

## **Application des procédés électrochimiques d'oxydation avancée au traitement d'effluents industriels réels et intégration dans des filières de traitement**

Clément Trellu<sup>a</sup>, Nabil Mostefaoui<sup>a</sup>, Sié Alain Hien,<sup>a</sup> M àxim Gibert-Vilas<sup>a</sup>, Yoan Pechaud<sup>a</sup>, Nihal Oturan<sup>a</sup>, Mehmet A. Oturan<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Université Gustave Eiffel, Laboratoire Géomatériaux et Environnement, EA 4508, Cedex 2, Marne-la-Vallée 77454, France*  
*clement.trellu@univ-eiffel.fr*

Les procédés électrochimiques d'oxydation avancée tels que le procédé d'oxydation anodique ou le procédé électro-Fenton présentent un intérêt considérable vis à vis (i) de leur capacité à éliminer de manière non-sélective une large gamme de molécules organiques et (ii) de leur mise en place pouvant s'affranchir de l'utilisation de réactifs chimiques. Cependant, leur application est également limitée en raison (i) de la consommation énergétique élevée pour atteindre des rendements importants de minéralisation, (ii) de la formation de sous-produits indésirables, notamment en raison de l'oxydation des ions chlorures et (iii) de la baisse des rendements faradiques pour l'application à des effluents faiblement concentrés.

Dans le cadre de cette étude, les procédés d'oxydation anodique et électro-Fenton ont été appliqués au traitement de deux effluents industriels concentrés en polluants organiques (lixiviats de décharges, industrie textile) (1-2). L'évolution de la qualité de l'eau traitée a été suivie en mesurant différents paramètres liés à la matrice organique dissoute (COT, DCO spectrophotométrie, spectroscopie de fluorescence 3D), aux matières en suspension (turbidité, DCO particulaire) et à la matrice inorganique (formation de sous-produits indésirables tels que les chlorates et les perchlorates), afin d'identifier les avantages et les inconvénients de ces procédés émergents. L'optimisation des conditions opératoires ainsi que l'intégration de ces procédés dans des filières de traitement ont ensuite été étudiées comme solutions potentielles pour pallier leurs limites. La combinaison avec d'autres procédés plus conventionnels (traitement biologique, coagulation, filtration) a pour objectif principal de pouvoir axer l'utilisation des procédés électrochimiques uniquement sur les étapes de traitement qui ne peuvent pas être réalisées par les procédés plus conventionnels.

Les résultats obtenus permettent ainsi de mieux appréhender l'intégration de ces procédés pour l'élimination de polluants organiques récalcitrants au sein de matrices complexes. Au-delà de potentielles applications à court terme, ils participent aussi à bien identifier les enjeux de recherche associés au développement de ces procédés pour le traitement de l'eau.

### **References**

- (1) Nabil Mostefaoui, Nihal Oturan, Souad Chergui Bouafia, Sié Alain Hien, M àxim Gibert-Vilas, Geoffroy Lesage, Yoan Pechaud, Bruno Tassin, Mehmet Oturan, Clément Trellu, *Science of The Total Environment*, **2024**, 912, 168841.
- (2) Sié Alain Hien, Clément Trellu, Nihal Oturan, Alain Stéphane Assémian, Bi Gouessé Henri Briton, Patrick Drogui, Kopoin Adouby, Mehmet A Oturan, *Journal of Hazardous Materials*, **2022**, 437, 129326.

## Extraction de lanthanides dans les milieux de chlorures fondus

Gabriela Durán Klie,<sup>a</sup> Sylvie Delpéch,<sup>a</sup> Céline Cannes,<sup>a</sup> et Davide Rodrigues,<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Université Paris-Saclay, CNRS/IN2P3, IJCLab, 15 rue Georges Clemenceau, Orsay 91404, France*  
[duran-klie@ijclab.in2p3.fr](mailto:duran-klie@ijclab.in2p3.fr)

En France, l'utilisation du combustible MOX (mélange d'oxydes de Pu et U) dans la filière nucléaire française permet de recycler et valoriser l'uranium et le plutonium récupérés du combustible d'uranium naturel enrichi (UNE) usé. Cependant, les assemblages MOX usés ne sont pas retraités, ils sont entreposés dans les piscines de La Hague, en attente d'un traitement ultérieur. Le projet Européen MIMOSA (Multi-recycling strategies of LWR SNF focusing on Molten Salt technology) démarré en Juin 2022, concerne le développement d'une filière nucléaire de quatrième génération, basée sur l'utilisation de réacteurs à chlorures fondus à spectre neutronique rapide. Cette nouvelle technologie permettra de recycler le combustible MOX usé dans les actuelles et futures filières nucléaires et d'optimiser la gestion des déchets nucléaires.

Dans ce cadre, notre travail est consacré à la séparation des lanthanides et actinides mineurs (AM) par traitement pyrochimique du combustible usé. L'objectif est, après séparation, de remettre les actinides mineurs dans le cœur du réacteur pour les brûler, et transférer les lanthanides à La Hague pour les conditionner. Cette gestion du cycle du combustible nucléaire doit permettre de réduire le volume de déchets hautement radioactifs. L'extraction des lanthanides a ainsi été étudiée dans le sel NaCl-MgCl<sub>2</sub> eutectique à 550 °C sur une nappe métallique de bismuth liquide et une électrode solide d'aluminium. Le comportement électrochimique de CeCl<sub>3</sub> et NdCl<sub>3</sub> (lanthanides d'intérêt produits dans le réacteur) a été étudié dans le sel NaCl-MgCl<sub>2</sub> à 550°C à une électrode de tungstène, de bismuth liquide et d'aluminium. L'extraction de Ce et Nd a été réalisée par électrolyses à potentiel imposé. Les analyses ICP ont permis de déterminer leur efficacité d'extraction du milieu fondu. L'analyse de la nappe de bismuth a montré une co-extraction des deux lanthanides avec du magnésium alors que l'électrode solide a permis de réaliser une extraction sélective vis-à-vis du magnésium. L'efficacité d'extraction du cérium dans la nappe de Bi est proche de 60%, alors que celle du néodyme est inférieure à 15%. Néanmoins, l'efficacité d'extraction du cérium est augmentée jusqu'à 90% et celle du néodyme jusqu'à environ 35% sur l'électrode solide d'aluminium. L'utilisation d'autres métaux liquides pour l'extraction des lanthanides est en cours d'étude.

## Procédé innovant de Dépollution d'eaux chargées en métaux lourds & Valorisation des déchets obtenus : Exemple du plomb

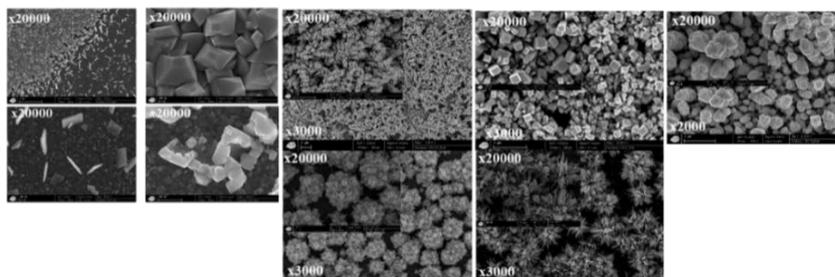
Rana Choumane,<sup>a</sup> Sophie Peulon,<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Université Paris-Saclay, CNRS, Gif-sur-Yvette, France

<sup>b</sup> UMR 3685 NIMBE (CEA/CNRS) CEA Saclay Bâtiment 522, Gif-sur-Yvette, France

Email : [sophie.peulon@cnrs.fr](mailto:sophie.peulon@cnrs.fr) // [sophie.peulon-page@cea.fr](mailto:sophie.peulon-page@cea.fr)

L'eau, une ressource indispensable à la vie, est en grande tension du fait du changement climatique et d'une pollution croissante liée aux activités anthropiques intenses. Parmi les très nombreux polluants, les métaux lourds sont particulièrement problématiques du fait de leur toxicité, de leur absence de (bio)dégradation et de ce fait leur accumulation dans l'environnement, avec des conséquences importantes pour la santé humaine. C'est dans ce contexte que nous développons depuis de nombreuses années des procédés de dépollution, notamment vis-à-vis des métaux lourds (1-3). Un de ces procédés est basé sur l'idée originale de les éliminer sous forme de films minces adhérents (non métalliques) au moyen de réactions électrochimiques classiques (2,3). Cette stratégie brevetée est très efficace pour plusieurs métaux toxiques, et ce même dans des milieux complexes. Ainsi par exemple, le plomb peut être éliminé jusqu'à 99,99 %, permettant d'atteindre directement des concentrations acceptables pour l'environnement, et proches de celles fixées pour l'eau potable par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). De plus, les conditions opératoires sont très simples, avec des besoins énergétiques réduits, sans ajout de réactifs toxiques, sans production de déchets, mis à part les films minces facilement récupérés (2,3). Enfin, ces matériaux possèdent des nanostructures tout à fait originales et potentiellement intéressantes pour des applications variées. Par exemple, les matériaux à base de plomb présentent des propriétés d'(électro)dégradation extrêmement élevées vis-vis de polluants organiques comme le glyphosate (pesticide), conduisant ainsi à sa minéralisation totale sans production de son principal produit de dégradation (AMPA), plus toxique et plus persistant (4). En conclusion, ce procédé de dépollution s'avère donc très prometteur, à la fois pour éliminer les métaux lourds, mais également pour envisager une valorisation pertinente des matériaux récupérés.



### Références

- (1) Choumane R.; Peulon, S. *Coll. Surf. A* **2019**, 577, 594.
- (2) Choumane R.; Peulon, S. *Chem. Eng. J.* **2021**, 423, 130161.
- (3) Choumane R.; Peulon, S., *J. Environ. Chem. Eng.* **2022**, 10(6), 108607.
- (4) Choumane R.; Peulon, *J. Water Process Eng.* **2023**, 54, 103900.

## Évaluation d'un procédé hybride couplant l'ozonation et l'oxydation anodique dans une configuration monophasique.

Hélios Yasmine<sup>a</sup>, Fares Zouaoui<sup>a</sup>, Pierre-François Biard<sup>a</sup>, Florence Fourcade<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Univ Rennes, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes, Institut des Sciences Chimiques de Rennes (ISCR) – UMR6226, Equipe Chimie et Ingénierie des Procédés (CIP), Rennes France*  
*helios.yasmine@enscr-rennes.fr*

Dans le cadre de cette étude prospective, un procédé hybride combinant l'ozonation et l'oxydation anodique (OA/O3) a été mis en œuvre pour traiter une solution modèle d'alachlore à 30 ppm. L'ozonation est un procédé mûre, utilisé dans le traitement de l'eau potable et de plus en plus étudié pour le traitement des eaux usées. Il est considéré comme un procédé d'oxydation avancée dans le traitement des eaux usées, notamment en milieu basique, en raison de la décomposition rapide de l'ozone dans ces conditions, concomitante avec la formation de radicaux, notamment les radicaux hydroxyles, HO•, très réactifs et assez peu sélectifs. Cependant à pH acide, les cinétiques de décomposition rapides sont souvent plus lentes, impactant défavorablement la vitesse de dégradation de la pollution organique. La combinaison de ce procédé avec un procédé d'oxydation anodique pourrait favoriser l'efficacité du traitement de la pollution notamment en favorisant la décomposition de l'ozone par les radicaux formés à l'anode et par les anions hydroxyle, pouvant initier la décomposition de l'ozone, formés à la cathode. A cette fin, des électrolyses ont été menées en milieu monophasique avec une eau ozonée pour traiter une solution modèle d'alachlore à 30 ppm à pH acide. A pH 5, la dégradation de l'alachlore par ozonation n'est pas totale (50 à 60% en 35 min) en raison de la faible concentration d'ozone introduite dans le réacteur (de 1,9 à 2,3 moles d'ozone par mole d'alachlore) et la minéralisation de l'alachlore n'a pas été observée. Par la suite, le traitement de l'alachlore a été examiné par oxydation anodique avec des électrodes en diamant dopée au bore (BDD). Sa dégradation est quasi-totale en 150 minutes, quelle que soit la densité du courant appliquée (6.1, 15.2 et 24.2 mA cm<sup>-2</sup>). L'efficacité de la minéralisation variait de 50 % à 6.1mA cm<sup>-2</sup> à 80 % à 24.2 mA cm<sup>-2</sup> après 120 minutes de traitement. L'ajout d'ozone durant les électrolyses a permis de réduire le temps de demi-vie de l'ozone de 2,7 fois. La consommation plus rapide d'ozone s'accompagnait d'une augmentation du taux de dégradation de l'alachlore, avec un temps de demi-vie environ deux fois plus court par rapport à l'oxydation anodique seule. Cependant, en raison de la faible dose d'ozone utilisée et de la courte durée de vie de l'ozone en solution (environ 25 à 30 minutes), des efficacités de minéralisation similaires ont été observées pour les processus OA/O3 et OA. Ainsi, l'application de réinjections de solution mère d'ozone toutes les 20 minutes pour prolonger l'exposition à l'ozone a été envisagée pour surmonter cette limitation. L'effet sur le taux de minéralisation est cependant faible, même s'il a permis d'améliorer le taux de dégradation de la molécule mère d'alachlore. La faible influence du processus hybride sur le taux de minéralisation a été attribuée à la production de sous-produits du type acides gras aliphatiques peu réactifs avec les radicaux hydroxyles, dont la dégradation par l'OA constitue l'étape limitante.