquement recherchées dans la littérature pour réaliser l'inventaire bibliographique sur les capteurs en développement. Limites de quantification (LQ) des couples « paramètre-matrice » de l'agrément des laboratoires effectuant des analyses dans le domaine de l'eau et des milieux aquatiques (Journal Officiel du 11 février 2017, NOR : DEVL1703763V) et limites de détection (LD) minimales et maximales (converties en µg/L ou mg/L pour une meilleure comparaison avec les LQ agrément) déterminées pour les capteurs recensés (n : nombre de capteurs affichant une LD).

Substances	Listes surveillance	Familles de substance	unité	LQ eau douce	LQ eau résiduaire	LQ eau saline	LD min	LD max	n
4-nonylphénol	substance de l'état chimique	alkylphénols, nonylphénols et bisphénols	µg/L	0.1	0.5	0.1	0.002	70	6
4-octylphénol	substance de l'état chimique	alkylphénols, nonylphénols et bisphénols	µg/L	0.1	0.5	0.03	0.002	87	2
Hexachlorobenzène	substance de l'état chimique	benzène et dérivés	µg/L	0.003	0.01	0.003			
Anthracène	substance de l'état chimique	HAP	µg/L	0.01	0.01	0.01	0.00002		1
Benzo(a)pyrene	substance de l'état chimique	HAP	µg/L	0.01	0.01	0.01	0.001	0.7	3
Benzo(k)fluoranthène	substance de l'état chimique	HAP	µg/L	0.005	0.005	0.005	0.025	0.025	1
HAP	substance de l'état chimique	HAP	-	-	-	-			
Naphtalène	substance de l'état chimique	HAP	µg/L	0.05	0.05	0.05	0.06		1
Cadmium	substance de l'état chimique	métaux et métalloïdes	µg/L	0.025	1	0.07	0.032	7.1	10
Mercuré	substance de l'état chimique	métaux et métalloïdes	µg/L	0.015	0.2	0.015	0.0001	82	17
Nickel	substance de l'état chimique	métaux et métalloïdes	µg/L	1	5	1	2.1	11.8	4
Plomb	substance de l'état chimique	métaux et métalloïdes	µg/L	0.4	2	0.4	0.000006	104	12
PCB 101	substance de l'état chimique	PCB	µg/L	-	0.005	-			
Chlorfenvinphos	substance de l'état chimique	pesticides	µg/L	0.03	0.05	0.03	0.0005	0.0005	2
Chlorpyrifos	substance de l'état chimique	pesticides	µg/L	-	-	-	0.0004	1.4	7
dicofol	substance de l'état chimique	pesticides	µg/L	-	0.05	-		0.05	1
diuron	substance de l'état chimique	pesticides	µg/L	0.03	0.05	0.03	0.0003	0.001	2
Endosulfan	substance de l'état chimique	pesticides	µg/L	0.025	0.02	0.0001	0.01	0.01	1
Isoproturon	substance de l'état chimique	pesticides	µg/L	0.02	0.05	0.02	0.05	1	2
Lindane	substance de l'état chimique	pesticides	µg/L	0.002	0.02	0.0002	0.001	3	2
Trifluraline	substance de l'état chimique	pesticides	µg/L	0.01	0.01	0.01		0.008	1
DEHP	substance de l'état chimique	phtalates	µg/L	0.4	1	0.4			
Arsenic	polluant spécifique de l'état écologique	métaux et métalloïdes	µg/L	1	5	-	0.14	0.75	5
Chrome	polluant spécifique de l'état écologique	métaux et métalloïdes	µg/L	1	5	-	0.31	15.6	7
Cuivre	polluant spécifique de l'état écologique	métaux et métalloïdes	µg/L	0.5	5	-	0.00006	64	11
Zinc	polluant spécifique de l'état écologique	métaux et métalloïdes	µg/L	2	5	-		3.3	1
Atrazine	polluant spécifique de l'état écologique	pesticides	µg/L	0.03	0.03	0.03	0.0002	0.22	7
Bisphénol A	substance pertinente commune métropole et DOM	alkylphénols, nonylphénols et bisphénols	µg/L	0.05	-	-	0.00004	2000	18
Manganèse	substance pertinente commune métropole et DOM	métaux et métalloïdes	µg/L	1	5	-		2.8	1
Sélénium	substance pertinente commune métropole et DOM	métaux et métalloïdes	µg/L	0.5	-	-		10	1
Aluminium	substance pertinente pour la métropole	métaux et métalloïdes	µg/L	2	20	-		2.7	1
Fer	substance pertinente pour la métropole	métaux et métalloïdes	µg/L	5	25	-		14.6	1
Etain	substance pertinente pour la métropole	métaux et métalloïdes	µg/L	1	5	-		6	1
Argent	substance pertinente pour les DOM	métaux et métalloïdes	µg/L	0.05	-	-	1	70	3
Baryum	substance pertinente pour les DOM	métaux et métalloïdes	µg/L	5	-	-		5	1
alcalinité	paramètre physico-chimique	paramètres majeurs	-	-	-	-			
ammonium	paramètre physico-chimique	paramètres majeurs	mg/L	0.01	0.5	0.0009	0.0002	0.04	3
calcium	paramètre physico-chimique	paramètres majeurs	mg/L	1	-	-			
carbonate	paramètre physico-chimique	paramètres majeurs	mg/L	15	-	-			
DBO	paramètre physico-chimique	paramètres majeurs	mg/L	0.5	3	-			
DCO	paramètre physico-chimique	paramètres majeurs	mg/L	30	30	-	0.2	3.6	7
dureté de l'eau	paramètre physico-chimique	paramètres majeurs	-	-	-	-			
nitrate	paramètre physico-chimique	paramètres majeurs	mg/L	0.5	1	0.0124		0.07	1
nitrite	paramètre physico-chimique	paramètres majeurs	mg/L	0.01	0.05	0.0014	0.003	5.5	
pH	paramètre physico-chimique	paramètres majeurs	-	-	-	-			

Finalement, le résultat de ce travail se présente sous la forme d'un tableau (Annexes 1 et 2) listant l'ensemble des références bibliographiques retenues et pour lesquels les informations suivantes ont été reportées :

- substance analysée
- type de capteur
- technique et sous-technique analytique
- types de matrices testées
- avancement du développement
- gamme de mesure
- LD ou LQ
- auteurs (1^{er} auteur)
- année de publication
- journal
- organisme principal développeur
- pays principal développeur

2.2 TECHNIQUES ANALYTIQUES LES PLUS UTILISEES

Les techniques analytiques mises en œuvre pour l'analyse des substances organiques ou inorganiques par les différents capteurs recensés dépendent principalement du type de transducteur comme indiqué au paragraphe 1.2. Les deux principales techniques utilisées dans cet inventaire sont des techniques électrochimiques et optiques (Figure 3). Parmi les techniques électrochimiques, nous pouvons citer :

- l'ampérométrie : technique de titrage qui repose sur la détermination de l'intensité de courant qui traverse une cellule électrochimique composée par une (ou deux) électrodes indicatrices et une électrode de référence. La différence de potentiel imposée entre les deux électrodes est constante.

- la coulométrie : mesure de la quantité d'électricité nécessaire à l'oxydation ou à la réduction électrochimique totale de la substance à doser (le potentiel électrique est maintenu constant).

- la potentiométrie : détermination de la différence de potentiel qui s'établit entre une électrode indicatrice sensible à un composé ou ion de la solution étudiée et une électrode de référence de potentiel constant (un courant nul est imposé dans le système). Cette différence de potentiel est proportionnelle à l'activité de l'ion présent dans le milieu où le capteur est plongé. Parmi les électrodes potentiométriques, on retrouve les électrodes de mesure de pH et les électrodes spécifiques (ou ISE pour « ionic specific electrode »).

- la voltammétrie (ou voltampérométrie) : détermination du flux de courant résultant de l'oxydation ou de la réduction de composés électroactifs présents en solution sous l'effet d'une

variation contrôlée de la différence de potentiel entre deux électrodes. La variation du potentiel imposé à l'électrode de travail en fonction du temps définit différentes méthodes voltamétriques (ex. : voltammétrie cyclique (CV), voltammétrie à impulsions différentielles (DPV), voltammétrie par redissolution anodique à ondes carrées (SWASV), ...).

Les techniques optiques peuvent être différenciées en sous-techniques. Les plus utilisées dans ce panorama sont :

- la colorimétrie ou spectrophotométrie UV-visible : mesure du changement d'absorbance dans le domaine UV-visible quand une substance spécifique se lie à la surface du capteur. Dans cette étude, nous qualifierons de colorimétrie les techniques d'analyses basées sur l'ajout, directement dans un échantillon, de nanoparticules réagissant avec un composé spécifique ou sur la mise en contact d'un support (type bandelette) couvert de ces nanoparticules avec l'échantillon ; dans ces deux cas, les analyses ne sont pas automatisées et sont généralement réalisées avec un spectrophotomètre de laboratoire ou par détection visuelle de l'opérateur (système portable ou sur site).

- la fluorescence : mesure du changement d'émission de fluorescence quand une substance spécifique se lie à la surface du capteur.

- la résonance des plasmons de surface : méthode de mesure de la liaison d'un "ligand" sur un "récepteur" adsorbé à la surface d'une couche métallique. A l'interface des liaisons, l'indice de réfraction change en fonction de la concentration de la substance spécifique qui se lie aux récepteurs. Un système optique permet de mesurer ces changements.

Une autre technique, moins utilisée dans ce panorama, est la piézoélectricité avec microbalance à cristal de quartz.

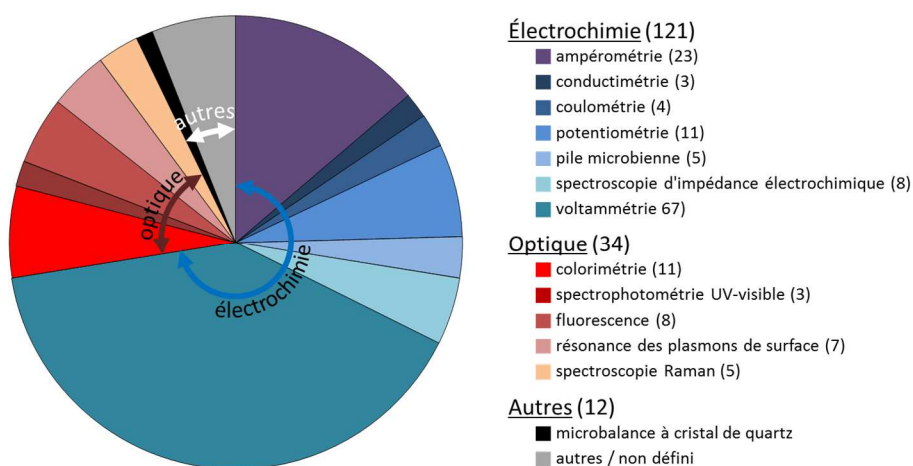


Figure 3 : Répartition des techniques et sous-techniques analytiques avec les capteurs recensés dans cette étude.

2.3 ORIGINE GEOGRAPHIQUE DES DEVELOPPEMENTS

Une recherche sur le moteur de recherche Scopus avec le mot-clé « sensor » et en limitant les réponses aux années 2012-2017 sur les sujets de sciences environnementales et de chimie fait apparaître 1491 articles répartis dans 90 pays (Figure 4). Encore une fois, ce genre de recherche peut donner une idée globale sur les pays travaillant sur le sujet des capteurs mais ne permet pas de différencier les études qui développent des capteurs de celles qui les utilisent.

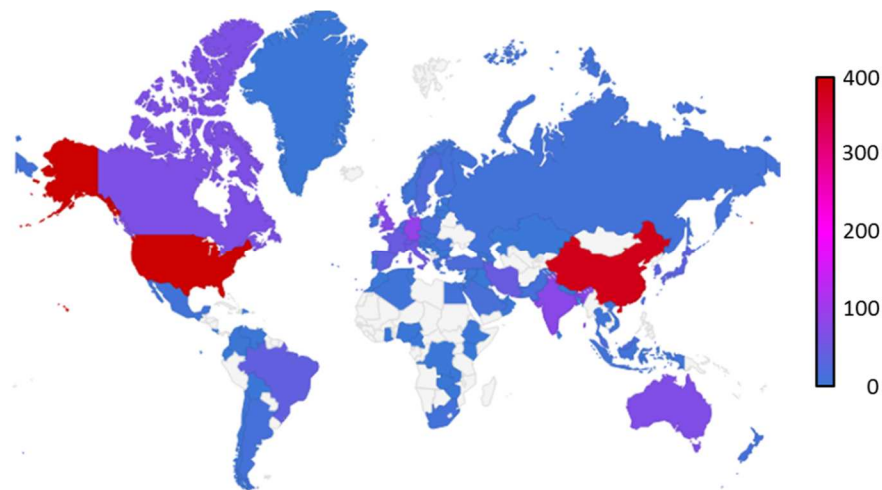


Figure 4 : Localisation par pays des articles sélectionnés pour réaliser cette veille bibliographique.

En se focalisant sur les études sélectionnées dans cette veille bibliographique, on s'aperçoit que plus de la moitié des articles (74 articles) proviennent d'organismes de recherche localisés en Asie. Les organismes de recherche chinois sont nombreux avec un peu plus de 30 universités et instituts. Parmi les plus productives, nous pouvons citer les universités « Shandong University of Technology » ou « Hunan University ». Les autres pays productifs de l'Asie sont l'Inde (15 articles), l'Iran (9 articles), la Corée du Sud (6 articles) et la Malaisie (6 articles). Seulement 3 articles proviennent des USA alors que ce pays apparaît comme le pays le plus productif sur la carte de la Figure 4. Ceci peut provenir du fait que seul le pays associé au premier auteur ou à la majorité des auteurs a été reporté dans cette étude alors que la recherche sur le moteur de recherche Scopus fait apparaître tous les pays des auteurs. En effet, plusieurs articles recensés dans cette veille bibliographique ont un ou deux co-auteurs affiliés à une université américaine. Les pays européens sont bien représentés dans ce panorama avec la Suisse (8 articles), l'Espagne (5 articles), la France (4 articles), la Pologne (4 articles) et l'Italie (3 articles) comme pays les plus productifs.

3. SYNTHÈSE DES CAPTEURS PAR FAMILLES DE COMPOSÉS

3.1 MICROPOLLUANTS ORGANIQUES

3.1.1 PESTICIDES

De nombreux travaux ont été consacrés aux pesticides, ce qui montre l'intérêt des organismes de recherche pour ces derniers. Pour l'ensemble de ces composés, la technique analytique principalement utilisée pour les capteurs est électrochimique. En effet, les technologies utilisées sont la voltammétrie cyclique, à ondes carrées et à impulsions différentielles, la conductimétrie, la spectrométrie d'impédance électrochimique, l'ampérométrie et la chronoampérométrie. Concernant les interfaces, les technologies sont variées et consistent souvent en l'inhibition d'enzyme et d'ADN couplée à des nanoparticules, tel que les nanotubes de carbone comme substrats. Ces capteurs sont assez aboutis, les recherches étant principalement au niveau d'avancement 3, avec des tests sur des eaux de lacs et de rivières. Les LD correspondantes sont très basses, de l'ordre de la nano mole voire plus bas encore pour certains capteurs. Ainsi, la plupart des capteurs ont des LD inférieures aux LQ des couples « paramètre-matrice » de l'agrément des laboratoires (Tableau 3). Par exemple, les capteurs pour le diuron et le chlorfenvinphos ont des LD 10 fois inférieures à ces LQ. Par contre, les capteurs pour l'isoproturon ont des LQ supérieures aux LQ préconisées. Concernant les organismes de recherche, ils sont d'origine diverses, chinoise, indienne, turque par exemple.

3.1.2 HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)

Pour les HAPs, le benzo(a)pyrène, le naphthalène, le phénanthrène, l'anthracène et le benzo(k)fluoranthène, la seule technique d'analyse recensée est l'électrochimie avec comme sous-techniques la voltammétrie cyclique et à impulsions différentielles, l'ampérométrie et la potentiométrie. Comme pour les pesticides, les interfaces sont diversifiées : plusieurs capteurs utilisent une technique immunologique, mettant en jeu des anticorps spécifiques au composé analysé, d'autres utilisent l'inhibition d'enzyme et les nanoparticules. Dans l'ensemble, les techniques sont semblables à celles utilisées pour les pesticides. En ce qui concerne les organismes à l'origine des recherches, ils sont pour la majorité chinois. La Turquie et les USA sont également assez impliqués dans ces recherches. Certains capteurs développés semblent suffisamment performants pour fonctionner sur des eaux chargées, comme l'eau de rejet d'une cokerie par exemple. Concernant les performances analytiques, ces capteurs permettent de descendre très bas en concentration jusqu'à la pico mole pour les plus performants et la nano mole pour la majorité des autres (Tableau 3). Cependant, un seul capteur de benzo(a)pyrène sur 3 possède une LD inférieure au LQ pour l'agrément des laboratoires (noté « LQ agrément » dans le reste du

document) et la LD du capteur de benzo(k)fluoranthène est 5 fois plus élevée que la LQ agrément. En revanche, la LD du capteur d'anthracène est plus de 100 fois plus faible que la LQ de l'agrément. Ces capteurs sont pour la plupart bien aboutis (niveaux de développement 2 à 3).

3.1.3 PHENOLS (HORS BISPHEENOL A)

Cette catégorie ne comprend globalement que le 4-nonylphénol et le 4-octylphénol, avec cependant un capteur capable d'analyser également le pentylphénol. Comme pour les paramètres précédents, la technique d'analyse est exclusivement électrochimique avec comme sous-techniques la voltammétrie cyclique et à impulsion différentielles et la spectrométrie d'impédance électrochimique. Ici également, les technologies d'interface sont basées sur les nanoparticules, les polymères à empreintes moléculaires (MIPs), et l'inhibition d'ADN. Les organismes de recherche sont aussi pour la plupart chinois avec des collaborations avec les australiens. Pour ce qui est des performances analytiques, les capteurs permettent d'atteindre le niveau de la nano et pico mole, dans des matrices naturelles. Cependant, les LD de l'ensemble des capteurs étudiés permettant la mesure de 4-nonylphénol et 4-octylphénol sont supérieures aux LQ agrément, à l'exception d'un micro-capteur intégrant une étape de pré-concentration (Noh et al., 2010). Ces capteurs sont pour la plupart bien aboutis (niveaux de développement 2 à 3).

3.1.4 PHTALATES ET BISPHEENOL A

Contrairement aux autres composés évoqués, l'électrochimie n'est pas la seule technique employée pour l'analyse des phtalates et du bisphénol A, même si elle reste majoritaire. En effet, la résonance de plasmons de surface ou la fluorescence sont également cités. Les sous-techniques électrochimiques employées sont les mêmes que pour les autres composés. En termes d'interface, les nanoparticules et les bio-interfaces sont largement étudiées. D'autres technologies ne sont à l'étude que pour les composés de cette famille, les MEMS (Microsystème électromécanique), les aptamères et les points quantiques par exemple. Comme pour les autres polluants, les organismes de recherche sont principalement chinois mais d'autres pays tels que l'Inde, le Pakistan et la Japon sont aussi à l'origine d'études sur l'analyse de ces composés. Les tests ont été menés pour ces capteurs sur des matrices naturelles, des eaux de rivières, de lacs et même des eaux usées. Les performances analytiques associées permettent de descendre à la nano mole pour la plupart des dispositifs. Les LD des capteurs de bisphénol A sont très variées et vont de 40 pg/L à 2 mg/L (Tableau 3) et seulement 4 capteurs sur 18 possèdent une LD inférieure à la LQ agrément. Les développements de ces capteurs sont généralement bien aboutis et ont été jugés pour la plupart au niveau d'avancement 3.

3.2 METAUX ET METALLOÏDES

3.2.1 CADMIUM

Les capteurs pour la mesure de l'ion cadmium (+II) sont basés sur différentes techniques analytiques dont la plus utilisée est la voltammétrie, principalement par redissolution anodique à ondes carrées qui permet une étape de pré-concentration. Une électrode spécifique (potentiométrie) et trois capteurs optiques (fluorescence et résonance des plasmons de surface) ont aussi été développés. L'avantage de la voltammétrie est qu'elle permet l'analyse simultanée de plusieurs métaux. Ainsi, il est aussi possible d'analyser le plomb avec ces capteurs électrochimiques. La quasi-totalité de ces capteurs sont des capteurs chimiques. Les organismes de recherche sont principalement d'origines asiatiques : indienne, iranienne, chinoise, thaïlandaise et vietnamienne. Les tests ont tous été réalisés sur des eaux de surface, parfois dopées pour augmenter les concentrations à mesurer. Les LD des capteurs sont relativement élevées et supérieures aux LQ agrément pour les eaux douces (Tableau 3). Les développements de ces capteurs sont généralement bien aboutis et ont été jugés pour la plupart au niveau d'avancement 3.

3.2.2 PLOMB

Les techniques mises en œuvre pour les capteurs de l'ion plomb (+II) sont nombreuses : principalement voltammétrie (par redissolution anodique, à impulsions différentielles, cyclique), et aussi 4 capteurs optiques (2 colorimétriques, fluorescence et spectroscopie Raman). La plupart des capteurs développés permettent l'analyse d'autres métaux comme le cuivre, le cadmium ou le mercure. Contrairement aux capteurs pour le cadmium, 5 capteurs pour le plomb sur 12 sont des biocapteurs (souvent des aptamères d'ADN greffés sur des particules d'or). Comme pour le cadmium, les organismes de recherche sont principalement d'origines asiatiques avec une forte contribution des organismes chinois. Les tests ont tous été réalisés sur des eaux de surface, parfois dopées pour augmenter les concentrations à mesurer ; quelques capteurs ont aussi été testés avec succès dans des eaux résiduaires ou des eaux marines. Les LD de ces capteurs sont très variables, allant de quelques pg/L à 100 µg/L (Tableau 3). Sur 12 capteurs, 4 ont une LD inférieure aux LQ agrément pour les eaux douces et salines et 6 possèdent une LD inférieure à la LQ agrément pour les eaux résiduaires. Les développements de ces capteurs sont généralement bien aboutis et ont été jugés pour la plupart au niveau d'avancement 3.

3.2.3 MERCURE

Il existe de nombreuses études sur le développement de capteurs pour l'ion mercure (+II) et ce panorama en recense 18 au total. Les capteurs permettant l'analyse de mercure sont

essentiellement basés sur des mesures optiques : colorimétrie (nano-particules fonctionnalisées avec des molécules de reconnaissance chimiques ou biologiques), fluorescence, résonance des plasmons de surface, spectroscopie Raman. Mais des techniques voltamétriques sont aussi utilisées : impulsions différentielles, à redissolution anodique à ondes carrées, à balayage linéaire ou à impulsions différentielles). Ces capteurs sont répartis équitablement entre capteurs chimiques et biocapteurs, indépendamment du type de technique analytique utilisée. Les organismes de recherche sont chinois pour plus de la moitié. Les tests ont tous été réalisés sur des eaux de surface, dont certaines ont été dopées. Comme pour le plomb, les LD des capteurs pour le mercure sont très variables de 0,1 ng/L à 82 µg/L (Tableau 3). Les LD de 7 capteurs sont inférieures aux LQ agrément pour les eaux douces et salines, et 2 capteurs de plus possèdent une LD plus faible que la LQ agrément pour les eaux résiduaires. Les avancements des développements semblent un peu moins aboutis que pour les capteurs de cadmium et de plomb ; les niveaux d'avancement sont compris entre 2 et 3. Un biocapteur optique utilisant la caméra d'un téléphone portable a été testé sur le terrain mais la LD reste élevée à 3,5 µg/L (Wei et al., 2014).

3.2.4 NICKEL

Beaucoup moins de capteurs pour l'ion nickel (+II) ont été recensés par rapport à ceux existants pour le cadmium, le plomb et le mercure. Deux capteurs de nickel sont basés sur des méthodes voltammétriques, un autre utilise la méthode de résonance des plasmons de surface et un dernier capteur colorimétrique de type bandelette a été mis au point. Ce sont tous des capteurs chimiques. Ils ont été testés dans des eaux de surface sauf un capteur qui a été utilisé dans un échantillon de neige. Les LD de ces capteurs sont toutes supérieures aux LQ agrément pour les eaux douces et salines (Tableau 3). Cependant, les deux capteurs optiques possèdent des LD inférieures à la LQ agrément pour les eaux résiduaires. L'état de développement de ces capteurs peut être globalement qualifié d'intermédiaire (niveau d'avancement 2 pour trois capteurs et niveau 3 pour deux capteurs).

3.2.5 CUIVRE

Les capteurs pour le dosage de l'ion cuivre (+II) sont assez nombreux. Ils sont basés sur des techniques analytiques variées, principalement la voltammétrie par redissolution anodique à impulsions différentielles, mais aussi la potentiométrie avec le développement d'une électrode spécifique, et des techniques optiques (fluorescence, résonance des plasmons de surface et spectroscopie Raman). Sur ces 11 capteurs, un seul est un biocapteur. Les organismes chinois sont les plus actifs sur les développements qui sont généralement bien aboutis (généralement classés en niveau d'avancement 3). Ils ont principalement été testés en laboratoire dans des eaux de surface.

Plus de la moitié de ces capteurs ont des LD inférieures aux LQ agrément pour les eaux douces et résiduaires (Tableau 3).

3.2.6 ARSENIC

Les 5 capteurs pour l'analyse de l'arsenic recensés dans ce panorama sont des capteurs chimiques qui utilisent des méthodes voltammétriques (principalement par redissolution anodique à ondes carrées). Ils mesurent tous la forme inorganique la plus toxique de l'arsenic, i.e. As(+III). Les organismes de recherche sur ces capteurs sont variés (Suisse, Chine, Inde et Afrique du Sud). Ils ont été testés dans des eaux de surface sauf un qui a seulement été testé dans une eau de rejet industriel. Ces capteurs sont généralement bien aboutis (niveaux de développement 2 ou 3) comme le montre les LD qui se situent toutes en dessous des LQ agrément pour les eaux douces et résiduaires (Tableau 3).

3.2.7 CHROME

Les capteurs développés pour la mesure du chrome permettent de mesurer, en fonction du capteur, soit Cr (+III), soit Cr (+VI), soit le chrome total. Les techniques sont très variées : fluorescence, spectroscopie Raman, colorimétrie, électroluminescence ou ampérométrie. Deux de ces 7 capteurs sont des biocapteurs. Le niveau de développement de ces capteurs peut être qualifié de moyen (généralement niveau 2). Ce sont des organismes de recherche chinois qui sont les plus représentés dans les études. Les tests ont généralement été réalisés en laboratoire sur des eaux de surface dopées. Les LD de 5 des 7 capteurs sont inférieures à la LQ agrément pour les eaux résiduaires (Tableau 3).

3.2.8 ARGENT

Trois capteurs chimiques pour la mesure de l'ion argent (+I) ont été retrouvés dans la littérature ces dernières années. Deux capteurs sont basés sur des mesures voltammétriques par redissolution anodique à impulsions différentielles, et un capteur optique est basé sur la spectrophotométrie UV-visible. Les capteurs électrochimiques sont développés par un organisme de recherche malaisien, le capteur optique est développé par des chercheurs iraniens. Leur développement est bien abouti (niveau 3 d'avancement) et ils ont été caractérisés au laboratoire dans des eaux de surface. Cependant, les LD affichées sont toutes supérieures à la LQ agrément pour les eaux douces (Tableau 3).

3.2.9 AUTRES ELEMENTS

Des développements de capteurs pour l'analyse d'autres métaux sont aussi recensés dans ce panorama :

- un capteur chimique pour l'ion aluminium (+III) par fluorescence ;
- un capteur chimique pour l'ion bismuth (+III) par voltammétrie ;
- un capteur chimique pour l'ion cobalt (+II) par voltammétrie ;
- un capteur chimique pour l'ion Fe (+II) par colorimétrie et un autre pour l'ion Fe (+III) par fluorescence ;
- un capteur chimique pour l'ion étain (+IV) par fluorescence ;
- un capteur chimique pour l'ion baryum (+II) par résonance des plasmons de surface.

Leurs niveaux de développement se situent plutôt au niveau 2 mais ils ont été pour la plupart caractérisés dans des eaux de surface. Les LD de ces capteurs sont généralement comprises entre les LQ agrément des eaux douces et celles des eaux résiduaires (Tableau 3).

3.3 PARAMETRES MAJEURS

3.3.1 DEMANDE CHIMIQUE EN OXYGENE (DCO)

Les capteurs pour la mesure de la DCO recensés dans ce panorama sont tous des capteurs chimiques basés sur des techniques électrochimiques, principalement l'ampérométrie. La quasi-totalité de ces capteurs sont développés par des organismes de recherche chinois. Les niveaux d'avancement sont variés, niveau 1 pour un capteur photo-électrochimique à niveau 3 pour la moitié des capteurs. Ces capteurs ont été caractérisés dans des eaux de surface et des eaux résiduaires (paramètre principalement utilisé pour caractériser les eaux usées et traitées). Les LD de ces capteurs sont très faibles comparés aux LQ agrément (Tableau 3) et permettraient de bien mesurer la DCO dans des eaux traitées. Ces capteurs ne mesurent pas directement la DCO mais sont basés sur des relations construites à partir de mesures de DCO par les méthodes de référence normalisées. Un point de vigilance est à souligner : la nature de la matière organique pourrait avoir une influence non négligeable sur la sensibilité des capteurs.

3.3.2 DEMANDE BIOCHIMIQUE EN OXYGENE (DBO)

Les capteurs pour la mesure de la DBO sont tous des biocapteurs. Pour deux d'entre eux, une mesure de consommation d'oxygène est réalisée. Pour les autres, ce sont des méthodes électrochimiques basées sur le fonctionnement des piles microbiennes et donc sur la mesure des électrons produits par les bactéries lors de l'oxydation de la matière organique. Les organismes

réalisant des recherches sur ces capteurs sont très variés : Danemark, Suède, Malaisie, Chine, Singapour, Nouvelle-Zélande. Les niveaux de développement sont généralement au stade 2. Les capteurs sont généralement testés dans des eaux résiduaires. Si des gammes de concentrations de travail sont indiquées, aucune LD n'a été caractérisée. L'intérêt principal de ces capteurs réside dans les temps de réponse qui sont bien plus courts (<24h) que les 5 jours de la méthode de référence. Comme pour les capteurs de DCO, des modèles entre les réponses électrochimiques et des mesures de DBO par des méthodes de référence normalisées sont appliqués afin d'étalonner les capteurs. La nature de la matière organique pourrait avoir une influence non négligeable sur la sensibilité des capteurs.

3.3.3 NITRATE, NITRITE ET AMMONIUM

Peu d'informations sur des développements récents pour des capteurs de nitrate ont été retrouvées. En effet, beaucoup de sondes commercialisées permettent de mesurer ce paramètre (électrodes spécifiques et sondes spectrophotométriques UV-visible). Deux capteurs chimiques basés sur des techniques de coulométrie et de spectroscopie d'impédance électrochimique sont toutefois inventoriés. Ils ont été développés par des universitaires australiens et néo-zélandais. Ces capteurs ont été testés dans des eaux de surface. La LD affichée pour un des capteurs est faible, et largement inférieure à la LQ agrément pour les eaux douces.

Un nombre plus important de capteurs a été recensé pour les nitrites. Ce sont tous des capteurs chimiques principalement basés sur des techniques ampérométriques. Les organismes de recherche impliqués dans ces développements sont majoritairement chinois mais aussi français, suisse et indien. Les niveaux de développement sont généralement au stade de développement 2 avec des tests dans des eaux synthétiques ou des eaux de surface dopées. Les LD vont de quelques $\mu\text{g/L}$ à quelques mg/L et seulement deux capteurs ont une LD inférieure à la LQ agrément pour les eaux douces.

Seulement 3 capteurs sont dénombrés pour la mesure de l'ammonium. Ils utilisent des techniques basées sur la réflectance, la conductimétrie et la piézoélectricité. Ils ont été testés sur des eaux de surface dopées et leur niveau de développement peut être considéré entre 2 et 3. Les LD sont comprises entre 0,2 et 40 $\mu\text{g/L}$ ce qui, pour deux des capteurs est inférieur à la LQ agrément pour l'eau douce (Tableau 3).

3.3.4 CALCIUM ET CARBONATE

Deux électrodes spécifiques (technique coulométrique et potentiométrique) ont été développées pour la mesure de l'ion calcium par des organismes de recherche suisse et indien. Ils

ont été testés dans des eaux du robinet et des eaux de surface. Aucune LQ n'est donnée dans ces deux articles mais des gammes de mesure allant de 0,01 à 0,1 mM et de 0,01 à 10 mM sont toutefois indiquées. Pour les carbonates, deux autres électrodes spécifiques (technique potentiométrique) ont été développées par la même université suisse. Un des capteurs a seulement été testé dans de l'eau ultra-pure dopée alors que l'autre capteur a été testé dans des eaux de surface. Comme pour les capteurs de calcium, aucune LD n'a été déterminée dans ces études.

4. CHOIX DE CAPTEURS INTERESSANTS A TESTER SUR LE TERRAIN

La quasi-totalité des études recensées dans ce rapport testent les capteurs dans des conditions de laboratoire sur des eaux synthétiques ou sur des eaux prélevées dans différents milieux (eaux de surface, eaux du robinet, eaux de mer, eaux résiduaires). Seulement deux organismes ont dépassé le cadre du laboratoire pour réaliser des mesures directement sur le terrain (biocapteur optique pour Hg(II) : Wei et al., 2014 ; capteur potentiométrique pour pH, carbontae, nitrate et calcium : Panfratova et al., 2015). Dans le cadre de l'action Aquaref G2a1 intitulée « Application de nouveaux capteurs de mesure en continu in situ ou sur site dans les eaux de rejets ou de surface », il était proposé de réaliser un premier choix de capteurs pertinents pour lesquels il serait intéressant de réaliser des tests sur le terrain en collaboration avec les personnes développant les capteurs sélectionnés. Ces tests permettraient d'améliorer les protocoles d'évaluation en conditions réelles de dispositifs de mesure en continu et portables en incluant des dispositifs non commercialisés. Surtout, ils permettraient de tester la faisabilité d'utiliser ces nouveaux capteurs pour la surveillance des paramètres chimiques dans les eaux de surface. Outre le fait que ces capteurs doivent être intégrés dans un système autonome incluant l'acquisition des mesures et le stockage des données, il serait important d'évaluer les capacités analytiques de ces capteurs dans des milieux naturels où le biofouling peut altérer la qualité des mesures (voire rendre impossible toute analyse) et aussi sur le long terme (problème de dérive pour la plupart des capteurs). L'influence de la température du fluide à mesurer pourrait aussi être évaluée car elle peut impacter notablement les mesures réalisées par électrochimie.).

Le choix de capteurs pertinents pour réaliser ces tests peut s'appuyer sur différents critères. Le premier est primordial car il concerne l'opportunité et la possibilité de monter une collaboration avec l'organisme qui développe le capteur. Il faut choisir des organismes qui ne comptent pas tester eux-mêmes leurs capteurs sur le terrain mais qui seraient intéressés à avoir des résultats de mesures à long terme sur le terrain. D'un point de vue pratique, les organismes européens (voire français) seraient à privilégier ; ceux-ci représentent tout de même 20% des études recensées dans ce rapport. Il faut aussi que le capteur puisse être intégré à un système déployable sur le terrain, qui permet soit de réaliser les acquisitions en continu et de stocker les données, soit à défaut d'effectuer des

mesures sur site. Les capteurs électrochimiques sont généralement de bons candidats. Il existe par exemple des sondes commercialisées permettant de réaliser des analyses par voltamétrie (e.g. Tercier-Waeber et al., 2009). Il serait intéressant de pouvoir tester un système qui permette d'analyser plusieurs substances, soit simultanément (par exemple analyse de bisphénol A, de nonylphénol et d'éthinylestradiol : Liu et al., 2011 ; Hg(II), As(III), Pb(II) et Cd(II) : Gumpu et al., 2017), soit en intégrant plusieurs capteurs sur un même système d'acquisition. Enfin, les LD des capteurs doivent être suffisamment basses pour pouvoir mesurer des concentrations dans le milieu, par exemple qu'elles soient similaires ou inférieures aux LQ des couples « paramètre-matrice » de l'agrément des laboratoires. De nombreux capteurs recensés dans cette étude ne possèdent pas de LD suffisamment basses pour permettre une mesure de la substance cible dans les eaux environnementales.

Un premier choix de capteurs peut être fait sur cette base, mais il n'a pas encore été possible de contacter les organismes développeurs pour connaître leur intention de caractérisation de performance sur le terrain. En privilégiant les capteurs avec un état de développement 3 (caractérisés en laboratoire sur des eaux réelles), pour lequel il est possible de mesurer une ou plusieurs substances avec une LQ ou LD suffisamment basse, nous pouvons sélectionner les capteurs suivants :

- capteur chimique pour mesurer le **4-nonylphénol** par voltamétrie (DPV) développé à l'Université de Jishou en Chine (Chen, 2013) avec une LD de 0,0035 µg/L ;

- biocapteur pour mesurer l'**endosulfan** par voltamétrie développé au « Key Laboratory of Pesticide and Chemical Biology of Ministry of Education » à Wuhan en Chine (Liu et al., 2012) avec une LD de 0,01 µg/L ;

- biocapteur pour mesurer l'**atrazine** par voltamétrie développé à l'Université d'Hunan en Chine (Liu et al., 2014) avec une LD de 0,016 µg/L ;

- biocapteur pour mesurer le **phénanthrène** et l'**anthracène** par voltamétrie développé à l'Université de Shandong en Chine (Liu et al., 2014) avec une LD de 0,00002 µg/L ;

- capteur chimique pour mesurer **Hg(II), As(III), Pb(II) et Cd(II)** par voltamétrie développé à l'université SASTRA en Inde (Gumpu et al., 2017) avec des LD proches de 0,3 µg/L adaptées pour les eaux résiduaires seulement ;

- capteur chimique pour mesurer **As(III)** par voltamétrie développé à l'Université de Genève en Suisse (Touilloux et al., 2015) avec une LQ de 0,75 µg/L ;

- capteur chimique pour mesurer **Pb(II)** par chronocoulométrie développé à l'Université d'Hunan en Chine (Zhang et al., 2016) avec une LD proche de 0.0025 µg/L ;

- biocapteur pour mesurer **Hg(II)** par voltamétrie développé à l'Université de technologie de Dalian en Chine (Gan et al., 2015) avec une de 0,0002 µg/L ;

- capteur chimique pour mesurer **Cu(II)** par voltamétrie développé à l'Université des Sciences Médicales de Hamedan en Iran (Heidarimoghaddam et al., 2015) avec une LD de 0,01 µg/L ;
- capteur chimique pour mesurer la **DCO** par ampérométrie développé à l'Université de Sciences et Technologie de Huazhong en Chine (Yang et al., 2011) avec une LD de 3,6 mg/L ;
- capteur chimique pour mesurer l'**ammonium** par réflectance développé à l'Université de Pahang en Malaisie (Tan et al., 2012) avec une LD de 0,0079 µg/L.

La quasi-totalité des capteurs sélectionnés sont développés en Chine. De plus, il existe très peu de capteurs permettant de mesurer plusieurs composés simultanément. La plupart des développements analytiques sont justement conduits pour avoir des capteurs les plus sélectifs possibles. Cependant, un capteur permettant d'analyser une famille de composés au travers de la reconnaissance d'une fonction chimique intrinsèque peut se révéler intéressant. Il sera important d'essayer de recenser de tels capteurs dans les mises à jour futures de cette veille bibliographique.

5. CONCLUSIONS

Depuis une trentaine d'années, les capteurs pour la mesure de substances organiques ou inorganiques n'ont cessé d'être développés. Ces capteurs permettent la mesure directe dans le milieu de nombreuses substances DCE de l'état chimique des eaux de surface, polluants DCE spécifiques de l'état écologique des eaux de surface. Une étude bibliographique sur les capteurs permettant la mesure de ces substances a été réalisée à partir d'articles scientifiques publiés ces cinq dernières années principalement. De nombreux articles ont été étudiés et au total 167 articles sont détaillés dans ce panorama.

Les techniques analytiques principales mises en jeu sont des techniques optiques et électrochimiques. Si ces techniques semblent avoir été améliorées lors des dernières années (principalement au travers de la miniaturisation de l'électronique), les développements sur les capteurs concernent principalement la mise au point de nouvelles surfaces de capteurs et la synthèse et l'incorporation de nouveaux récepteurs (chimiques et biologiques) pour permettre l'analyse spécifique de nouvelles substances. Les biocapteurs se développent de plus en plus et permettent l'analyse de nouvelles substances. Ils représentent plus d'un tiers des capteurs inventoriés dans ce panorama. Les organismes de recherche chinois sont très impliqués dans le développement de nouveaux capteurs, mais de nombreux organismes européens en développent aussi.

La grande majorité des articles scientifiques détaillent des tests réalisés en laboratoire sur des eaux de surfaces, parfois dopées pour augmenter les concentrations de la substance d'intérêt. Les capteurs sont généralement caractérisés au travers de leur sensibilité, de leur répétabilité, de

leur gamme de mesure et de leur LD. Pour beaucoup de capteurs, les LD sont encore trop élevées par rapport aux concentrations que l'on peut mesurer par des techniques classiques de laboratoire. Ainsi beaucoup de capteurs possèdent des LD supérieures aux LQ de l'agrément des laboratoires effectuant des analyses dans le domaine de l'eau et des milieux aquatiques comme par exemple pour le nickel, le bisphénol A ou les phénols. Mais certains capteurs comme pour la mesure du diuron, du chlorfenvinphos, de l'arsenic, du cuivre ou de la DCO ont des LD bien en-dessous de ces LQ agrément.

Très peu de capteurs sont testés en conditions réelles et surtout sur le long terme (par exemple durant une semaine ou un mois). Il n'est alors pas possible d'évaluer l'impact du biofouling sur la qualité des mesures ou d'évaluer une éventuelle dérive à long terme pour les capteurs électrochimiques. En se basant sur quelques critères comme le niveau de développement, la ou les substances analysées et les LD annoncées, une liste de capteurs qu'il serait pertinent à tester sur le terrain a été établie. Les capteurs sélectionnés permettent l'analyse de composés inscrits sur les listes des substances de l'état chimique (4-nonylphénol, anthracène, endosulfan, cadmium, mercure, plomb), des polluants spécifiques de l'état écologique (arsenic, cuivre, atrazine) et des paramètres physico-chimiques (DCO, ammonium).

La liste de capteurs proposés dans cette étude n'est pas exhaustive. Une mise à jour de cette veille bibliographique est prévue en 2018 et permettra de compléter le nombre de capteurs recensés. Un effort pourra être réalisé pour recenser des informations qui ne se trouvent pas dans des articles scientifiques comme des actes de congrès ou des manuscrits de thèses (pour la France). La mise à jour permettra aussi d'intégrer des résultats de recherches sur un plus grand nombre de substances. De plus, une recherche de capteurs non spécifiques mais permettant la mesure d'une famille de composés pourra aussi être envisagée.

RÉFÉRENCES

Afshar, M. G., Crespo, G. A., and Bakker, E. (2012) Direct Ion Speciation Analysis with Ion-Selective Membranes Operated in a Sequential Potentiometric/Time Resolved Chronopotentiometric Sensing Mode, *Analytical Chemistry* 84, 8813-8821.

Afshar, M. G., Crespo, G. A., Xie, X., and Bakker, E. (2014) Direct Alkalinity Detection with Ion-Selective Chronopotentiometry, *Analytical Chemistry* 86, 6461-6470.

Alahi, M. E. E., Xie, L., Zia, A. I., Mukhopadhyay, S., and Burkitt, L. (2016) Practical nitrate sensor based on electrochemical impedance measurement, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

Ali, T. A., Mohamed, G. G., and Said, A. H. (2016) Construction and Performance Characteristics of Modified Screen Printed and Modified Carbon Paste Sensors for Selective Determination of Cu(II) Ion in Different Polluted Water Samples, *Chem. Eng. Commun.* 203, 724-735.

Anirudhan, T. S., and Alexander, S. (2015) Design and fabrication of molecularly imprinted polymer-based potentiometric sensor from the surface modified multiwalled carbon nanotube for the determination of lindane (gamma-hexachlorocyclohexane), an organochlorine pesticide, *Biosensors & Bioelectronics* 64, 586-593.

Anu Prathap, M. U., Chaurasia, A. K., Sawant, S. N., and Apte, S. K. (2012) Polyaniline-based highly sensitive microbial biosensor for selective detection of lindane, *Analytical Chemistry* 84, 6672-6678.

Azhari, S., Sathishkumar, P., Ahamad, R., Ahmad, F., and Yusoff, A. R. M. (2016) Fabrication of a composite modified glassy carbon electrode: a highly selective, sensitive and rapid electrochemical sensor for silver ion detection in river water samples, *Analytical Methods* 8, 5712-5721.

Baskeyfield, D. E. H., Davis, F., Magan, N., and Tothill, I. E. (2011) A membrane-based immunosensor for the analysis of the herbicide isoproturon, *Analytica Chimica Acta* 699, 223-231.

Bhattacharjee, T., Jiang, H. R., and Behdad, N. (2015) A Fluidic Colorimetric Sensor Design for Water Hardness Detection, *Sensors Journal* 15, 819-826.

Bobrowski, A., Króllicka, A., Maczuga, M., and Zarębski, J. (2014) A novel screen-printed electrode modified with lead film for adsorptive stripping voltammetric determination of cobalt and nickel, *Sens Actuators, B Chem* 191, 291-297.

Bogdanowicz, R., Czupryniak, J., Gnyba, M., Ryl, J., Ossowski, T., Sobaszek, M., and Darowicki, K. (2012) Determination of chemical oxygen demand (COD) at borondoped diamond (BDD) sensor by means of amperometric technique, pp 1117-1120.

Cantalapiedra, A., Gismera, M. J., Procopio, J. R., and Sevilla, M. T. (2015) Electrochemical sensor based on polystyrene sulfonate-carbon nanopowders composite for Cu (II) determination, *Talanta* 139, 111-116.

Chauhan, N., Narang, J., and Pundir, C. S. (2011) Immobilization of rat brain acetylcholinesterase on porous gold-nanoparticle-CaCO₃ hybrid material modified Au electrode for detection of organophosphorous insecticides, *International Journal of Biological Macromolecules* 49, 923-929.

Chen, H., Zhang, J., Chen, Q., Li, J., Li, D., Dong, C., Liu, Y., Zhou, B., Shang, S., and Cai, W. (2012) Assessment of a COD analytical method based on the photoelectrocatalysis of a TiO₂ nanotube array sensor, *Analytical Methods* 4, 1790-1796.

Chen, H. J., Zhang, Z. H., Cai, R., Chen, X., Liu, Y. N., Rao, W., and Yao, S. Z. (2013) Molecularly imprinted electrochemical sensor based on amine group modified graphene covalently linked electrode for 4-nonylphenol detection, *Talanta* 115, 222-227.

Chen, Y., Dong, Y., Wu, H., Chen, C., Chi, Y., and Chen, G. (2015) Electrochemiluminescence sensor for hexavalent chromium based on the graphene quantum dots/peroxodisulfate system, *Electrochimica Acta* 151, 552-557.

Chiti, G., Marrazza, G., and Mascini, M. (2001) Electrochemical DNA biosensor for environmental monitoring, *Analytica Chimica Acta* 427, 155-164.

Cinti, S., Santella, F., Moscone, D., and Arduini, F. (2016) Hg²⁺ detection using a disposable and miniaturized screen-printed electrode modified with nanocomposite carbon black and gold nanoparticles, *Environmental Science and Pollution Research* 23, 8192-8199.

Commault, A. S., Lear, G., Bouvier, S., Feiler, L., Karacs, J., and Weld, R. J. (2016) Geobacter-dominated biofilms used as amperometric BOD sensors, *Biochem. Eng. J.* 109, 88-95.

Commissariat général au développement durable (2014). La mesure en continu ; étude technico-économique de la mesure en continu dans le domaine de l'eau. Le point sur 194, 1-4.

Crespo, G. A., Afshar, M. G., and Bakker, E. (2012) Direct Detection of Acidity, Alkalinity, and pH with Membrane Electrodes, *Analytical Chemistry* 84, 10165-10169.

David, I. G., Badea, I. A., and Radu, G. L. (2013) Disposable carbon electrodes as an alternative for the direct voltammetric determination of alkyl phenols from water samples, *Turk. J. Chem.* 37, 91-100.

Deep, A., Saraf, M., Neha, Bharadwaj, S. K., and Sharma, A. L. (2014) Styrene Sulphonic Acid Doped Polyaniline Based Immunosensor for Highly Sensitive Impedimetric Sensing of Atrazine, *Electrochimica Acta* 146, 301-306.

Diaz-Gonzalez, M., Salvador, J. P., Bonilla, D., Marco, M. P., Fernandez-Sanchez, C., and Baldi, A. (2015) A microfluidic device for the automated electrical readout of low-density glass-slide microarrays, *Biosensors & Bioelectronics* 74, 698-704.

Diba, F. S., and Lee, H. J. (2016) Amperometric sensing of sodium, calcium and potassium in biological fluids using a microhole supported liquid/gel interface, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 769, 5-10.

Ding, L., Gao, Y., and Di, J. (2016) A sensitive plasmonic copper(II) sensor based on gold nanoparticles deposited on ITO glass substrate, *Biosensors and Bioelectronics* 83, 9-14.

Dorokhin, D., Crespo, G. A., Afshar, M. G., and Bakker, E. (2014) A low-cost thin layer coulometric microfluidic device based on an ion-selective membrane for calcium determination, *Analyst* 139, 48-51.

Eltzov, E., Yehuda, A., and Marks, R. S. (2015) Creation of a new portable biosensor for water toxicity determination, *Sensors and Actuators B-Chemical* 221, 1044-1054.

Fan, H. X., Li, Y., Wu, D., Ma, H. M., Mao, K. X., Fan, D. W., Du, B., Li, H., and Wei, Q. (2012) Electrochemical bisphenol A sensor based on N-doped graphene sheets, *Analytica Chimica Acta* 711, 24-28.

Figuera, M., Van Der Wal, P. D., Tercier-Waeber, M. L., and Shea, H. (2016) Three-electrode on-chip sensors for voltammetric detection of trace metals in natural waters, (Carter, M., Yasukawa, T., Chin, B. A., Simonian, A. L., Shimizu, Y., Lee, W. Y., Nagahara, L. A., Niwa, O., and Mukundan, R., Eds.) 16 ed., pp 303-314, Electrochemical Society Inc.

Firooz, A. R., Ensafi, A. A., Kazemifard, N., and Khalifeh, R. (2013) Development of a highly sensitive and selective optical sensor for determination of ultra-trace amount of silver ions, *Sens Actuators, B Chem* 176, 598-604.

Gan, X., Zhao, H., Chen, S., and Quan, X. (2015) Electrochemical DNA sensor for specific detection of picomolar Hg(II) based on exonuclease III-assisted recycling signal amplification, *Analyst* 140, 2029-2036.

Gantois, F., Guigue, S. N., Raveau, S., Lepot, B., Gal F. (2016) Panorama de l'existant sur les capteurs et analyseurs en ligne pour la mesure des paramètres physico-chimiques dans l'eau - 2016. Rapport AQUAREF, 85 pp.

Gao, F., Gao, C., He, S., Wang, Q., and Wu, A. (2016) Label-free electrochemical lead (II) aptasensor using thionine as the signaling molecule and graphene as signal-enhancing platform, *Biosensors and Bioelectronics* 81, 15-22.

Gonzalez-Techera, A., Zon, M. A., Molina, P. G., Fernandez, H., Gonzalez-Sapienza, G., and Arevalo, F. J. (2015) Development of a highly sensitive noncompetitive electrochemical immunosensor for the detection of atrazine by phage anti-immunocomplex assay, *Biosensors & Bioelectronics* 64, 650-656.

Guigues, N., Lepot, B., Berho, C., Salvetat, F. (2013) Panorama de l'existant et retour d'expérience sur les capteurs et analyseurs en ligne pour la mesure des paramètres physico-chimiques dans l'eau. Rapport AQUAREF, 76 pp.

Guinovart, T., Bandodkar, A. J., Windmiller, J. R., Andrade, F. J., and Wang, J. (2013) A potentiometric tattoo sensor for monitoring ammonium in sweat, *Analyst* 138, 7031-7038.

Gumpu, M. B., Veerapandian, M., Krishnan, U. M., and Rayappan, J. B. B. (2017) Simultaneous electrochemical detection of Cd(II), Pb(II), As(III) and Hg(II) ions using ruthenium(II)-textured graphene oxide nanocomposite, *Talanta* 162, 574-582.

Guo, J. F., Hou, C. J., Yang, M., Huo, D. Q., Li, J. J., Fa, H. B., Luo, H. B., and Yang, P. (2016) Colorimetric sensing of chromium(VI) ions in aqueous solution based on the leaching of protein-stabled gold nanoparticles, *Analytical Methods* 8, 5526-5532.

Hariharan, P. S., and Anthony, S. P. (2015) Substitutional group dependent colorimetric/fluorimetric sensing of Mn²⁺, Fe³⁺ and Zn²⁺ ions by simple Schiff base chemosensor, *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* 136, 1658-1665.

Hegnerova, K., and Homola, J. (2010) Surface plasmon resonance sensor for detection of bisphenol A in drinking water, *Sensors and Actuators B-Chemical* 151, 177-179.

Hegnerova, K., Piliarik, M., Steinbachova, M., Flegelova, Z., Cernohorska, H., and Homola, J. (2010) Detection of bisphenol A using a novel surface plasmon resonance biosensor, *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 398, 1963-1966.

Heidarimoghaddam, R., Mortazavi, S. S., and Farmany, A. (2015) New electrochemical sensor for sensitive quantification of copper in river, city, bottled and drinking water samples, *J. Water Supply Res. Technol. Aqua* 64, 749-754.

Hooi, K. B., Ismail, A. K., Ahamad, R., and Shahir, S. (2015) A redox mediated UME biosensor using immobilized *Chromobacterium violaceum* strain R1 for rapid biochemical oxygen demand measurement, *Electrochimica Acta* 176, 777-783.

Huang, J. D., Zhang, X. M., Lin, Q., He, X. R., Xing, X. R., Huai, H. X., Lian, W. J., and Zhu, H. (2011) Electrochemical sensor based on imprinted sol-gel and nanomaterials for sensitive determination of bisphenol A, *Food Control* 22, 786-791.

Huang, J. D., Zhang, X. M., Liu, S., Lin, Q., He, X. R., Xing, X. R., Lian, W. J., and Tang, D. (2011) Development of molecularly imprinted electrochemical sensor with titanium oxide and gold nanomaterials enhanced technique for determination of 4-nonylphenol, *Sensors and Actuators B-Chemical* 152, 292-298.

Hussin, S., Ismail, A. K., and Shahir, S. (2012) A BOD sensor using immobilized microbial consortium in alginate-based matrix for rapid detection of river water pollution, *J. Teknol.* 59, 37-41.

Istamboulie, G., Andreescu, S., Marty, J. L., and Noguer, T. (2007) Highly sensitive detection of organophosphorus insecticides using magnetic microbeads and genetically engineered acetylcholinesterase, *Biosensors & Bioelectronics* 23, 506-512.

Izadkhah, V., Farmany, A., and Mortazavi, S. S. (2015) Voltammetric determination of copper in water samples using a Schiff base/carbon nanotube-modified carbon paste electrode, *J. Ind. Eng. Chem.* 21, 994-996.

Jansod, S., Afshar, M. G., Crespo, G. A., and Bakker, E. (2016) Alkalinization of Thin Layer Samples with a Selective Proton Sink Membrane Electrode for Detecting Carbonate by Carbonate-Selective Electrodes, *Analytical Chemistry* 88, 3444-3448.

Jarolimova, Z., Crespo, G. A., Xie, X., Afshar, M. G., Pawlak, M., and Bakker, E. (2014) Chronopotentiometric Carbonate Detection with All-Solid-State Ionophore-Based Electrodes, *Analytical Chemistry* 86, 6307-6314.

Jia, J., Zhou, H. Y., Kang, S. Y., and Wang, K. Z. (2016) Terpyridyl covalently functionalized silica microsphere for "naked-eye" colorimetric detection of ferrous ion in fully aqueous system, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 499, 54-59.

Journal officiel (11 février 2017). Avis relatif aux limites de quantification des couples «paramètre-matrice» de l'agrément des laboratoires effectuant des analyses dans le domaine de l'eau et des milieux aquatiques. NOR : DEVL1703763V.

Journal officiel (28 août 2015). Arrêté du 7 août 2015 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement. NOR : DEVL1513988A

Kang, Y., Wu, T., Liu, B., Wang, X., and Du, Y. (2014) Selective determination of mercury(II) by self-referenced surface-enhanced Raman scattering using dialkyne-modified silver nanoparticles, *Microchimica Acta* 181, 1333-1339.

Kesik, M., Kanik, F. E., Turan, J., Kolb, M., Timur, S., Bahadir, M., and Toppare, L. (2014) An acetylcholinesterase biosensor based on a conducting polymer using multiwalled carbon nanotubes for amperometric detection of organophosphorous pesticides, *Sensors and Actuators B-Chemical* 205, 39-49.

Kharkwal, S., Tan, Y. C., Lu, M., and Ng, H. Y. (2017) Development and long-term stability of a novel microbial fuel cell BOD sensor with MNo₂ catalyst, *Int. J. Mol. Sci.* 18.

Kim, G. Y., Shim, J., Kang, M. S., and Moon, S. H. (2008) Preparation of a highly sensitive enzyme electrode using gold nanoparticles for measurement of pesticides at the ppt level, *Journal of Environmental Monitoring* 10, 632-637.

Kosaki, Y., Takano, K., Citterio, D., Suzuki, K., and Shiratori, S. (2012) Quartz crystal microbalance sensor using ionophore for ammonium ion detection, *J. Nanosci. Nanotechnol.* 12, 563-567.

Kumar, V. V., and Anthony, S. P. (2014) Highly selective silver nanoparticles based label free colorimetric sensor for nitrite anions, *Analytica Chimica Acta* 842, 57-62.

Lai, C., Qin, L., Zeng, G., Liu, Y., Huang, D., Zhang, C., Xu, P., Cheng, M., Qin, X., and Wang, M. (2016) Sensitive and selective detection of mercury ions based on papain and 2,6-pyridinedicarboxylic acid functionalized gold nanoparticles, *RSC Advances* 6, 3259-3266.

Lai, J. P., Yang, M. L., Niessner, R., and Knopp, D. (2007) Molecularly imprinted microspheres and nanospheres for di(2-ethylhexyl)phthalate prepared by precipitation polymerization, *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 389, 405-412.

Li, C. Y., Kong, X. F., Li, Y. F., Weng, C., Tang, J. L., Liu, D., and Zhu, W. G. (2014) Ratiometric near-infrared chemosensor for trivalent chromium ion based on tricarboyanine in living cells, *Analytica Chimica Acta* 824, 71-77.

Li, J. J., Hou, C. J., Huo, D. Q., Shen, C. H., Luo, X. G., Fa, H. B., Yang, M., and Zhou, J. (2017) Detection of trace nickel ions with a colorimetric sensor based on indicator displacement mechanism, *Sens Actuators, B Chem* 241, 1294-1302.

Li, X., Bai, J., Liu, Q., Li, J., and Zhou, B. (2014) WO₃/W nanopores sensor for Chemical Oxygen Demand (COD) determination under visible light, *Sensors (Switzerland)* 14, 10680-10690.

Liao, Y., Li, Q., Wang, N., and Shao, S. (2015) Development of a new electrochemical sensor for determination of Hg(II) based on Bis(indolyl)methane/Mesoporous carbon nanofiber/Nafion/glassy carbon electrode, *Sens Actuators, B Chem* 215, 592-597.

Lin, M. H., Liu, Y. J., Sun, Z. H., Zhang, S. L., Yang, Z. H., and Ni, C. L. (2012) Electrochemical immunoassay of benzo a pyrene based on dual amplification strategy of electron-accelerated Fe₃O₄/polyaniline platform and multi-enzyme-functionalized carbon sphere label, *Analytica Chimica Acta* 722, 100-106.

Lin, X. Y., Ni, Y. N., and Kokot, S. (2015) An electrochemical DNA-sensor developed with the use of methylene blue as a redox indicator for the detection of DNA damage induced by endocrine-disrupting compounds, *Analytica Chimica Acta* 867, 29-37.

Lin, Y. Y., Liu, G. D., Wai, C. M., and Lin, Y. H. (2007) Magnetic beads-based bioelectrochemical immunoassay of polycyclic aromatic hydrocarbons, *Electrochem. Commun.* 9, 1547-1552.

Liu, G. Z., Wang, S., Liu, J. Q., and Song, D. D. (2012) An Electrochemical Immunosensor Based on Chemical Assembly of Vertically Aligned Carbon Nanotubes on Carbon Substrates for Direct Detection of the Pesticide Endosulfan in Environmental Water, *Analytical Chemistry* 84, 3921-3928.

Liu, S., Wei, M. C., Zheng, X. L., Xu, S., and Zhou, C. L. (2014) Highly sensitive and selective sensing platform based on pi-pi interaction between tricyclic aromatic hydrocarbons with thionine-graphene composite, *Analytica Chimica Acta* 826, 21-27.

Liu, X., Feng, H., Liu, X., and Wong, D. K. Y. (2011) Electrocatalytic detection of phenolic estrogenic compounds at NiTPPS vertical bar carbon nanotube composite electrodes, *Analytica Chimica Acta* 689, 212-218.

Liu, X., Li, W. J., Li, L., Yang, Y., Mao, L. G., and Peng, Z. (2014) A label-free electrochemical immunosensor based on gold nanoparticles for direct detection of atrazine, *Sensors and Actuators B-Chemical* 191, 408-414.

Lopez-Molinero, A., Cubero, V. T., Irigoyen, R. D., and Piazuolo, D. S. (2013) Feasibility of digital image colorimetry-Application for water calcium hardness determination, *Talanta* 103, 236-244.

Lu, B. J., Liu, M. C., Shi, H. J., Huang, X. F., and Zhao, G. H. (2013) A Novel Photoelectrochemical Sensor for Bisphenol A with High Sensitivity and Selectivity Based on Surface Molecularly Imprinted Polypyrrole Modified TiO₂ Nanotubes, *Electroanalysis* 25, 771-779.

Lucarelli, F., Kicela, A., Palchetti, I., Marrazza, G., and Mascini, M. (2002) Electrochemical DNA biosensor for analysis of wastewater samples, *Bioelectrochemistry* 58, 113-118.

Ly, N. H., and Joo, S. W. (2015) Zn(II)-concentration dependent Raman spectra in the dithizone complex on gold nanoparticle surfaces in environmental water samples, *Appl Surf Sci* 356, 1005-1011.

Ly, N. H., Oh, C. H., and Joo, S. W. (2015) A submicromolar Cr(III) sensor with a complex of methionine using gold nanoparticles, *Sens Actuators, B Chem* 219, 276-282.

Ly, N. H., Seo, C., and Joo, S. W. (2016) Detection of copper(II) ions using glycine on hydrazine-adsorbed gold nanoparticles via raman spectroscopy, *Sensors (Switzerland)* 16.

Ma, C., Tan, F., Zhao, H., Chen, S., and Quan, X. (2011) Sensitive amperometric determination of chemical oxygen demand using Ti/Sb-SnO₂/PbO₂ composite electrode, *Sens Actuators, B Chem* 155, 114-119.

Mafa, J. P., Mabuba, N., and Arotiba, O. A. (2016) An Exfoliated Graphite Based Electrochemical Sensor for As(III) in Water, *Electroanalysis* 28, 1462-1469.

Manisankar, P., Selvanathan, G., and Vedhi, C. (2005) Utilization of sodium montmorillonite clay-modified electrode for the determination of isoproturon and carbendazim in soil and water samples, *Appl. Clay Sci.* 29, 249-257.

Manisankar, P., Sundari, P. L. A., Sasikumar, R., and Palaniappan, S. P. (2008) Electroanalysis of some common pesticides using conducting polymer/multiwalled carbon nanotubes modified glassy carbon electrode, *Talanta* 76, 1022-1028.

Marchesini, G. R., Meulenbergh, E., Haasnoot, W., and Irth, H. (2005) Biosensor immunoassays for the detection of bisphenol A, *Analytica Chimica Acta* 528, 37-45.

Martín, G. S., Julian, P., Mandolesi, P. S., Ybarra, G. O., and Aymonino, O. A. (2011) Noise characterization for a BOD electrochemical sensor, pp 102-107.

Mehta, V. N., Basu, H., Singhal, R. K., and Kailasa, S. K. (2015) Simple and sensitive colorimetric sensing of Cd²⁺ ion using chitosan dithiocarbamate functionalized gold nanoparticles as a probe, *Sens Actuators, B Chem* 220, 850-858.

Mei, Z. L., Chu, H. Q., Chen, W., Xue, F., Liu, J., Xu, H. N., Zhang, R., and Zheng, L. (2013) Ultrasensitive one-step rapid visual detection of bisphenol A in water samples by label-free aptasensor, *Biosensors & Bioelectronics* 39, 26-30.

Mirabi-Semnokolai, A., Daneshgar, P., Moosavi-Movahedi, A. A., Rezayat, M., Norouzi, P., Nemati, A., and Farhadi, M. (2011) Sensitive determination of herbicide trifluralin on the surface of copper nanowire electrochemical sensor, *J. Solid State Electrochem.* 15, 1953-1961.

Mirzaei, M., and Pili, H. B. (2015) Potentiometric determination of cadmium using coated platinum and PVC membrane sensors based on N,N'-bis(salicylaldehyde)phenylenediamine (salophen), *J. Anal. Chem.* 70, 731-737.

Mita, D. G., Attanasio, A., Arduini, F., Diano, N., Grano, V., Bencivenga, U., Rossi, S., Amine, A., and Moscone, D. (2007) Enzymatic determination of BPA by means of tyrosinase immobilized on different carbon carriers, *Biosensors & Bioelectronics* 23, 60-65.

Mo, H., Tang, Y., Wang, N., Zhang, M., Cheng, H., Chen, Y., Wan, P., Sun, Y., Liu, S., and Wang, L. (2016) Performance improvement in chemical oxygen demand determination using carbon fiber felt/CeO₂-β-PbO₂ electrode deposited by cyclic voltammetry method, *J. Solid State Electrochem.* 20, 2179-2189.

Modin, O., and Wilén, B. M. (2012) A novel bioelectrochemical BOD sensor operating with voltage input, *Water Research* 46, 6113-6120.

Nanda, D., Oak, M. S., and Kumar, M. P. (2007) Acrylic acid grafted PVC membrane based ion selective electrode for calcium and hardness measurement of water, *Indian Journal of Chemistry Section a-Inorganic Bio-Inorganic Physical Theoretical & Analytical Chemistry* 46, 258-262.

Neel, B., Asfhar, M. G., Crespo, G. A., Pawlak, M., Dorokhin, D., and Bakker, E. (2014) Nitrite-Selective Electrode Based On Cobalt(II) tert-ButylSalophen Ionophore, *Electroanalysis* 26, 473-480.

Niu, P., Fernández-Sánchez, C., Gich, M., Ayora, C., and Roig, A. (2015) Electroanalytical assessment of heavy metals in waters with bismuth nanoparticle-porous carbon paste electrodes, *Electrochimica Acta* 165, 155-161.

Noh, H. B., Lee, K. S., Lim, B. S., Kim, S. J., and Shim, Y. B. (2010) Total analysis of endocrine disruptors in a microchip with gold nanoparticles, *Electrophoresis* 31, 3053-3060.

Nor, A. S. M., Yunus, M. A. M., Nawawi, S. W., and Ibrahim, S. (2013) Low-cost sensor array design optimization based on planar electromagnetic sensor design for detecting nitrate and sulphate, pp 693-698.

Norouzi, P., Larijani, B., Ganjali, M. R., and Faridbod, F. (2012) Admittometric Electrochemical Determination of Atrazine by Nano-composite immune-biosensor using FFT-Square wave Voltammetry, *International Journal of Electrochemical Science* 7, 10414-10426.

Ntsendwana, B., Mamba, B. B., Sampath, S., and Arotiba, O. A. (2012) Electrochemical Detection of Bisphenol A Using Graphene-Modified Glassy Carbon Electrode, *International Journal of Electrochemical Science* 7, 3501-3512.

O'Boyle, S., Trickett, P., Partington, A., and Murray, C. (2014) Field testing of an optical in situ nitrate sensor in three Irish estuaries, *Biol. Environ.* 114.

Omanović, D., Garnier, C., Gibbon-Walsh, K., and Pižeta, I. (2015) Electroanalysis in environmental monitoring: Tracking trace metals - A mini review, *Electrochem. Commun.* 61, 78-83.

Pankratova, N., Crespo, G. A., Afshar, M. G., Crespi, M. C., Jeanneret, S., Cherubini, T., Tercier-Waeber, M. L., Pomati, F., and Bakker, E. (2015) Potentiometric sensing array for monitoring aquatic systems, *Environmental Science-Processes & Impacts* 17, 906-914.

Park, J. H., Byun, J. Y., Yim, S. Y., and Kim, M. G. (2016) A Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)-based, simple, receptor-free and regeneratable Hg²⁺ detection system, *Journal of Hazardous Materials* 307, 137-144.

Park, J. W., Kurosawa, S., Aizawa, H., Goda, Y., Takai, M., and Ishihara, K. (2006) Piezoelectric immunosensor for bisphenol A based on signal enhancing step with 2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine polymeric nanoparticle, *Analyst* 131, 155-162.

Pichetsumthorn, P., Vattipalli, K., and Prasad, S. (2012) Nanoporous impedemetric biosensor for detection of trace atrazine from water samples, *Biosensors & Bioelectronics* 32, 155-162.

Prathap, M. U. A., Chaurasia, A. K., Sawant, S. N., and Apte, S. K. (2012) Polyaniline-Based Highly Sensitive Microbial Biosensor for Selective Detection of Lindane, *Analytical Chemistry* 84, 6672-6678.

Promphet, N., Rattanarat, P., Rangkupan, R., Chailapakul, O., and Rodthongkum, N. (2015) An electrochemical sensor based on graphene/polyaniline/polystyrene nanoporous fibers modified electrode for simultaneous determination of lead and cadmium, *Sens Actuators, B Chem*, 526-534.

Qi, X., Qian, J., Chen, T., Lu, D., and Chen, B. (2017) Electrochemical determination of Cu(II) ions based on Ag/Pd alloy for water quality early warning, *International Journal of Electrochemical Science* 12, 5511-5520.

Rather, J. A., and De Wael, K. (2013) Fullerene-C-60 sensor for ultra-high sensitive detection of bisphenol-A and its treatment by green technology, *Sensors and Actuators B-Chemical* 176, 110-117.

Ren, J., Gu, J. F., Tao, L., Yao, M. Q., Yang, X. C., and Yang, W. (2015) A novel electrochemical sensor of 4-nonylphenol based on a poly(ionic liquid) hollow nanosphere/gold nanoparticle composite modified glassy carbon electrode, *Analytical Methods* 7, 8094-8099.

Rodriguez-Mozaz, S., de Alda, M. L., and Barcelo, D. (2005) Analysis of bisphenol A in natural waters by means of an optical immunosensor, *Water Research* 39, 5071-5079.

Ruslan, Mirzan, M., Nurdin, M., and Wahab, A. W. (2016) Characterization and photocurrent response of Mn-N-TiO₂/Ti electrode: Approach for Chemical Oxygen Demand (COD) sensor, *Int. J. Appl. Chem.* 12, 399-410.

Saeed, A. A., Singh, B., Nooredeen Abbas, M., and Dempsey, E. (2016) Evaluation of Bismuth Modified Carbon Thread Electrode for Simultaneous and Highly Sensitive Cd (II) and Pb (II) Determination, *Electroanalysis* 28, 2205-2213.

Sahraoui, Y., Sbartai, A., Chaliaa, S., Maaref, A., Haddad, A., and Jaffrezic-Renault, N. (2015) A Nitrite Electrochemical Sensor Based on Boron-Doped Diamond Planar Electrochemical Microcells Modified with a Monolacunary Silicotungstate Polyoxoanion, *Electroanalysis* 27, 1359-1367.

Saiapina, O. Y., Kharchenko, S. G., Vishnevskii, S. G., Pyeshkova, V. M., Kalchenko, V. I., and Dzyadevych, S. V. (2016) Development of Conductometric Sensor Based on 25,27-Di-(5-thio-octyloxy)calix[4]arene-crown-6 for Determination of Ammonium, *Nanoscale Res. Lett.* 11, 1-10.

Sakaguchi, T., and Tamiya, E. (2015) BOD sensor with immobilized luminous cells on chip, In *Bioluminescent Microbial Biosensors: Design, Construction, and Implementation*, pp 151-162, Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.

Sakthivel, P., Sekar, K., Sivaraman, G., and Singaravadivel, S. (2017) Rhodamine Diaminomaleonitrile Conjugate as a Novel Colorimetric Fluorescent Sensor for Recognition of Cd²⁺ Ion, *J Fluoresc* 27, 1109-1115.

Sedghi, R., Heidari, B., and Behbahani, M. (2015) Synthesis, characterization and application of poly(acrylamide-co-methylenbisacrylamide) nanocomposite as a colorimetric chemosensor for visual detection of trace levels of Hg and Pb ions, *Journal of Hazardous Materials* 285, 109-116.

Sekhar, P. K., Brosha, E. L., Mukundan, R., Garzon, F. H. (2010). Chemical sensors for environmental monitoring and homeland security. *Electrochem Soc Interface* 19, 35-40.

Seo, K. S., Choo, K. H., Chang, H. N., and Park, J. K. (2009) A flow injection analysis system with encapsulated high-density *Saccharomyces cerevisiae* cells for rapid determination of biochemical oxygen demand, *Applied Microbiology and Biotechnology* 83, 217-223.

Shamsipur, M., Sadeghi, M., Garau, A., and Lippolis, V. (2013) An efficient and selective fluorescent chemical sensor based on 5-(8-hydroxy-2-quinolinylmethyl)-2,8-dithia-5-aza-2,6-pyridinophane as a new fluoroionophore for determination of iron(III) ions. A novel probe for iron speciation, *Analytica Chimica Acta* 761, 169-177.

Shan, F. S., Lai, J. P., Sun, H., Zhang, P., Luo, C., He, Y. H., and Feng, H. R. (2016) A facile, fast responsive and highly selective mercury(II) probe characterized by the fluorescence quenching of 2,9-dimethyl-1,10-phenanthroline and two new metal-organic frameworks, *RSC Advances* 6, 66215-66223.

Sharma, P., Bhalla, V., Tuteja, S., Kukkar, M., and Suri, C. R. (2012) Rapid extraction and quantitative detection of the herbicide diuron in surface water by a hapten-functionalized carbon nanotubes based electrochemical analyzer, *Analyst* 137, 2495-2502.

Sharma, P., Sablok, K., Bhalla, V., and Suri, C. R. (2011) A novel disposable electrochemical immunosensor for phenyl urea herbicide diuron, *Biosensors & Bioelectronics* 26, 4209-4212.

Shoub, S. A. B., Yusof, N. A., and Hajian, R. (2017) Gold nanoparticles/ionophore-modified screen-printed electrode for detection of Pb(II) in river water using linear sweep anodic stripping voltammetry, *Sens. Mater.* 29, 555-565.

Shrivastava, K., Maji, P., and Dewangan, K. (2017) Onsite-detection of barium and nickel from river, pond and tap water samples using gold nanoparticles as a chemical sensor, *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* 173, 630-636.

Siavash Moakhar, R., Goh, G. K. L., Dolati, A., and Ghorbani, M. (2017) Sunlight-driven photoelectrochemical sensor for direct determination of hexavalent chromium based on Au decorated rutile TiO₂ nanorods, *Appl. Catal. B Environ.* 201, 411-418.

Sohail, M., De Marco, R., Lamb, K., and Bakker, E. (2012) Thin layer coulometric determination of nitrate in fresh waters, *Analytica Chimica Acta* 744, 39-44.

Soomro, R. A., Nafady, A., Sirajuddin, Memon, N., Sherazi, T. H., and Kalwar, N. H. (2014) L-cysteine protected copper nanoparticles as colorimetric sensor for mercuric ions, *Talanta* 130, 415-422.

Sreedhar, N. Y., Sunil Kumar, M., and Krishnaveni, K. (2015) Sensitive determination of chlorpyrifos using Ag/Cu alloy nanoparticles and graphene composite paste electrode, *Sens Actuators, B Chem* 210, 475-482.

Sun, B., Jiang, X., Wang, H., Song, B., Zhu, Y., Wang, H., Su, Y., and He, Y. (2015) Surface-enhancement Raman scattering sensing strategy for discriminating trace mercuric ion (II) from real water samples in sensitive, specific, recyclable, and reproducible manners, *Analytical Chemistry* 87, 1250-1256.

Sun, X., Cao, Y. Y., Gong, Z. L., Wang, X. Y., Zhang, Y., and Gao, J. M. (2012) An Amperometric Immunosensor Based on Multi-Walled Carbon Nanotubes-Thionine-Chitosan Nanocomposite Film for Chlorpyrifos Detection, *Sensors* 12, 17247-17261.

Sun, X., Zhai, C., and Wang, X. Y. (2013) A novel and highly sensitive acetyl-cholinesterase biosensor modified with hollow gold nanospheres, *Bioprocess and Biosystems Engineering* 36, 273-283.

Tan, L., Chen, Z., Zhao, Y., Wei, X., Li, Y., Zhang, C., Wei, X., and Hu, X. (2016) Dual channel sensor for detection and discrimination of heavy metal ions based on colorimetric and fluorescence response of the AuNPs-DNA conjugates, *Biosensors and Bioelectronics* 85, 414-421.

Tan, L., Zhang, Y., Qiang, H., Li, Y., Sun, J., Hu, L., and Chen, Z. (2016) A sensitive Hg(II) colorimetric sensor based on synergistic catalytic effect of gold nanoparticles and Hg, *Sens Actuators, B Chem* 229, 686-691.

Tan, L. L., Musa, A., and Lee, Y. H. (2012) Reflectance based optical fibre sensor for ammonium ion using solid-state Riegler's reagent, *Sens Actuators, B Chem* 173, 614-619.

Tekaya, N., Saiapina, O., Ben Ouada, H., Lagarde, F., Ben Ouada, H., and Jaffrezic-Renault, N. (2013) Ultra-sensitive conductometric detection of pesticides based on inhibition of esterase activity in *Arthrospira platensis*, *Environmental Pollution* 178, 182-188.

Tercier, M. L., Buffle, J., and Graziottin, F. (1998) A Novel Voltammetric In-Situ Profiling System for Continuous Real-Time Monitoring of Trace Elements in Natural Waters, *Electroanalysis* 10, 355-363.

Tercier-Waeber, M.-L., Hezard, T., Masson, M., Schäfer, J. (2009). In Situ Monitoring of the Diurnal Cycling of Dynamic Metal Species in a Stream under Contrasting Photobenthic Biofilm Activity and Hydrological Conditions, *Environmental Science & technology* 43, 7237-7244.

Tian, S., Zhang, P., Liang, Y., Zhang, D., and Wang, B. (2014) Performances of double-chamber microbial fuel cell-based BOD sensor, *Chin. J. Environ. Eng.* 8, 2626-2632.

Touilloux, R., Tercier-Waeber, M. L., and Bakker, E. (2015) Direct arsenic(III) sensing by a renewable gold plated Ir-based microelectrode, *Analyst* 140, 3526-3534.

Tran, H. V., Yougnia, R., Reisberg, S., Piro, B., Serradji, N., Nguyen, T. D., Tran, L. D., Dong, C. Z., and Pham, M. C. (2012) A label-free electrochemical immunosensor for direct, signal-on and sensitive pesticide detection, *Biosensors & Bioelectronics* 31, 62-68.

Tyszczyk-Rotko, K., Sadok, I., Barczak, M., and Jabłońska-Czapla, M. (2016) A new voltammetric sensor based on thiol-functionalized polysiloxane film modified by lead nanoparticles for detection of Bi(III) ions, *Electrochimica Acta* 208, 102-108.

Viswanathan, S., Radecka, H., and Radecki, J. (2009) Electrochemical biosensor for pesticides based on acetylcholinesterase immobilized on polyaniline deposited on vertically assembled carbon nanotubes wrapped with ssDNA, *Biosensors & Bioelectronics* 24, 2772-2777.

Vu, H. D., Nguyen, L. H., Nguyen, T. D., Nguyen, H. B., Nguyen, T. L., and Tran, D. L. (2014) Anodic stripping voltammetric determination of Cd²⁺ and Pb²⁺ using soopenetrated MWCNT/P1,5-DAN as an enhanced sensing interface, *Ionics* 21, 571-578.

Wan, Q. J., Yang, P., Cai, H., Song, H. T., and Yang, N. J. (2013) Voltammetry of nanomolar leveled environmental hazards on the polymer/CNT coated electrodes, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 689, 252-256.

Wang, F. G., Yang, J. Q., and Wu, K. B. (2009) Mesoporous silica-based electrochemical sensor for sensitive determination of environmental hormone bisphenol A, *Analytica Chimica Acta* 638, 23-28.

Wang, J., Li, K., Zhang, H., Wang, Q., Wang, Y., Yang, C., Guo, Q., and Jia, J. (2012) Condition optimization of amperometric determination of chemical oxygen demand using boron-doped diamond sensor, *Res Chem Intermed* 38, 2285-2294.

Wang, J., Yao, N., Li, M., Hu, J., Chen, J., Hao, Q., Wu, K., and Zhou, Y. (2014) Electrochemical tuning of the activity and structure of a copper-cobalt micro-nano film on a gold electrode, and its application to the determination of glucose and of Chemical Oxygen Demand, *Microchimica Acta* 182, 515-522.

Wang, L. H., and Shan, X. E. (2016) Electrochemical reduction of selenium on a silver electrode and its determination in river water, *J. Anal. Chem.* 71, 917-925.

Wang, W., Bai, H., Li, H., Lv, Q., Wang, Z., and Zhang, Q. (2017) Disposable plastic electrode for electrochemical determination of total chromium and hexavalent chromium, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 794, 148-155.

Wei, Q., Nagi, R., Sadeghi, K., Feng, S., Yan, E., Ki, S. J., Caire, R., Tseng, D., and Ozcan, A. (2014) Detection and spatial mapping of mercury contamination in water samples using a smart-phone, *ACS Nano* 8, 1121-1129.

Wu, D., Wang, Y., Zhang, Y., Ma, H., Pang, X., Hu, L., Du, B., and Wei, Q. (2016) Facile fabrication of an electrochemical aptasensor based on magnetic electrode by using streptavidin modified magnetic beads for sensitive and specific detection of Hg²⁺, *Biosensors and Bioelectronics* 82, 9-13.

Wu, H., Fan, S., Jin, X., Zhang, H., Chen, H., Dai, Z., and Zou, X. (2014) Construction of a zinc porphyrin-fullerene-derivative based nonenzymatic electrochemical sensor for sensitive sensing of hydrogen peroxide and nitrite, *Analytical Chemistry* 86, 6285-6290.

Wu, L. D., Lu, X. B., Jin, J., Zhang, H. J., and Chen, J. P. (2011) Electrochemical DNA biosensor for screening of chlorinated benzene pollutants, *Biosensors & Bioelectronics* 26, 4040-4045.

Xu, G., Liang, S., Fan, J., Sheng, G., and Luo, X. (2016) Amperometric sensing of nitrite using a glassy carbon electrode modified with a multilayer consisting of carboxylated nanocrystalline cellulose and poly(diallyldimethyl ammonium) ions in a PEDOT host, *Microchimica Acta* 183, 2031-2037.

Xu, L., Ouyang, R., Zhou, S., Wen, H., Zhang, X., Yang, Y., Guo, N., Li, W., Hu, X., Yang, Z., Ouyang, L., and Miao, Y. (2014) Sn-Pb hybrid nanoparticle decorated mesoporous carbon for sensitive stripping detection of Cd (II), *J Electrochem Soc* 161, H730-H737.

Xu, Z., Kuang, H., Yan, W. J., Hao, C. L., Xing, C. R., Wu, X. L., Wang, L. B., and Xu, C. L. (2012) Facile and rapid magnetic relaxation switch immunosensor for endocrine-disrupting chemicals, *Biosensors & Bioelectronics* 32, 183-187.

Xue, F., Wu, J. J., Chu, H. Q., Mei, Z. L., Ye, Y. K., Liu, J., Zhang, R., Peng, C. F., Zheng, L., and Chen, W. (2013) Electrochemical aptasensor for the determination of bisphenol A in drinking water, *Microchimica Acta* 180, 109-115.

Yan, S., Song, R., and Tang, Y. (2016) A highly selective and sensitive resonance Rayleigh scattering sensor for sulfide ion detection using Ag₂Te nanocrystals, *Analytical Methods* 8, 3768-3773.

Yang, J., Chen, J., Zhou, Y., and Wu, K. (2011) A nano-copper electrochemical sensor for sensitive detection of chemical oxygen demand, *Sens Actuators, B Chem* 153, 78-82.

Yang, L., Huang, N., Huang, L., Liu, M., Li, H., Zhang, Y., and Yao, S. (2017) An electrochemical sensor for highly sensitive detection of copper ions based on a new molecular probe Pi-A decorated on graphene, *Analytical Methods* 9, 618-624.

Yang, M., Chen, X., Liu, J. H., and Huang, X. J. (2016) Enhanced anti-interference on electrochemical detection of arsenite with nanoporous gold in mild condition, *Sens Actuators, B Chem* 234, 404-411.

Yang, M., Jiang, T. J., Wang, Y., Liu, J. H., Li, L. N., Chen, X., and Huang, X. J. (2017) Enhanced electrochemical sensing arsenic(III) with excellent anti-interference using amino-functionalized graphene oxide decorated gold microelectrode: XPS and XANES evidence, *Sens Actuators, B Chem* 245, 230-237.

Yang, S., Jiang, W., Zhao, F., Xu, L., Xu, Y., Gao, B., Sun, H., Du, L., Tang, Y., and Cao, F. (2016) A highly sensitive and selective fluorescent sensor for detection of copper ions based on natural Isorhamnetin from Ginkgo leaves, *Sens Actuators, B Chem* 236, 386-391.

Yao, Q. Z., Wang, X. J., Jian, H. M., Chen, H. T., and Yu, Z. G. (2015) Characterization of the Particle Size Fraction associated with Heavy Metals in Suspended Sediments of the Yellow River, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12, 6725-6744.

Yardim, Y., Levent, A., Keskin, E., and Senturk, Z. (2011) Voltammetric behavior of benzo a pyrene at boron-doped diamond electrode: A study of its determination by adsorptive transfer stripping voltammetry based on the enhancement effect of anionic surfactant, sodium dodecylsulfate, *Talanta* 85, 441-448.

Ye, D., Luo, L., Ding, Y., Chen, Q., and Liu, X. (2011) A novel nitrite sensor based on graphene/polypyrrole/chitosan nanocomposite modified glassy carbon electrode, *Analyst* 136, 4563-4569.

Yin, H. S., Cui, L., Chen, Q. P., Shi, W. J., Ai, S. Y., Zhu, L. S., and Lu, L. N. (2011) Amperometric determination of bisphenol A in milk using PAMAM-Fe₃O₄ modified glassy carbon electrode, *Food Chemistry* 125, 1097-1103.

Yin, H. S., Zhou, Y. L., Ai, S. Y., Chen, Q. P., Zhu, X. B., Liu, X. G., and Zhu, L. S. (2010) Sensitivity and selectivity determination of BPA in real water samples using PAMAM dendrimer and CoTe quantum dots modified glassy carbon electrode, *Journal of Hazardous Materials* 174, 236-243.

Yin, H. S., Zhou, Y. L., Ai, S. Y., Han, R. X., Tang, T. T., and Zhu, L. S. (2010) Electrochemical behavior of bisphenol A at glassy carbon electrode modified with gold nanoparticles, silk fibroin, and PAMAM dendrimers, *Microchimica Acta* 170, 99-105.

Yuan, D., Anthis, A. H. C., Ghahraman Afshar, M., Pankratova, N., Cuartero, M., Crespo, G. A., and Bakker, E. (2015) All-Solid-State Potentiometric Sensors with a Multiwalled Carbon Nanotube Inner Transducing Layer for Anion Detection in Environmental Samples, *Analytical Chemistry* 87, 8640-8645.

166. Yuan, S., Mao, R., Li, Y., Zhang, Q., and Wang, H. (2012) Layer-by-layer assembling TiO₂ film from anatase TiO₂ sols as the photoelectrochemical sensor for the determination of chemical oxygen demand, *Electrochimica Acta* 60, 347-353.

Yun, W., Cai, D., Jiang, J., Zhao, P., Huang, Y., and Sang, G. (2016) Enzyme-free and label-free ultra-sensitive colorimetric detection of Pb²⁺ using molecular beacon and DNAzyme based amplification strategy, *Biosensors and Bioelectronics* 80, 187-193.

Zacco, E., Pividori, M. I., and Alegret, S. (2006) Electrochemical magnetoimmunosensing strategy for the detection of pesticides residues, *Analytical Chemistry* 78, 1780-1788.

Zeng, L., Zhang, A., Zhu, X., Zhang, C., Liang, Y., and Nan, J. (2013) Electrochemical determination of nonylphenol using differential pulse voltammetry based on a graphene-DNA-modified glassy carbon electrode, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 703, 153-157.

Zhai, C., Guo, Y. M., Sun, X., Zheng, Y. H., and Wang, X. Y. (2014) An acetylcholinesterase biosensor based on graphene-gold nanocomposite and calcined layered double hydroxide, *Enzyme and Microbial Technology* 58-59, 8-13.

Zhai, C., Sun, X., Zhao, W. P., Gong, Z. L., and Wang, X. Y. (2013) Acetylcholinesterase biosensor based on chitosan/prussian blue/multiwall carbon nanotubes/hollow gold nanospheres nanocomposite film by one-step electrodeposition, *Biosensors & Bioelectronics* 42, 124-130.

Zhang, C., Lai, C., Zeng, G., Huang, D., Tang, L., Yang, C., Zhou, Y., Qin, L., and Cheng, M. (2016) Nanoporous Au-based chronocoulometric aptasensor for amplified detection of Pb²⁺ using DNAzyme modified with Au nanoparticles, *Biosensors and Bioelectronics* 81, 61-67.

Zhang, L., Chang, H., Hirata, A., Wu, H., Xue, Q. K., and Chen, M. (2013) Nanoporous gold based optical sensor for sub-ppt detection of mercury ions, *ACS Nano* 7, 4595-4600.

Zhang, Y., and Angelidaki, I. (2011) Submersible microbial fuel cell sensor for monitoring microbial activity and BOD in groundwater: Focusing on impact of anodic biofilm on sensor applicability, *Biotechnol. Bioeng.* 108, 2339-2347.

Zhang, Y., Wei, S. H., Xu, J. H., and Chen, S. T. (2013) An electrochemical immune bioassay for naphthalene using Prussian blue and a nano-gold particle modified glass carbon electrode, *Analytical Methods* 5, 6141-6146.

Zhang, Y., Zeng, G. M., Tang, L., Li, Y. P., Chen, Z. M., and Huang, G. H. (2014) Quantitative detection of trace mercury in environmental media using a three-dimensional electrochemical sensor with an anionic intercalator, *RSC Advances* 4, 18485-18492.

Zhang, Y. H., Su, Q., Xu, J. H., Zhang, Y., and Chen, S. T. (2014) Detecting of Benzo a pyrene Using a Label-free Amperometric Immunosensor, *International Journal of Electrochemical Science* 9, 3736-3745.

Zhao, L., He, L., Chen, S., Zou, L., Zhou, K., Ao, X., Liu, S., Hu, X., and Han, G. (2017) Microbial BOD sensors based on Zr (IV)-loaded collagen fiber, *Enzyme and Microbial Technology* 98, 52-57.

Zheng, X. L., Tian, D., Duan, S., Wei, M. C., Liu, S., Zhou, C. L., Li, Q., and Wu, G. (2014) Polypyrrole Composite Film for Highly Sensitive and Selective Electrochemical Determination Sensors, *Electrochimica Acta* 130, 187-193.

Zhou, W. S., Zhao, B., Huang, X. H., and Yang, X. D. (2013) Electrochemical determination of 4-nonylphenol on graphene-chitosan modified glassy carbon electrode, *Fenxi Huaxue Chin. J. Anal. Chem.* 41, 675-680.

Zhu, J., Zhang, Y., Wang, L., Sun, T., Wang, M., Wang, Y., Ma, D., Yang, Q., and Tang, Y. (2016) A simple turn-on Schiff base fluorescence sensor for aluminum ion, *Tetrahedron Lett.* 57, 3535-3539.

Zhu, R., Zhou, G., Tang, F., Tong, C., Wang, Y., and Wang, J. (2017) Detection of Cu²⁺ in Water Based on Histidine-Gold Labeled Multiwalled Carbon Nanotube Electrochemical Sensor, *Int. J. Anal. Chem.* 2017.

Zia, A. I., Mukhopadhyay, S. C., Al-Bahadly, I. H., Yu, P. L., Gooneratne, C. P., Kosel, J., and Ieee. (2014) Introducing Molecular Selectivity in Rapid Impedimetric Sensing of Phthalates, 2014 Ieee International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2mtc) Proceedings, 838-843.

Zia, A. I., Mukhopadhyay, S. C., Yu, P. L., Al-Bahadly, I. H., Gooneratne, C. P., and Kosel, J. (2015) Rapid and molecular selective electrochemical sensing of phthalates in aqueous solution, *Biosensors & Bioelectronics* 67, 342-349.

Zia, A. I., Rahman, M. S. A., Mukhopadhyay, S. C., Yu, P. L., Al-Bahadly, I. H., Gooneratne, C. P., Kosel, J., and Liao, T. S. (2013) Technique for rapid detection of phthalates in water and beverages, *Journal of Food Engineering* 116, 515-523.

Zia, A. I., Syaifudin, A. R. M., Mukhopadhyay, S. C., Al-Bahadly, I. H., Yu, P. L., Gooneratne, C. P., Kosel, J., and Liao, T. S. (2013) MEMS Based Impedimetric Sensing of Phthalates, In 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (Ferrero, A., Ed.), pp 855-860, IEEE, New York.

ANNEXE 1 : tableau de synthèse des articles étudiés (les LD et LQ exprimées en concentrations molaires ont été converties en concentrations massiques).

Substance analysée	Type capteur	Technique analytique	Sous-technique analytique	Matrices testées	Avancement	Gammes de mesure	limites de détection (LD) ou quantification (LQ)	Auteurs	Année
2-naphthylamine 2-anthramine acridine orange 1,2-diaminoanthraquinone	biocapteur	Electrochimie	Chronopotentiométrie	eau de surface eau résiduaire eau industrielle	3	2-naphthylamine : 0 - 2860 µg/L 2-anthramine : 0 - 154 µg/L acridine orange : 0 - 53 µg/L 1,2-diaminoanthr. : 0 - 48 µg/L	LD : 2-naphthylamine : 715 µg/L LD : 2-anthramine : 38 µg/L LD : acridine orange : 13 µg/L LD : 1,2-diaminoanthr. : 12 µg/L	Chiti et al.	2001
4-nonylphénol	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	eau de robinet	2	0.95 - 480 µg/L	LD : 70 µg/L	Huang et al.	2011
4-nonylphénol	capteur chimique	Electrochimie	-	-	?	22 - 26400 µg/L	LD : 7.3 µg/L	Ren et al.	2013
4-nonylphénol	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	eau de surface eau de pluie	3	0.01 - 10 µg/L	LD : 0.0035 µg/L	Chen	2013
4-nonylphénol	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	eau de robinet eau de surface	3	11 - 880 µg/L	LD : 2.2 µg/L	Zeng et al.	2013
4-nonylphénol	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	lait et miel	3	2.2 - 8800 µg/L	LD : 1.1 µg/L	Zhou et al.	2013
4-Nonylphénol 4-Octylphénol 4-tert-Octylphénol	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	eau industrielle	3	100 - 100 000 µg/L	LD 4-Octylphénol : 51 µg/L LD 4-nonylphénol : 92 µg/L LD 4-tert-octylphénol : 158 µg/L	David et al.	2012
4-Nonylphénol 4-Octylphénol Benzo (a)pyrene	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	eau de robinet	2	-	-	Lin et al.	2015
4-tert-Octylphenol	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau de surface eau de robinet jus d'orange	3	1.3 - 4.1 µg/L	LD : 0.1 µg/L	Wan et al.	2013
Atrazine	biocapteur	Electrochimie	Ampérométrie	eau de surface	3	-	LD : 0.006 µg/L	Zacco et al.	2006
Atrazine	biocapteur	Electrochimie	Ampérométrie	eau de surface	3	0.001 - 0.5 µg/L	-	Kim et al.	2008
Atrazine	biocapteur	Electrochimie	Spectroscopie d'impédance électrochimique	eau minérale eau de surface	3	0.01 ng/L - 1 µg/L	LD : 2.10 ⁻⁶ µg/L	Pichetsumthorn et al.	2012
Atrazine	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à ondes carrées	-	2	0.10 - 21.5 µg/L	LD : 0.004 µg/L	Norouzi et al.	2012
Atrazine	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à ondes carrées	eau ultrapure dopée	2	-	LD : 0.0002 ng/L	Tran et al.	2012
Atrazine	biocapteur	Electrochimie	Spectroscopie d'impédance électrochimique	-	2	0.01 - 50 µg/L	LD : 0.01 µg/L	Deep et al.	2014
Atrazine	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	Extrait de maïs	3	0.05 - 0.5 µg/L	LD : 0.016 µg/L	Liu et al.	2014
Atrazine	biocapteur	Electrochimie	Chronoampérométrie	eau de surface	3	-	LD : 0.0002 µg/L	Gonzalez-Techera et al.	2015
Atrazine	capteur chimique	Electrochimie	Conductimétrie	eau résiduaire	3	0 - 2160 µg/L	LD : 0.22 µg/L	Díaz-González et al.	2015
Benzo (a) pyrene	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau de robinet	2	4 - 50 µg/L	LD : 0.72 µg/L	Yardim et al.	2011
Benzo (a) pyrene	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau ultrapure dopée	2	0.002 - 0.5 µg/L	LD : 0.001 µg/L	Lin et al.	2012
Benzo (a) pyrene	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau industrielle	3	0.2 - 100 µg/L	LD : 0.08 µg/L	Zhang et al.	2014
Benzo (k) fluoranthène	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	eau industrielle	3	0.25 - 250 µg/L	LD : 0.025 µg/L	Zheng et al.	2014
Bisphénol A	biocapteur	Optique	Fluorescence	eau de surface eau de robinet	3	-	LD : 0.014 µg/L	Rodríguez-Mozaz et al.	2005
Bisphénol A	biocapteur	Optique	Résonance des plasmons de surface	eau de surface canal urbain lagon d'irrigation	3	0.5 - 50 µg/L	LD : 0.03 µg/L	Marchesini et al.	2005
Bisphénol A	biocapteur	Piézoélectricité	microbalance à cristal de quartz	eau de mer	3	-	LD : 0.1 µg/L	Park et al.	2005
Bisphénol A	capteur chimique	Electrochimie	Ampérométrie	eau de surface	2	22 - 2700 µg/L	LD : 4.5 µg/L	Mita et al.	2007
Bisphénol A	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	eau de surface	3	50 - 2000 µg/L	LD : 8.6 µg/L	Wang et al.	2009

Substance analysée	Type capteur	Technique analytique	Sous-technique analytique	Matrices testées	Avancement	Gammes de mesure	limites de détection (LD) ou quantification (LQ)	Auteurs	Année
Bisphénol A	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau de surface	3	2.3 - 296 µg/L	LD : 1.1 µg/L	Fan et al.	2010
Bisphénol A	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau de surface	3	2.9 - 2250 µg/L	LD : 0.23 µg/L	Yin et al.	2010
Bisphénol A	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau de surface	3	0.23 - 296 µg/L	LD : 0.11 µg/L	Yin et al.	2010
Bisphénol A	biocapteur	Optique	Resonance des plasmons de surface	eau résiduaire	3	0.00005 - 1 µg/L	LD : 0.08 - 0.14 µg/L	Hegnerová et al.	2010
Bisphénol A	biocapteur	Optique	Resonance des plasmons de surface	eau de robinet	2	0.1 - 1 000 µg/L	LD : 0.00004 µg/L	Hegnerová et al.	2010
Bisphénol A	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau de robinet	2	25 - 1 800 000 µg/L	LD : 0.82 µg/L	Huang et al.	2011
Bisphénol A	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	Lait	3	2.3 - 700 µg/L	LD : 1.1 µg/L	Yin et al.	2011
Bisphénol A	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	eau minérale	2 ou 3	11 - 228 µg/L	LD : 11 µg/L	Ntsendwana et al.	2012
Bisphénol A	biocapteur	Relaxométrie		eau de robinet	2	1 - 45 µg/L	LD : 0.4 µg/L	Xu et al.	2012
Bisphénol A	capteur chimique	Electrochimie	Ampérométrie	eau de robinet eau de surface résiduaire	3	1 - 25 µg/L	LD : 0.46 µg/L	Lu et al.	2013
Bisphénol A	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau de robinet	2	0.0001 - 0.1 µg/L	LD : 0.0003 µg/L	Xue et al.	2013
Bisphénol A	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie à ondes carrées	eau résiduaire	3	16.8 - 52.4 µg/L	LD : 0.84 µg/L	Rather et De Wael	2013
Bisphénol A	nano-particules fonctionnalisées avec molécules biologiques	Optique	colorimétrie	eau de robinet eau de surface	3	-	LD : 0.1 µg/L	Mei et al.	2013
Bisphénol A 2-Anthramine	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à ondes carrées	eau résiduaire	2-3	-	-	Lucarelli et al.	2002
Bisphénol A 4-pentylphénol 4-octylphénol 4-nonylphénol	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau de robinet	2	0.034 - 0.14 µg/L	LD : 0.002 µg/L	Noh et al.	2010
Bisphénol A Nonylphénol Ethinylestradiol	capteur chimique	Electrochimie	Spectroscopie d'impédance électrochimique	eau de robinet eau de surface souterraine	3	3.4 - 59 µg/L	-	Liu et al.	2011
Chlorfenvinphos	biocapteur	Electrochimie	Ampérométrie	-	2	-	LD : 4.7 ng/L	Istamboulie et al.	2007
Chlorfenvinphos	biocapteur	Electrochimie	Ampérométrie	eau de robinet dopée	2	5 - 12 500 ng/L	LD : 4.9 ng/L	Kesik et al.	2014
Chlorpyrifos	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à ondes carrées	eau de surface	3	3.5 - 350 000 ng/L	LD : 0.35 ng/L	Viswanathan et al.	2009
Chlorpyrifos	capteur chimique	Electrochimie	Ampérométrie	eau de surface	3	35 - 24500 ng/L	LD : 35 ng/L	Chauhan et al.	2011
Chlorpyrifos	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	extraction fruits et légumes	2	100 - 10 000 000 ng/L	LD : 46 ng/L	Sun et al.	2012
Chlorpyrifos	biocapteur	Electrochimie	Ampérométrie	extraction fruits et légumes	3	100 - 150 000 ng/L	LD : 60 ng/L	Sun et al.	2013
Chlorpyrifos	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	extraction légumes	3	17 - 26300 ng/L	LD : 17 ng/L	Zhai et al.	2013
Chlorpyrifos	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	extraction légumes	3	0.5 - 150 µg/L	LD : 0.05 µg/L	Zhai et al.	2014
Chlorpyrifos	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau de puits	3	3.5 - 35 000 ng/L	LD : 1.4 ng/L	Sreedhar et al.	2015
DEHP	capteur chimique	Electrochimie	Spectroscopie d'impédance électrochimique	eau déionisée boisson énergisante	2	-	-	Zia et al.	2013
DEHP	capteur chimique	Electrochimie	Spectroscopie d'impédance électrochimique	eau ultrapure boisson énergisante	2	0.1 - 20 mg/L	-	Zia et al.	2013
DEHP	capteur chimique	Electrochimie	Spectroscopie d'impédance électrochimique	eau ultrapure	1	10 - 200 mg/L	-	Zia et al.	2014
DEHP, phtalates	capteur chimique	Electrochimie	Spectroscopie d'impédance électrochimique	eau ultrapure	1	1 - 100 mg/L	-	Zia et al.	2014
Diuron	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à ondes carrées	-	2	1 ng/L - 10 mg/L	LD : 1 ng/L	Sharma et al.	2011

Substance analysée	Type capteur	Technique analytique	Sous-technique analytique	Matrices testées	Avancement	Gammes de mesure	limites de détection (LD) ou quantification (LQ)	Auteurs	Année
Diuron							DL Diuron : 0.23 ng/L		
Paraoxon-méthyl	biocapteur	Electrochimie	Conductimétrie	-	2	-	DL Paraoxon-méthyl : 3.10 ⁰⁷ ng/L	Tekaya et al.	2013
Parathion-méthyl							DL Parathion-méthyl : 3.10 ⁰⁹ ng/L		
Triazine							DL Triazine : 8.10 ⁻¹⁰ ng/L		
Endosulfan	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à ondes carrées	eau de robinet eau de surface	3	10 - 2000 ng/L	LD : 10 ng/L	Liu et al.	2012
HAP	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau de robinet	2	50 - 1000 ng/L	LD : 50 ng/L	Lin et al.	2007
Hexachlorobenzene	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	eau de surface	3	28 - 28 500 ng/L	LD : 8.5 ng/L	Wu et al.	2011
Isoproturon	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau ultrapure dopée	2	-	LD : 1000 ng/L	Manisankar et al.	2005
Isoproturon et dicofol	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	-	2	0.01 - 100 mg/L	LD : 50 ng/L	Manisankar et al.	2008
Lindane	biocapteur	Electrochimie	Ampérométrie	eaux environnementales	2	2 - 45 ng/L	LD : 1 ng/L	Anu Prathap et al.	2012
Lindane	capteur chimique	Electrochimie	Potentiométrie	eau de mer eau de puits eau de robinet	3	2.1 - 213 000 µg/L	LD : 2.13 µg/L	Anirudhan	2015
Naphtalène	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau de surface	?	4000 - 100 000 ng/L	LD : 60 ng/L	Zhang et al.	2013
Phenanthrène	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	eau industrielle	3	1.8 - 17800 ng/L	LD : 0.018 ng/L	Liu et al.	2014
Anhracène									
Trifluraline	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie à ondes carrées	fluides biologiques	3	6.7 - 33500 ng/L	LD : 2.7 ng/L LQ : 50 ng/L	Mirabi-Semnakolaii et al.	2010
PCB 101	capteur chimique	Electrochimie	Photoélectrochimie	eau de surface	3	0.026 - 9800 ng/L	LD : 0.003 ng/L	Shi et al.	2016
Ag (I)	capteur chimique	Optique	Spectrophotométrie UV-visible	eau de surface	3	0.002 - 122 000 µg/L	LD : 0.001 µg/L	Firooz et al.	2013
Ag (I)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à impulsions différentielles (DPASV)	eau de surface	3	0.2 - 400 µg/L	LD : 0.07 µg/L	Azhari et al.	2016
Ag (I)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à impulsions différentielles (DPASV)	eau de surface	3	-	LD : 70 ng/L	Li et al.	2016
Al (III)	capteur chimique	Optique	Fluorescence	eau de surface	2	-	LD : 2.7 µg/L	Zhu et al.	2016
As (III)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à ondes carrées (SWASV)	eau de surface dopée	3	0.75 - 3.8 µg/L en direct 0.075 - 0.75 µg/L : 3 à 36 min préconc.	LD : 0.037 µg/L LQ : 0.075 µg/L	Touilloux et al.	2015
As (III)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à ondes carrées (SWASV)	eau industrielle	2	1 - 50 µg/L	LD : 0.68 µg/L LQ : 1.9 µg/L	Mafa et al.	2016
As (III)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à ondes carrées (SWASV)	eau de surface	2	0.5 - 15 µg/L	LD : 0.14 µg/L	Yang et al.	2016
As (III)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à ondes carrées (SWASV)	eau de surface	3	1 - 10 µg/L	LD : 0.16 µg/L	Yang et al.	2017
Bi (III)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à ondes carrées (SWASV)	eau de surface	3	2.1 - 42 ng/L	LD : 0.59 ng/L	Tyszczyk-Rotko et al.	2016
Cd (II)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à ondes carrées (SWASV)	eau de surface	?	0 - 140 µg/L	LD : 0.36 µg/L	Xu et al.	2014
Cd (II)	electrode spécifique (ISE)	Electrochimie	Potentiométrie	eau de surface	3	6.4 - 416 µg/L 3.3 - 337 µg/L	LD : 3.6 µg/L LD : 1.8 µg/L	Mirzaei et Piliy	2015
Cd (II)	capteur chimique	Optique	Resonance des plasmons de surface	eau de surface	3	5600 - 96500 µg/L	LD : 17 µg/L	Mehta et al.	2015
Cd (II)	capteur chimique	Optique	Fluorescence	eau de surface dopée	2-3	11 - 11 200 µg/L	LD : 2.1 µg/L	Sakthivel et al.	2017
Cd (II) et Pb (II)	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie cyclique	eau de surface	3	10 - 500 µg/L	LD Cd : 4.4 µg/L LD Pb : 3.3 µg/L	Promphet et al.	2015

Substance analysée	Type capteur	Technique analytique	Sous-technique analytique	Matrices testées	Avancement	Gammes de mesure	limites de détection (LD) ou quantification (LQ)	Auteurs	Année
Cd (II) et Pb (II)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à ondes carrées (SWASV)	eau de surface dopée	3	4 - 150 µg/L	LD Cd : 3.2 µg/L LD Pb: 2.1 µg/L	Vu et al.	2015
Cd (II) et Pb (II)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à ondes carrées (SWASV)	eau de surface dopée	2-3	5 - 110 µg/L	LD Cd : 1.1 µg/L LD Pb: 0.87 µg/L	Saeed et al.	2016
Cd (II), Pb (II) et Ni (II)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à ondes carrées (SWASV)	eau de surface eau résiduaire	3	1 - 100 µg/L	LD Cd : 0.81 µg/L LD Pb : 0.65 µg/L LD Ni : 5.4 µg/L	Niu et al.	2015
Co (II) et Ni (II)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution après adsorption (ASV)	neige	2	-	LD Ni : 10 µg/L LD Co : 17 µg/L	Bobrowski et al.	2014
Cr (III)	biocapteur	Optique	Fluorescence	eau de surface dopée eau industrielle	3	5.2 - 5200 µg/L	LD : 1.3 µg/L	Li et al.	2014
Cr (III)	capteur chimique	Optique	Spectrophotométrie UV-visible Spectroscopie Raman	eau de surface dopée eau de mer dopée	2	-	LD : 15.6 µg/L	Ly et al.	2015
Cr (VI)	capteur chimique	Electrochimie	Electroluminescence	eau de surface	2	2.6 - 3120 µg/L	LD : 1 µg/L	Chen et al.	2015
Cr (VI)	nano-particules fonctionnalisées avec molécules biologiques	Optique	colorimétrie	eau de surface	?	7.8 - 2600 µg/L	LD : 6.2 µg/L	Guo et al.	2016
Cr (VI)	capteur chimique	Electrochimie	Amperométrie	eau de surface dopée	2	0.52 - 2600 µg/L	LD : 0.3 µg/L	Siavash Moakhar et al.	2017
Cr et Cr (VI)	capteur chimique	Electrochimie	total Cr : voltammétrie par redissolution cathodique après adsorption (ACSV) Cr (VI) : amperométrie	eau de surface dopée	2	total Cr : 5 - 300 µg/L Cr(VI) : 0.5 - 100 µg/L	LD total Cr : 5 µg/L LD Cr(VI) : 0.5 µg/L	Wang et al.	2017
Cu (II)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à impulsions différentielles (DPASV)	eau de surface eau de mer	3	0.11 - 1000 µg/L	LQ : 0.37 µg/L	Cantalapiedra et al.	2015
Cu (II)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à impulsions différentielles (DPASV)	eau de robinet eau de surface	3	0.09 - 340 µg/L	LD : 0.01 µg/L	Heidarimoghaddam et al.	2015
Cu (II)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à impulsions différentielles (DPASV)	eau de robinet eau de surface	3	0.09 - 340 µg/L	LD : 0.01 µg/L	Izadkhal et al.	2015
Cu (II)	electrode spécifique (ISE)	Electrochimie	Potentiométrie	eau de surface	?	63 - 635 500 µg/L 30 - 635 500 µg/L	LD : 63 µM LD : 30 µM	Ali et al.	2016
Cu (II)	nano-particules fonctionnalisées avec molécules chimiques	Optique	Fluorescence	eau de surface	3	0.63 - 121 µg/L	LD : 0.25 µg/L	Yang et al.	2016
Cu (II)	capteur chimique	Optique	Resonance des plasmons de surface	eau de robinet eau de surface	2	0.00063 - 635 µg/L	LD : 0.0003 µg/L	Ding et al.	2016
Cu (II)	capteur chimique	Optique	Spectroscopie Raman	eau de surface	3	63 - 3180 µg/L	LD : 63 µg/L	Ly et al.	2016
Cu (II)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à impulsions différentielles (DPASV)	eau de surface	3	95 - 1970 µg/L	LQ : 25 µg/L	Qi et al.	2017
Cu (II)	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à impulsions différentielles (DPASV)	eau de surface	3	0.00063 - 6.3 µg/L	LD : 0.00006 µg/L	Zhu et al.	2017
Cu (II)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à ondes carrées (SWASV)	eau de surface	?	5 - 100 µg/L	LD : 0.67 µg/L	Yang et al.	2017
Fe (II)	nano-particules fonctionnalisées avec molécules chimiques	Optique	colorimétrie	eau de surface dopée	2	-	LD : 0.01 mg/L	Jia et al.	2016
Fe (III)	capteur chimique	Optique	Fluorescence	-	?	0.005 - 3350 mg/L	-	Shamsipur et al.	2013
Hg (II)	biocapteur	Optique	Spectroscopie Raman	eau de surface	2	0.2 - 2000 µg/L	LD : 0.0002 µg/L	Zhang et al.	2013

Substance analysée	Type capteur	Technique analytique	Sous-technique analytique	Matrices testées	Avancement	Gammes de mesure	limites de détection (LD) ou quantification (LQ)	Auteurs	Année
Hg (II)	biocapteur	Electrochimie	-	eau de surface	?	0.01 - 70 µg/L	LD : 0.002 µg/L	Zhang et al.	2014
Hg (II)	nano-particules fonctionnalisées avec molécules chimiques	Optique	colorimétrie	eau de surface	2	100 - 700 µg/L	LD : 8.6 µg/L	Soomro et al.	2014
Hg (II)	biocapteur	Optique	Spectrophotométrie UV-visible	eau de robinet eau de surface	4	2 - 200 µg/L	LD : 3.5 µg/L	Wei et al.	2014
Hg (II)	capteur chimique	Optique	Spectroscopie Raman	eau de surface dopée	2	0.22 - 12.2 µg/L	LD : 0.16 µg/L	Kang et al.	2014
Hg (II)	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à ondes carrées (SWV)	eau de surface	3	0.002 - 100 µg/L	LD : 0.0002 µg/L	Gan et al.	2015
Hg (II)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à impulsions différentielles (DPASV)	eau de surface dopée	2-3	1 - 100 µg/L	LD : 0.06 µg/L	Liao et al.	2015
Hg (II)	biocapteur	Optique	Spectroscopie Raman	eau de surface	3	0.0002 - 20 µg/L	LD : 0.0001 µg/L	Sun et al.	2015
Hg (II)	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	eau de surface dopée	2-3	0.2 - 40 µg/L	LD : 0.066 µg/L	Wu et al.	2016
Hg (II)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie à redissolution anodique à ondes carrées (SWASV)	eau de surface dopée	2-3	0 - 100 µg/L	LD : 3 µg/L	Cinti et al.	2016
Hg (II)	capteur chimique	Optique	Fluorescence	eau de surface	?	10 - 400 µg/L	-	Shan et al.	2016
Hg (II)	capteur chimique	Optique	Resonance des plasmons de surface	eau de surface dopée	2-3	0.2 - 200 000 µg/L	LD : 0.076 µg/L	Park et al.	2016
Hg (II)	nano-particules fonctionnalisées avec molécules biologiques	Optique	colorimétrie	eau de surface	2	2 - 2800 µg/L	LD : 1.8 µg/L	Lai et al.	2016
Hg (II)	nano-particules fonctionnalisées avec molécules biologiques	Optique	colorimétrie	eau de surface	2	0 - 200 µg/L	LD : 0.13 µg/L	Tan et al.	2016
Hg (II), As (III), Pb (II) et Cd (II)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	eau de surface	3	Cd : 5.6 - 34 µg/L Pb : 10 - 52 µg/L As : 0.03 - 0.13 µg/L Hg : 20 - 240 µg/L	LD Cd : 0.3 µg/L LD Pb : 0.3 µg/L LD As : 0.0001 µg/L LD Hg : 0.32 µg/L	Gumpu et al.	2017
métaux : Ag (I), Hg (II), Cr (III), Sn (IV), Cd (II), Cu (II), Pb (II), Zn (II), Mn (II)	nano-particules fonctionnalisées avec molécules chimiques	Optique	Fluorescence	eau de surface eau résiduaire	2	-	LD : 50 nM	Tan et al.	2016
Ni (II)	paper-based capteurs	Optique	colorimétrie	eau de surface dopée	2	in sol.: 1.8 - 540 000 µg/L paper : 4.5 - 4460 µg/L	LD in sol. : 2 µg/L LD paper : 4.8 µg/L	Li et al.	2017
Ni (II)	paper-based capteurs	Optique	colorimétrie	eau de surface	3	1.8 - 540 000 µg/L	LD : 2 µg/L	Li et al.	2017
Ni (II) et Ba (II)	capteur chimique	Optique	Resonance des plasmons de surface	eau de surface	2	Ni : 10 - 500 µg/L Ba : 15 - 500 µg/L	LD Ni : 3 µg/L LD Ba : 5 µg/L	Shrivras et al.	2017
Pb (II)	capteur chimique	Optique	Spectroscopie Raman	eau de surface eau de mer	2	-	LD : 104µg/L	Ly and Joo	2015
Pb (II)	biocapteur	Electrochimie	Voltammétrie à impulsions différentielles (DPV)	eau de surface	3	30 - 33000 ng/L	LD :6 ng/L	Gao et al.	2016
Pb (II)	biocapteur	Electrochimie	Chronocoulométrie	eau de surface dopée	2-3	10 - 2100 ng/L	LD :2 ng/L	Zhang et al.	2016
Pb (II)	nano-particules fonctionnalisées avec molécules biologiques	Optique	colorimétrie	eau de surface	2	10 - 1000 ng/L	LD : 4 ng/L	Yun et al.	2016
Pb (II) et Hg (II)	nano-particules fonctionnalisées avec molécules biologiques	Optique	colorimétrie	eau de robinet eau de surface eau de mer	2-3	-	LD Hg : 1 µg/L LD Pb : 10 µg/L	Sedghi et al.	2015
Pb (II) et Hg (II)	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie par redissolution anodique à balayage linéaire (LSASV)	eau de surface dopée	2-3	400 µg/L - 20 mg/L	LD : 82 µg/L	Shoub et al.	2017

Substance analysée	Type capteur	Technique analytique	Sous-technique analytique	Matrices testées	Avancement	Gammes de mesure	limites de détection (LD) ou quantification (LQ)	Auteurs	Année
Se (IV)	capteur chimique	Electrochimie	Chromatographie liquide avec détection électrochimique	eau de surface dopée	2-3	0.2 - 1.6 mg/L	LD : 0.01 mg/L	Wang et Shan	2016
alcalinité, pH	electrode spécifique (ISE)	Electrochimie	Chronopotentiométrie	eau ultrapure tamponnée	1	-	-	Crespo et al.	2012
alcalinité, pH	electrode spécifique (ISE)	Electrochimie	Chronopotentiométrie	eau ultrapure tamponnée	1	-	-	Afshar et al.	2014
ammonium	capteur chimique	Optique	Réflectance	eau de surface dopée	2-3	10 - 60 µg/L	LD : 7.9 µg/L	Tan et al.	2012
ammonium	capteur chimique	Piézoélectricité	microbalance à cristal de quartz	-	?	-	LD : 0.04 mg/L	Kosaki et al.	2012
ammonium	capteur chimique	Electrochimie	Conductimétrie	eau de surface dopée	2-3	0.18 - 27 mg/L	LD : 0.18 mg/L	Saiaipina et al.	2016
calcium	electrode spécifique (ISE)	Electrochimie	Coulométrie	eau minérale	2	0.4 - 4.0 mg/L	-	Dorokhin et al.	2014
calcium et dureté de l'eau	electrode spécifique (ISE)	Electrochimie	Potentiométrie	eau de surface	3	Ca : 0.4 - 400 mg/L	-	Nanda et al.	2007
carbonate	electrode spécifique (ISE)	Electrochimie	Chronopotentiométrie	eau ultrapure dopée	1	1.8 - 19.5 mg/L	-	Jarolímová et al.	2014
carbonate	electrode spécifique (ISE)	Electrochimie	Potentiométrie	eau de surface	2-3	-	-	Jansod et al.	2016
DBO	bioelectrochemical reactor	Electrochimie	Pile microbienne	souterraine contaminée	3	-	-	Zhang et Angelidaki	2011
DBO	bioelectrochemical reactor	Electrochimie	Pile microbienne	eau synthétique dopée	2	32 - 1280 mg/L	-	Modin et Wilen	2012
DBO	biocapteur	Electrochimie	Mesure consommation O ₂	eau résiduaire synthétique	2	-	-	Hussin et al.	2012
DBO	bioelectrochemical reactor	Electrochimie	Pile microbienne	-	?	10 - 50 mg/L	-	Tian et al.	2014
DBO	biocapteur	Electrochimie	Ampérométrie	synthétique eau résiduaire	3	20 - 230 mg/L	-	Hooi et al.	2015
DBO	bioelectrochemical reactor	Electrochimie	Pile microbienne	eau résiduaire synthétique	2	-	-	Commault et al.	2016
DBO	bioelectrochemical reactor	Electrochimie	Pile microbienne	eau résiduaire	3	44 - 343 mg/L	-	Kharkwal et al.	2017
DBO	biocapteur	Electrochimie	Mesure consommation O ₂	eau résiduaire synthétique	2	-	-	Zhao et al.	2017
DCO	capteur chimique	Electrochimie	Ampérométrie	eau de surface eau résiduaire eau industrielle	3	0.5 - 200 mg/L	LD : 0.3 mg/L	Ma et al.	2011
DCO	capteur chimique	Electrochimie	Ampérométrie	eau de surface	3	4.8 - 600 mg/L	LD : 3.6 mg/L	Yang et al.	2011
DCO	capteur chimique	Electrochimie	Ampérométrie	eau synthétique dopée	1	-	LD : 0.3 mg/L	Bogdanowicz et al.	2012
DCO	capteur chimique	Electrochimie	Ampérométrie	eau résiduaire synthétique	2	19 - 11600 mg/L	LD : 0.19 mg/L	Wang et al.	2012
DCO	capteur chimique	Electrochimie	Chronoampérométrie	eau synthétique dopée	2	0 - 130 mg/L	LD : 1 mg/L	Yuan et al.	2012
DCO	capteur chimique	Electrochimie	Photoelectrocatalysis Coulométrie	eau résiduaire	3	-	LD : 0.5 mg/L	Chen et al.	2012
DCO	capteur chimique	Electrochimie	Ampérométrie	eau ultrapure dopée	2	-	-	Li et al.	2014
DCO	capteur chimique	Electrochimie	Ampérométrie	eau de surface eau résiduaire	3	30 - 8500 mg/L	LD : 3.6 mg/L	Mo et al.	2016
DCO	capteur chimique	Electrochimie	Photoelectrochimie	-	1	-	-	Ruslan et al.	2016
DCO	capteur chimique	Electrochimie	Ampérométrie	eau de surface	3	-	-	Wang et al.	2015
glucose	capteur chimique	Electrochimie	Ampérométrie	eau de surface	3	-	-	Wang et al.	2015
nitrate	capteur chimique	Electrochimie	Coulométrie	eaux naturelles	3	0.62 - 6.2 mg/L	LD : 0.068 mg/L	Sohail et al.	2012
nitrate	capteur chimique	Electrochimie	Spectroscopie d'impédance électrochimique	eau de surface	2-3	-	-	Alahi et al.	2016
nitrite	capteur chimique	Electrochimie	Ampérométrie	-	?	0.02 - 33 mg/L	LD : 0.0046 mg/L	Ye et al.	2011
nitrite	capteur chimique	Electrochimie	Ampérométrie	eau de surface dopée eau de pluie dopée	2-3	0.09 - 7.5 mg/L	LD : 0.066 mg/L	Wu et al.	2014
nitrite	electrode spécifique (ISE)	Electrochimie	Potentiométrie	fluides biologiques	2	-	LD : 5.5 mg/L	Néel et al.	2014
nitrite	nano-particules fonctionnalisées avec molécules chimiques	Optique	colorimétrie	eau synthétique	2	-	-	Kumar et Anthony	2014

Substance analysée	Type capteur	Technique analytique	Sous-technique analytique	Matrices testées	Avancement	Gammes de mesure	limites de détection (LD) ou quantification (LQ)	Auteurs	Année
nitrite	capteur chimique	Electrochimie	Voltammétrie à ondes carrées	eau de surface dopée	2-3	184 - 1840 mg/L	LD : 0.92 mg/L	Sahraoui et al.	2015
nitrite	capteur chimique	Electrochimie	Ampérométrie	échantillon alimentaire	2	0.009 - 80 mg/L	LD : 0.0026 mg/L	Xu et al.	2016
pH, carbonate, nitrate, calcium	capteur chimique	Electrochimie	Potentiométrie	eau de surface	4	-	-	Pankratova et al.	2015
S (-II)	capteur chimique	Optique	Diffusion Rayleigh	rivière urbaine	?	0.026 - 9.9 mg/L	LD : 0.008 mg/L	Yan et al.	2016

ANNEXE 2 : informations bibliographiques sur les articles étudiés et des organismes de recherche principaux associés aux articles

Substance analysée	Auteurs	Année	Journal	Organisme principal	Pays
1,2-diaminoanthraquinone 2-anthramine 2-naphthylamine acridine orange	Chiti et al.	2001	Analytica Chimica Acta	Università degli Studi di Firenze Dipartimento di Sanità Pubblica, Epidemiologia, Chimica Analitica Ambientale	Italie
4-nonylphénol	Huang et al.	2011	Sensors and Actuators B : Chemical	University of Jinan College of Medicine and Life Sciences	Chine
4-nonylphénol	Ren et al.	2013	Analytical Methods	Northwest Normal University Chem & Chem Engrn Coll, Key Lab Bioelectrochem & Environm Anal Gansu Prov	Chine
4-nonylphénol	Chen	2013	Talanta	Jishou University Key laboratory of Hunan Forest Products and Chemical Industry Engineering	Chine
4-nonylphénol	Zeng et al.	2013	Journal of Electroanalytical Chemistry	South China Normal University School of Chemistry and Environment, Key Lab of Theoretical Chemistry of Environment	Chine
4-nonylphénol	Zhou et al.	2013	Chinese Journal of Analytical Chemistry	Nanjing Normal University Jiangsu Key Laboratory of Biofunctional Materials, Jiangsu Key Laboratory of New Power Batteries, School of Chemistry and Materials Science	Chine
4-Nonylphénol 4-Octylphénol 4-tert-Octylphénol	David et al.	2012	Turkish Journal of Chemistry	University of Bucharest Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry	Roumanie
4-Nonylphénol 4-Octylphénol Benzo (a)pyrene	Lin et al.	2015	Analytica Chimica Acta	Nanchang University State Key Laboratory of Food Science and Technology	Chine
4-tert-Octylphenol	Wan et al.	2013	Journal of Electroanalytical Chemistry	Wuhan Institute of Technology School of Chemical Engineering and Pharmacy, Key Laboratory for Green Chemical Process of Ministry of Education	Chine
Atrazine	Zacco et al.	2006	Analytical Chemistry	Autonomous University of Barcelona Sensors & Biosensors Group, Analytical Chemistry Division, Department of Chemistry	Espagne
Atrazine	Kim et al.	2008	Journal of Environmental Monitoring	Gwangju Institute of Science and Technology Department of Environmental Science and Engineering	Corée du Sud
Atrazine	Pichetsurnthorn et al.	2012	Biosensors and Bioelectronics	Wichita State University Bioengineering Program, College of Engineering	USA
Atrazine	Norouzi et al.	2012	International Journal of Electrochemistry Science	University of Tehran Center of Excellence in Electrochemistry	Iran
Atrazine	Tran et al.	2012	Biosensors and Bioelectronics	Université Paris Diderot ITODYS, UMR 7086 CNRS	France
Atrazine	Deep et al.	2014	Electrochimica Acta	Academy of Scientific and Innovative Research Central Scientific Instruments Organisation	Inde
Atrazine	Liu et al.	2014	Sensors and Actuators B : Chemical	Hunan Agricultural University College of Food Science and Technology, State Key Laboratory of Chemo-Biosensing and Chemometrics	Chine
Atrazine	Gonzalez-Techera et al.	2015	Biosensors and Bioelectronics	Instituto de Higiene Cátedra de Inmunología, Facultad de Química	Uruguay
Atrazine	Díaz-González et al.	2015	Biosensors and Bioelectronics	Instituto de Microelectrónica de Barcelona Nanobiotechnology for Diagnostics	Espagne
Benzo (a) pyrene	Yardim et al.	2011	Talanta	Yüzüncü Yı University Faculty of Science, Department of Analytical Chemistry	Turquie
Benzo (a) pyrene	Lin et al.	2012	Analytica Chimica Acta	South China Agricultural University Institute of Biomaterials, College of Sciences	Chine
Benzo (a) pyrene	Zhang et al.	2014	International Journal of Electrochemistry	Henan University of Urban Construction Department of Municipal and Environmental Engineering	Chine

Molécules analysées	Auteurs	Année	Journal	Organisme principal	Pays
Benzo (k) fluoranthène	Zheng et al.	2014	Electrochimica Acta	University of Jinan Key Laboratory of Chemical Sensing & Analysis in Universities of Shandong	China
Bisphénol A	Rodriguez-Mozaz et al.	2005	Water Research	IIQAB-CSIC Department of Environmental Chemistry	Espagne
Bisphénol A	Marchesini et al.	2005	Analytica Chimica Acta	Free University of Amsterdam Department of Analytical Chemistry and Applied Spectroscopy, Division of Chemistry, Faculty of Sciences	Pays-Bas
Bisphénol A	Park et al.	2005	Analyst	University of Tokyo Department of Materials Science, School of Engineering	Japon
Bisphénol A	Mita et al.	2007	Biosensors and Bioelectronics	Second University of Naples Department of Experimental Medicine, Faculty of Medicine and Surgery	Maroc
Bisphénol A	Wang et al.	2009	Analytica Chimica Acta	Huazhong University of Science and Technology Department of Chemistry	Chine
Bisphénol A	Fan et al.	2010	Analytica Chimica Acta	University of Jinan Key Laboratory of Chemical Sensing & Analysis in Universities of Shandong, School of Chemistry and Chemical Engineering	Chine
Bisphénol A	Yin et al.	2010	Journal of Hazardous Materials	Shandong Agricultural University College of Chemistry and Material Science	Chine
Bisphénol A	Yin et al.	2010	Microchemica Acta	Shandong Agricultural University College of Chemistry and Material Science	Chine
Bisphénol A	Hegnerová et al.	2010	Analytical and Bioanalytical Chemistry	Institute of Photonics and Electronics, Prague	Rép.e Tchèque
Bisphénol A	Hegnrovà et al.	2010	Sensors and Actuators B	Institute of Photonics and Electronics, Prague	Rép.e Tchèque
Bisphénol A	Huang et al.	2011	Food Control	University of Jinan College of Medicine and Life Sciences	Chine
Bisphénol A	Yin et al.	2011	Food Chemistry	Shandong Agricultural University College of Chemistry and Material Science	Chine
Bisphénol A	Ntsendwana et al.	2012	International Journal of Science	University of Johannesburg Department of Chemical Technology	Inde
Bisphénol A	Xu et al.	2012	Biosensors and Bioelectronics	Jiangnan University School of Food Science & Technology, State Key Laboratory of Food Science & Technology	Chine
Bisphénol A	Lu et al.	2013	Electroanalysis	Tongji University Department of Chemistry	Chine
Bisphénol A	Xue et al.	2013	Microchemica Acta	Hefei University of Technology School of Biotechnology and Food Engineering,	Chine
Bisphénol A	Rather et De Wael	2013	Sensors and Actuators B	University of Antwerp Department of Chemistry	Belgique
Bisphénol A	Mei et al.	2013	Biosensors and Bioelectronics	Hefei University of Technology School of Biotechnology & Food Engineering, Key Lab of Food Nutrition & Safety of Anhui Province	Chine
Bisphénol A 2-Anthramine	Lucarelli et al.	2002	Bioelectrochemistry	Università degli Studi di Firenze Dipartimento di Chimica-Polo Scientifico	Italie
Bisphénol A 4-pentylphénol 4-octylphénol 4-nonylphénol	Noh et al.	2010	Electrophoresis	Department of Chemistry, Pusan National University, Busan, Republic of Korea	Corée du Sud
Bisphénol A Nonylphénol Ethinylestradiol	Liu et al.	2011	Analytica Chimica Acta	Henan University Institute of Environmental and Analytical Sciences, College of Chemistry and Chemical Engineering	Chine
Chlorfenvinphos	Istamboulie et al.	2007	Biosensors and Bioelectronics	Université de Perpignan Via Domitia Centre de Phytopharmacie, BIOMEM	France
Chlorfenvinphos	Kesik et al.	2014	Sensors and Actuators B : Chemical	Middle East Technical University Department of Chemistry	Turquie

Molécules analysées	Auteurs	Année	Journal	Organisme principal	Pays
Chlorpyrifos	Viswanathan et al.	2009	Biosensors and Bioelectronics	Institute of Animal Reproduction and Food Research, Polish Academy of Sciences	Pologne
Chlorpyrifos	Chauhan et al.	2011	International Journal of Biological Macromolecules	M.D. University Department of Biochemistry	Inde
Chlorpyrifos	Sun et al.	2012	Sensors	Shandong University of Technology School of Agriculture and Food Engineering	Chine
Chlorpyrifos	Sun et al.	2013	Bioprocess Biosyst Eng	Shandong University of Technology School of Agriculture and Food Engineering	Chine
Chlorpyrifos	Zhai et al.	2013	Biosensors and Bioelectronics	Shandong University of Technology School of Agriculture and Food Engineering	Chine
Chlorpyrifos	Zhai et al.	2014	Enzyme and Microbial Technology	Shandong University of Technology School of Agriculture and Food Engineering	Chine
Chlorpyrifos	Sreedhar et al.	2015	Sensors and Actuators B: Chemical	Sri Venkateswara University Electroanalytical Lab, Department of Chemistry	Inde
DEHP	Zia et al.	2013	Journal of Food Engineering	Massey University School of Engineering and Advanced Technology	Nouvelle-Zélande
DEHP	Zia et al.	2013	Ieee International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2mtc) Proceedings	Massey University School of Engineering and Advanced Technology	Nouvelle-Zélande
DEHP	Zia et al.	2014	Ieee International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2mtc) Proceedings	Massey University School of Engineering and Advanced Technology	Nouvelle-Zélande
DEHP, phtalates	Zia et al.	2014	Biosensors and Bioelectronics	Massey University School of Engineering and Advanced Technology	Nouvelle-Zélande
Diuron	Sharma et al.	2011	Biosensors and Bioelectronics	Institute of Microbial Technology, Chandigarh	Inde
Diuron Paraoxon-methyl Parathion-methyl Triazine	Tekaya et al.	2013	Environmental Pollution	University of Lyon Institut des Sciences Analytiques, UMR CNRS 5280	France
Endosulfan	Liu et al.	2012	Analytical Chemistry	Key Laboratory of Pesticide and Chemical Biology of Ministry of Education, Wuhan	Chine
HAP	Lin et al.	2007	Electrochemistry Communications	University of Idaho Department of Chemistry	USA
Hexachlorobenzene	Wu et al.	2011	Biosensors and Bioelectronics	Dalian Institute of Chemical Physics, Dalian	Chine
Isoproturon	Manisankar et al.	2005	Applied Clay Science	Periyar University Department of Chemistry	Inde
Isoproturon et dicofol	Manisankar et al.	2008	Talanta	Alagappa University Department of Industrial Chemistry	Inde
Lindane	Anu Prathap et al.	2012	Analytical Chemistry	Bhabha Atomic Research Center, Maharashtra	Inde
Lindane	Anirudhan	2015	Biosensors and Bioelectronics	University of Kerala Department of Chemistry, School of Physical and Mathematical Sciences	Inde
Naphtalène	Zhang et al.	2013	Analytical Methods	Henan University of Urban Construction Department of Municipal and Environmental Engineering	Chine
Phenanthrène Anhracène	Liu et al.	2014	Analytica Chimica Acta	Universities of Shandong Key Laboratory of Chemical Sensing and Analysis	Chine
Trifluraline	Mirabi-Semnakolaii et al.	2010	J Solid State Electrochem	Islamic Azad University Faculty of Science, Qaemshahr Branch	Iran
PCB 101	Shi et al.	2016	Biosensors and Bioelectronics	Tongji University Department of Chemistry	Chine
Ag (I)	Firooz et al.	2013	Sensors and Actuators	University of Isfahan Department of Chemistry	Iran
Ag (I)	Azhari et al.	2016	Analytical methods	Universiti Teknologi Malaysia Department of Chemistry, Faculty of Science	Malaisie
Ag (I)	Li et al.	2016	Sensors and Actuators	Universiti Teknologi Malaysia Department of Chemistry, Faculty of Science	Malaisie
Al (III)	Zhu et al.	2016	Tetrahedron Letters	Nantong University School of Chemistry and Chemical Engineering	Chine

Molécules analysées	Auteurs	Année	Journal	Organisme principal	Pays
As (III)	Touilloux et al.	2015	Analyst	University of Geneva Department of Inorganic and Analytical Chemistry	Suisse
As (III)	Mafa et al.	2016	Electroanalysis	University of Johannesburg Department of Applied Chemistry	Afrique du Sud
As (III)	Yang et al.	2016	Sensors and Actuators B: Chemical	Chinese Academy of Sciences Institute of Intelligent Machines	Chine
As (III)	Yang et al.	2017	Sensors and Actuators B: Chemical	Chinese Academy of Sciences Institute of Intelligent Machines	Chine
Bi (III)	Tyszczyk-Rotko et al.	2016	Electrochimica Acta	Maria Curie-Skłodowska University Faculty of Chemistry, Department of Analytical Chemistry and Instrumental Analysis	Pologne
Cd (II)	Xu et al.	2014	Journal of The Electrochemical Society	University of Shanghai for Science and Technology	Chine
Cd (II)	Mirzaei et Piliy	2015	Journal of Analytical Chemistry	Shahid Bahonar University of Kerman Department of Chemistry	Iran
Cd (II)	Mehta et al.	2015	Sensors and Actuators B: Chemical	S. V. National Institute of Technology Department of Applied Chemistry	Inde
Cd (II)	Sakthivel et al.	2017	Journal of Fluorescence	University College of Engineering Department of Chemistry	Inde
Cd (II) et Pb (II)	Promphet et al.	2015	Sensors and Actuators B: Chemical	Chulalongkorn University Petrochemical and Polymer Science, Faculty of Science	Thaïlande
Cd (II) et Pb (II)	Vu et al.	2015	Ionic	Vietnam Academy of Science and Technology Institute for Tropical Technology	Viêt Nam
Cd (II) et Pb (II)	Saeed et al.	2016	Electroanalysis	Institute of Technology Tallaght (ITT Dublin) Centre for Research in Electroanalytical Technologies (CREATE)	Irlande
Cd (II), Pb (II) et Ni (II)	Niu et al.	2015	Electrochimica Acta	ICMAB (CSIC) Institut de Ciència de Materials de Barcelona	Espagne
Co (II) et Ni (II)	Bobrowski et al.	2014	Sensors and Actuators B: Chemical	AGH University of Science and Technology Department of Building Materials Technology, Faculty of Materials Science and Ceramics	Pologne
Cr (III)	Li et al.	2014	Analytica Chimica Acta	Xiangtan University Key Laboratory of Environmentally Friendly Chemistry and Applications of Ministry of Education, College of Chemistry	Chine
Cr (III)	Ly et al.	2015	Sensors and Actuators B: Chemical	Soongsil University Department of Chemistry	Corée du Sud
Cr (VI)	Chen et al.	2015	Electrochimica Acta	Fuzhou University MOE Key Laboratory of Analysis and Detection Technology for Food Safety, Fujian Provincial Key Laboratory of Analysis and Detection Technology for Food Safety, and Department of Chemistry	Chine
Cr (VI)	Guo et al.	2016	Analytical Methods	Chongqing University Key Laboratory of Biorheology Science and Technology, Ministry of Education, College of Bioengineering	Chine
Cr (VI)	Siavash Moakhar et al.	2017	Applied Catalysis B: Environmental	Sharif University of Technology Department of Materials Science and Engineering	Iran
Cr et Cr (VI)	Wang et al.	2017	Journal of Electroanalytical Chemistry	Chinese Academy of Inspection and Quarantine	Chine
Cu (II)	Cantalapiedra et al.	2015	Talanta	Universidad Autónoma de Madrid Department of Analytical Chemistry and Instrumental Analysis, Faculty of Sciences	Espagne
Cu (II)	Heidarimoghaddam et al.	2015	Journal of Water Supply: Research and Technology	Hamedan University of Medical Sciences Department of Ergonomics and Research Center for Health Sciences	Iran
Cu (II)	Izadkhah et al.	2015	Journal of Industrial and Engineering Chemistry	Islamic Azad University Department of Chemistry, Hamedan Branch	Iran
Cu (II)	Ali et al.	2016	Chemical Engineering Communications	Petroleum Research Institute (EPRI) Department of Analysis & Evaluation	Egypte
Cu (II)	Yang et al.	2016	Sensors and Actuators B: Chemical	Nanjing Forestry University Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China	Chine
Cu (II)	Ding et al.	2016	Biosensors and Bioelectronics	Soochow University College of Chemistry, Chemical Engineering and Material Science	Chine
Cu (II)	Ly et al.	2016	Sensors	Soongsil University Department of Chemistry	Corée du Sud
Cu (II)	Qi et al.	2017	International Journal of	Jiangsu University	Chine

Molécules analysées	Auteurs	Année	Journal	Organisme principal	Pays
Cu (II)	Zhu et al.	2017	International Journal of Analytical Chemistry	Beijing Normal University College of Water Sciences	Chine
Cu (II)	Yang et al.	2017	Analytical methods	Hunan Normal University Key Laboratory of Chemical Biology and Traditional Chinese Medicine Research, Ministry of Education China, College of Chemistry and Chemical Engineering	Chine
Fe (II)	Jia et al.	2016	Colloids and Surfaces A: Physicochemical and	Beijing Normal University Key Laboratory of Radiopharmaceuticals, Ministry of Education, College of Chemistry	Chine
Fe (III)	Shamsipur et al.	2013	Analytica Chimica Acta	Razi University Department of Chemistry	Iran
Hg (II)	Zhang et al.	2013	ACS Nano	Tohoku University WPI Advanced Institute for Materials Research	Japon
Hg (II)	Zhang et al.	2014	RCS Advances	Hunan University College of Environmental Science and Engineering	Chine
Hg (II)	Soomro et al.	2014	Talanta	University of Sindh National Centre of Excellence in Analytical Chemistry	Pakistan
Hg (II)	Wei et al.	2014	ACS Nano	University of California Electrical Engineering Department	USA
Hg (II)	Kang et al.	2014	Microchim Acta	East China University of Science and Technology Shanghai Key Laboratory of Functional Materials Chemistry, and Research Centre of Analysis and Test	Chine
Hg (II)	Gan et al.	2015	Analyst	Dalian University of Technology School of Environmental and Biological Science and Technology	Chine
Hg (II)	Liao et al.	2015	Sensors and Actuators B	Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Chemistry of Northwestern Plant Resources of CAS and Key Laboratory for Natural Medicine of Gansu Province, Lanzhou institute of Chemical Physics	Chine
Hg (II)	Sun et al.	2015	Analytical Chemistry	Soochow University Institute of Functional Nano and Soft Materials (FUNSOM) and Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology	Chine
Hg (II)	Wu et al.	2016	Biosensors and Bioelectronics	University of Jinan Key Laboratory of Chemical Sensing & Analysis in Universities of Shandong, School of Chemistry and Chemical Engineering	Chine
Hg (II)	Cinti et al.	2016	Environ Sci Pollut Res	Università di Roma Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche	Italie
Hg (II)	Shan et al.	2016	RCS Advances	South China Normal University Guangzhou Key Laboratory of Analytical Chemistry for Biomedicine, School of Chemistry & Environment	Chine
Hg (II)	Park et al.	2016	Journal of Hazardous Materials	Gwangju Institute of Science and Technology (GIST) Department of Chemistry, School of Physics and Chemistry	Corée du Sud
Hg (II)	Lai et al.	2016	RCS Advances	Hunan University College of Environmental Science and Engineering	Chine
Hg (II)	Tan et al.	2016	Sensors and Actuators B: Chemical	Capital Normal University Department of Chemistry	Chine
Hg (II), As (III), Pb (II) et Cd (II)	Gumpu et al.	2017	Talanta	SASTRA University Nano Sensors Lab @ Centre for Nanotechnology & Advanced Biomaterials (CeNTAB)	Inde
métaux : Ag (I), Hg (II), Cr (III), Sn (IV), Cd (II), Cu (II), Pb (II), Zn (II), Mn (II)	Tan et al.	2016	Biosensors and Bioelectronics	Capital Normal University Department of Chemistry	Chine
Ni (II)	Li et al.	2017	Sensors and Actuators B: Chemical	Chongqing University Key Laboratory of Biorheology Science and Technology, Ministry of Education, College of Bioengineering	Chine
Ni (II)	Li et al.	2017	Sensors and Actuators	Chongqing University Key Laboratory of Biorheology Science and Technology, Ministry of Education, College of Bioengineering	Chine
Ni (II) et Ba (II)	Shrivras et al.	2017	Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular	Guru Ghasidas Vishwavidyalaya Department of Chemistry	Inde
Pb (II)	Ly and Joo	2015	Applied Surface Science	Soongsil University Department of Chemistry	Corée du Sud
Pb (II)	Gao et al.	2016	Biosensors and Bioelectronics	Minnan Normal University College of Chemistry and Environment, Fujian Province Key Laboratory of Modern Analytical Science and Separation Technology	Chine

Molécules analysées	Auteurs	Année	Journal	Organisme principal	Pays
Pb (II)	Zhang et al.	2016	Biosensors and Bioelectronics	Hunan University College of Environmental Science and Engineering	Chine
Pb (II)	Yun et al.	2016	Biosensors and Bioelectronics	Science and Technology on Surface Physics and Chemistry Laboratory	Chine
Pb (II) et Hg (II)	Sedghi et al.	2015	Journal of Hazardous Materials	Shahid Beheshti University Department of Polymer, Faculty of Chemistry	Iran
Pb (II) et Hg (II)	Shoub et al.	2017	Sensors and materials	Universiti Putra Malaysia Department of Chemistry	Malaisie
Se (IV)	Wang et Shan	2016	Journal of Analytical Chemistry	Chia Nan University of Pharmacy and Science Department of Medical Chemistry	Taiwan
alcalinité, pH	Crespo et al.	2012	Analytical Chemistry	University of Geneva Department of Inorganic and Analytical Chemistry	Suisse
alcalinité, pH	Afshar et al.	2014	Analytical Chemistry	University of Geneva Department of Inorganic and Analytical Chemistry	Suisse
ammonium	Tan et al.	2012	Sensors and Actuators	Universiti Malaysia Pahang Industrial Chemistry Programme, Faculty of Industrial Sciences & Technology	Malaisie
ammonium	Kosaki et al.	2012	Journal of Nanoscience and Nanotechnology	Keio University Graduate School of Science and Technology	Japon
ammonium	Saiapina et al.	2016	Nanoscale Research Letters	Laboratory of Biomolecular Electronics, Institute of Molecular Biology and Genetics of National Academy of Sciences of Ukraine	Ukraine
calcium	Dorokhin et al.	2014	Analyst	University of Geneva Department of Inorganic and Analytical Chemistry	Suisse
calcium et dureté de l'eau	Nanda et al.	2007	Indian Journal of Chemistry Section a-Inorganic Bio-Inorganic Physical Theoretical & Analytical Chemistry	Raja Ramanna Centre for Advanced Technology (RRCAT) Department of Atomic Energy	Inde
carbonate	Jarolímová et al.	2014	Analytical Chemistry	University of Geneva Department of Inorganic and Analytical Chemistry	Suisse
carbonate	Jansod et al.	2016	Analytical Chemistry	University of Geneva Department of Inorganic and Analytical Chemistry	Suisse
DBO	Zhang et Angelidaki	2011	Biotechnology and Bioengineering	Technical University of Denmark Department of Environmental Engineering	Danemark
DBO	Modin et Wilen	2012	Water Research	Chalmers University of Technology Division of Water Environment Technology, Department of Civil and Environmental Engineering	Suède
DBO	Hussin et al.	2012	Jurnal Teknologi	Universiti Teknologi Malaysia Department of Biological Sciences, Faculty of Biosciences and Bioengineering	Malaisie
DBO	Tian et al.	2014	Chinese Journal of Environmental Engineering	Beijing Forestry University College of Environmental Science and Engineering	Chine
DBO	Hooi et al.	2015	Electrochimica Acta	Universiti Teknologi Malaysia Fac Biosci & Med Engr, Dept Biosci & Hlth Sci	Malaisie
DBO	Commault et al.	2016	Biochemical Engineering Journal	Lincoln University Lincoln Agritech Ltd., Engineering Drive	Nouvelle-Zélande
DBO	Kharkwal et al.	2017	International Journal of Molecular Sciences	National University of Singapore Centre for Water Research, Department of Civil & Environmental Engineering	Singapour
DBO	Zhao et al.	2017	Enzyme and Microbial Technology	Sichuan Agricultural University College of Food Science	Chine
DCO	Ma et al.	2011	Sensors and Actuators B: Chemical	Dalian University of Technology Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering, Ministry of Education, School of Environmental Science and Technology	Chine
DCO	Yang et al.	2011	Sensors and Actuators	Huazhong University of Science and Technology School of Chemistry and Chemical Engineering	Chine
DCO	Bogdanowicz et al.	2012	Proc. Eurosensors XXVI, September 9-12, 2012, Kraków, Poland	Gdansk University of Technology Department of Metrology and Optoelectronics	Pologne
DCO	Wang et al.	2012	Res Chem Intermed	Shanghai Jiao Tong University School of Environmental Science and Engineering	Chine
DCO	Yuan et al.	2012	Electrochimica Acta	Donghua University State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, MOE	Chine
DCO	Chen et al.	2012	Analytical Methods	Shanghai Jiao Tong University School of Environmental Science and Engineering	Chine

Molécules analysées	Auteurs	Année	Journal	Organisme principal	Pays
DCO	Li et al.	2014	Sensors (Switzerland)	Shanghai Jiao Tong University School of Environmental Science and Engineering	Chine
DCO	Mo et al.	2016	J Solid State Electrochem	University of Chemical Technology National Fundamental Research Laboratory of New Hazardous, Chemicals, Institute of Electrochemical Engineering	Chine
DCO	Ruslan et al.	2016	International Journal of Applied Chemistry	Tadulako University Departement of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences	Indonésie
DCO glucose	Wang et al.	2015	Microchim Acta	Huazhong University of Science and Technology MOE Key Lab of Environment and Health, School of Public Health, Tongji Medical College	Chine
nitrate	Sohail et al.	2012	Analytica Chimica Acta	University of the Sunshine Coast Faculty of Science, Health, Education and Engineering	Australie
nitrate	Alahi et al.	2016	Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference	Massey University School of Engineering and Advanced Technology	Nouvelle-Zélande
nitrite	Ye et al.	2011	Analyst	Shanghai University Department of Chemistry	Chine
nitrite	Wu et al.	2014	Analytical Chemistry	Sun Yat-Sen University School of Chemistry and Chemical Engineering	Chine
nitrite	Néel et al.	2014	electroanalysis	University of Geneva Department of Inorganic and Analytical Chemistry	Suisse
nitrite	Kumar et Anthony	2014	Analytica Chimica Acta	SASTRA University School of Chemical and Biotechnology	Inde
nitrite	Sahraoui et al.	2015	Electroanalysis	University of Lyon Institut des Sciences Analytiques, UMR CNRS 5280	France
nitrite	Xu et al.	2016	Microchimica Acta	Qingdao University of Science and Technology Key Laboratory of Sensor Analysis of Tumor Marker, Ministry of Education, College of Chemistry and Molecular Engineering	Chine
pH, carbonate, nitrate, calcium	Pankratova et al.	2015	Environmental Science: Processes and Impacts	University of Geneva Department of Inorganic and Analytical Chemistry	Suisse
S (-II)	Yan et al.	2016	Analytical Methods	Chengdu University of Technology College of Energy Resources	Chine