

Chapitre II Application des méthodes électrochimiques au traitement d'effluents industriels

L'électrochimie étant basée sur le transfert d'électrons, cette technique peut être susceptible de s'appliquer à un nombre important de polluants tout en respectant l'objectif environnemental par le caractère « réactif propre » de l'électron. C'est dans ce contexte que la technologie électrochimique a été développée afin de pouvoir être appliquée au traitement d'effluents industriels.

Ce chapitre a pour objectif, grâce à la présentation de différents procédés électrochimiques appliqués au traitement de divers effluents industriels, de mettre en évidence la nécessité du développement de cette technologie, tant au niveau du design de la cellule et des électrodes que des matériaux disponibles, pour que la technique électrochimique puisse rentrer en compétition d'un point de vue économique avec d'autres procédés de traitement des effluents.

Plus précisément, nous présenterons des procédés électrochimiques de traitement d'effluents aqueux industriels contenant des polluants inorganiques, effluents pour lesquels l'électrochimie a montré ses compétences d'un point de vue industriel. Nous mettrons en évidence les avancées obtenues grâce aux développements technologiques réalisés pour les procédés suivants : récupération d'ions de métaux lourds de solutions diluées ; traitement de solutions contenant du Cr^{3+} , électrodialyse de solutions concentrées de sels ; dépollution d'effluents dans le domaine nucléaire.

II.1 Traitement par électrochimie d'effluents chargés en métaux lourds

Dans le cas de l'élimination d'ions métalliques, la littérature est très abondante vu qu'elle concerne une diversité importante de secteurs industriels (hydrométallurgie, traitement de surface, usine photographique, catalyseurs,...). Ces articles concernent des effluents industriels de composition chimique et de conductivité souvent très différentes.

L'électrochimie offre différentes approches pour éliminer les ions métalliques d'effluents industriels. Ces ions peuvent être réduits à la cathode et souvent récupérés sous leur forme la plus valorisable, un film ou une poudre métallique, qui peuvent directement être vendus ou recyclés dans le procédé.

L'électrochimie peut également être utilisée, par exemple, pour le traitement d'effluents contenant du Cr^{3+} , dans le but d'induire une précipitation du polluant sous forme d'hydroxyde, ou la régénération du flux par l'oxydation de ce polluant en Cr^{6+} . Elle peut aussi éliminer des polluants sous contrôle diffusionnel des ions à travers une membrane échangeuse d'ions.

II.1.1 Electrolyses directes de solutions diluées, chargées en métaux lourds

L'application des méthodes électrochimiques à la récupération d'ions métalliques d'effluents industriels dilués [II.1-11] a été rendue possible grâce aux développements de nouveaux designs de cellules d'électrolyses.

Les différents procédés décrits concernent essentiellement des effluents industriels dilués, contenant 1-1000 mg/l d'ions métalliques, et présentant pour certains une faible conductivité. Vu la faible

concentration de l'espèce à réduire, la cinétique de réaction sera contrôlée par le transfert de masse. Dans ces conditions, la vitesse maximale de réduction de l'ion métallique est donnée par le courant limite de diffusion (chapitre I) :

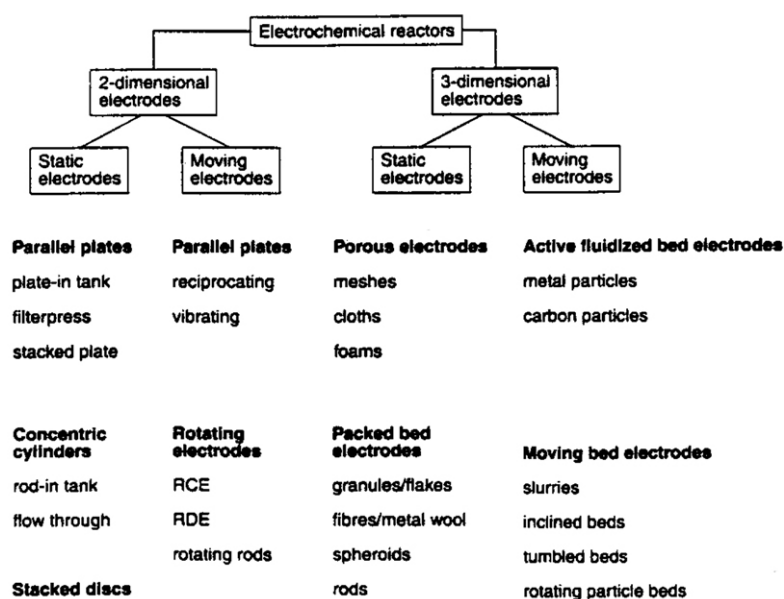
$$I_l = k_m \cdot A \cdot n \cdot F \cdot c^0 \quad [\text{II.1}]$$

où c^0 est la concentration de l'ion métallique au sein de l'effluent industriel. Pour un effluent industriel donné, donc une concentration en ion métallique imposée, l'efficacité de l'électrodéposition ne peut être augmentée que par un accroissement du coefficient de transfert, k_m , et de la surface d'électrode, A . A cette fin, différents modèles de cellules ont été développés.

La figure II.1 reprend une liste non exhaustive de différents types de cellules, classées selon la géométrie à deux ou trois dimensions de l'électrode et la nature du mouvement relatif de l'électrolyte et de l'électrode.

Parmi ces cellules, celles à électrodes bidimensionnelles (initialement utilisées) ne permettent pas d'atteindre des seuils résiduels de concentration en ions métalliques inférieurs aux limites légales actuelles sans induire une chute importante du rendement faradique. Pour satisfaire ces exigences, il faut en fait recourir, soit à un design permettant une amélioration du transfert de masse (Chemelec, RCE, Eco-cell), soit à l'utilisation d'électrodes tridimensionnelles ou à lit fluidisé (AKZO), spécifiquement conçues dans un souci de développer une surface spécifique d'électrode élevée et de favoriser ainsi les phénomènes de transfert de masse.

Figure II. 1 : Classification des réacteurs électrochimiques en fonction de leur design, du type d'électrodes utilisées et la nature du mouvement relatif de l'électrode et de l'électrolyte [II.6]



II.1.1.1 Cellules électrochimiques favorisant le transfert de masse

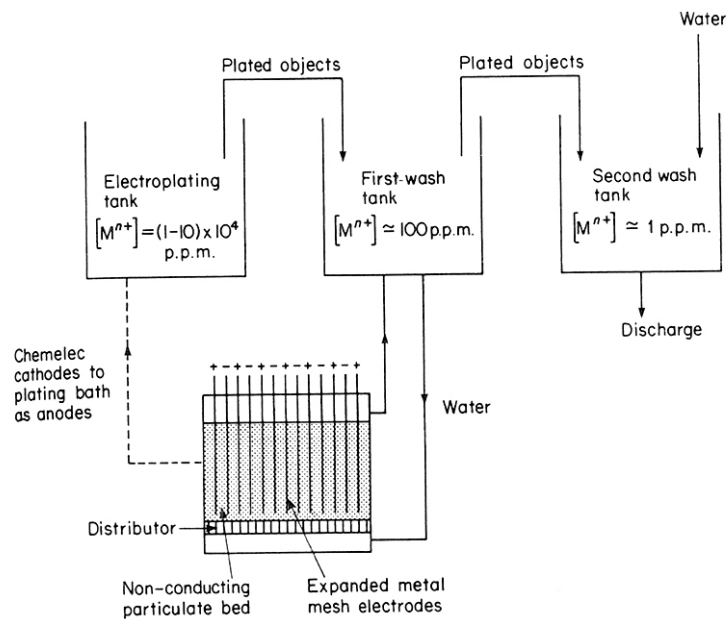
Nous décrirons ici, plus particulièrement, la cellule Chemelec et la cellule RCE à électrodes tournantes.

Chemelec cell, cellule à lit de particules inertes fluidisé

La cellule Chemelec, reprise à la figure II.2, utilise un lit fluidisé de particules non conductrices, des billes de verre, comme promoteur de turbulence pour améliorer le transfert de masse aux électrodes. Ces dernières consistent en une série d'électrodes en métal

déployé fort rapprochées, placées classiquement selon une alternance anode et cathode. Le temps de résidence et donc le degré de conversion par passage sont relativement faibles, étant donné que le débit de l'électrolyte doit atteindre une vitesse minimale assurant la fluidisation du lit de particules non conductrices. Il en découle que ces cellules ne permettent pas d'abaisser de façon rentable la teneur en métaux lourds des effluents en dessous de 50 mg/l.

Figure II. 2 : Cellule Chemelec utilisée dans une boucle de recyclage d'un bain de rinçage d'un procédé de galvanisation [II.4]



La cellule Chemelec est donc plus appropriée pour une étape de prétraitement ou pour une opération de recyclage ; elle est largement utilisée dans les industries de galvanoplastie afin de maintenir une concentration relativement faible en ions métalliques

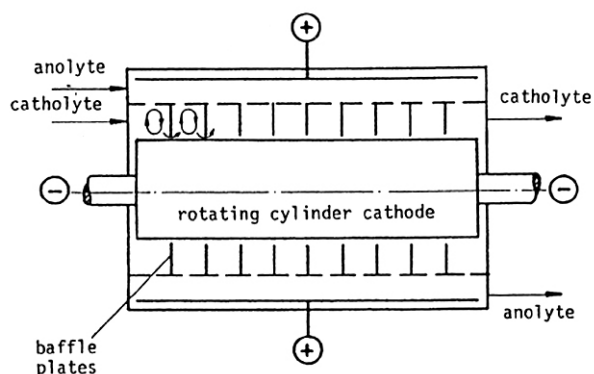
(Cu, Ni, Au, Ag, Zn, Cd, Pb) contenus dans les bains de rinçage (figure II.2).

Cellule à électrodes tournantes, RCE

Une autre configuration de cellule d'électrolyse permettant d'obtenir un coefficient de transfert de masse élevé est celle des cellules à électrodes cylindriques tournantes (RCE). Des vitesses de transport de masse élevées sont obtenues, dans ce cas, sous l'effet d'un régime turbulent. La vitesse de déposition des métaux est élevée, même pour de faibles concentrations en ions métalliques. Le métal réduit est bien souvent récupéré sous forme de scraps ou de poudre. La cellule de ce type la plus connue est la cellule ECO-cell, illustrée schématiquement à la figure II.3. Cette cellule est constituée d'une cathode sous forme d'un cylindre rotatif unique, la chambre cathodique étant subdivisée en segments par des cloisons. Cette configuration en cascade, permettant le passage successif de l'électrolyte dans tous les segments, a pour effet d'éliminer tout mélange à contre-courant, ce qui assure de hauts degrés de conversion ; par exemple, pour une concentration en Cu(II) à l'entrée de 100 ppm, il est possible d'obtenir une concentration de 2 ppm en sortie de la cellule.

La cellule ECO-cell est utilisée notamment pour récupérer l'argent d'effluents provenant de l'industrie photographique, le cadmium sélectivement vis-à-vis du zinc de solutions concentrées de sulfate de zinc, le cuivre d'effluents provenant de la fabrication de pigments à base de cuivre.

Figure II. 3 : Cellule d'électrolyse ECO-cell [II.4]

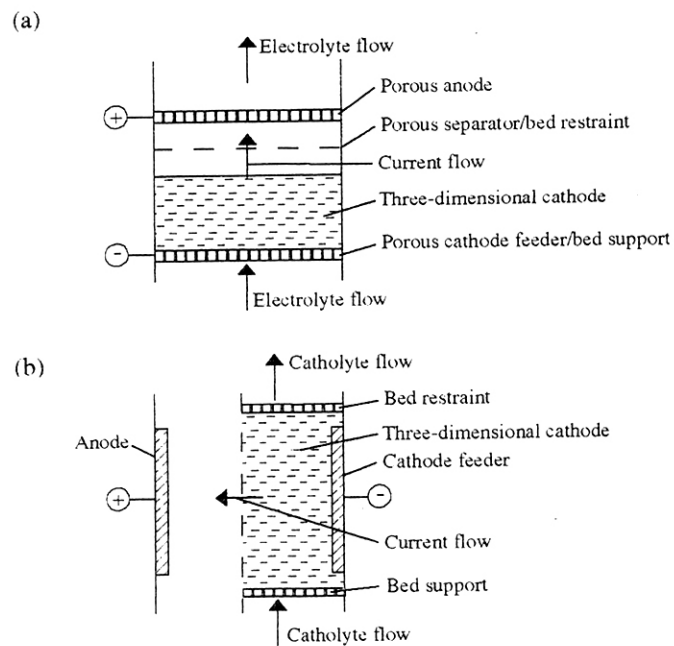


II.1.1.2 Cellules électrochimiques favorisant le transfert de masse et développant une surface spécifique d'électrode élevée

Les électrodes tridimensionnelles offrent, de par leur structure, une surface spécifique élevée et permettent par ailleurs, grâce au passage de l'électrolyte à travers leur porosité, d'obtenir des coefficients de transfert de masse élevés. De telles caractéristiques sont appropriées pour le traitement d'effluents pour lesquels il faut assurer l'élimination des ions métalliques à des concentrations proches ou inférieures au ppm, avec des rendements faradiques élevés.

Dans ces cellules, les directions des lignes de courant et de l'électrolyte peuvent être perpendiculaires (cellules de type « flow-by ») ou au contraire parallèles (cellules de type « flow-through »), comme l'illustre la figure II.4. Pour les applications techniques, cependant, l'arrangement « flow-by » est préféré car il permet notamment une meilleure distribution du courant dans la masse de l'électrode.

Figure II. 4 : Configuration des électrodes tridimensionnelles : a) flux de l'électrolyte parallèle au flux du courant ; b) flux de l'électrolyte perpendiculaire au flux du courant [II.1]



Les électrodes utilisées couvrent une large gamme de matériaux. Il s'agit soit :

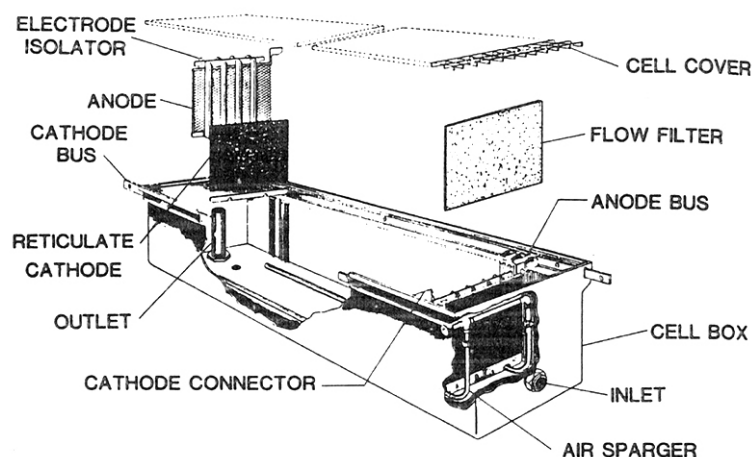
- de lits de très nombreuses particules, telles des petites sphères de plomb ou des granules de carbone, ou d'éléments entremêlés comme des fibres de carbone ou de la laine d'acier ;
- de matrices poreuses continues comme des matériaux réticulés, mousses de métaux, mousse de carbone, feutres.

- d'arrangements réguliers, en parallèle, de plusieurs électrodes bidimensionnelles telles des plaques perforées, des grilles et du métal déployé.

Parmi les différents designs de cellules électrochimiques utilisant des électrodes tridimensionnelles qui ont été commercialisés, nous en présenterons tout particulièrement quatre : les cellules RETEC, EnViro-cell, ElectroSyn et AKZO.

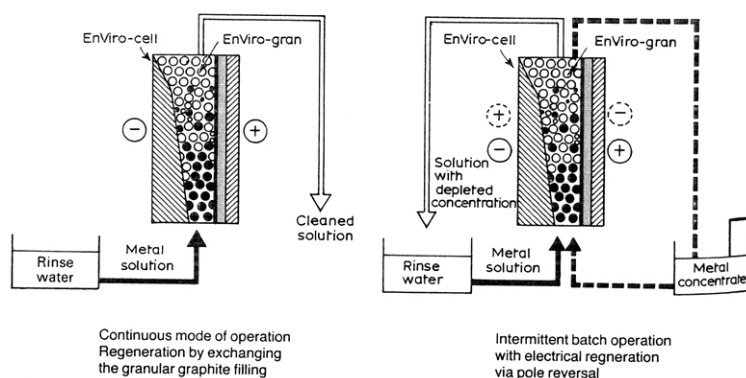
La cellule *RETEC* (*Eltech Systems Corp.*), schématisée à la figure II.5, est sans doute la cellule à électrodes tridimensionnelles ayant le plus simple design. En effet, ce dernier est similaire à celui d'une cellule ouverte, mais contenant une série de 5 à 60 électrodes tridimensionnelles réticulées (mousses de métal ou de carbone), chaque paire de cathodes étant séparée par une anode DSA-O₂, électrode de Ti/TiO₂-IrO₂ ou Ti-Ta₂O₅-IrO₂ présentant une faible surtension de dégagement de l'oxygène. L'électrolyte s'écoule perpendiculairement par rapport aux électrodes. Ce design permet de développer une grande surface cathodique. Néanmoins, le coefficient de transfert obtenu est relativement faible, même si de l'air est injecté dans la cellule afin d'améliorer les transferts de masse. Globalement, la cellule RETEC assure une efficacité similaire à celle de la cellule CHEMELEC. En pratique, la cellule RETEC est utilisée surtout pour maintenir des concentrations modérées en ions métalliques (cuivre, cadmium et zinc) dans des bains de rinçage de l'industrie des surfaces et récupérer les métaux précieux présents dans des solutions diluées.

Figure II. 5 : Cellule d'électrolyse RETEC [II.3]



Un deuxième type de cellule à électrodes tridimensionnelles est la *cellule EnViro-cell*, comprenant un lit de granules de carbone comme compartiment cathodique, profilé de telle manière que la surface de la cathode augmente vers la sortie de la cellule, figure II.6. Ce design particulier du compartiment cathodique assure une diminution de la densité de courant cathodique dans la direction du flux de l'électrolyte, ce qui permet d'obtenir une efficacité de courant telle qu'une conversion, en un seul passage de l'effluent dans la cellule d'électrolyse, permet de réduire la concentration en ions métalliques d'environ 80 ppm à 1 ppm. La cellule EnViro-cell est appliquée dans le traitement de solutions photographiques, de solutions de rinçage de procédés de traitement de surfaces, d'effluents d'usines fabriquant des batteries ou d'usines chimiques ; les métaux récupérés sont principalement le Pb, Cu, Cd, Hg, Au, Ag et Pd.

Figure II. 6 : Cellule d'électrolyse EnViro-cell [II.10]

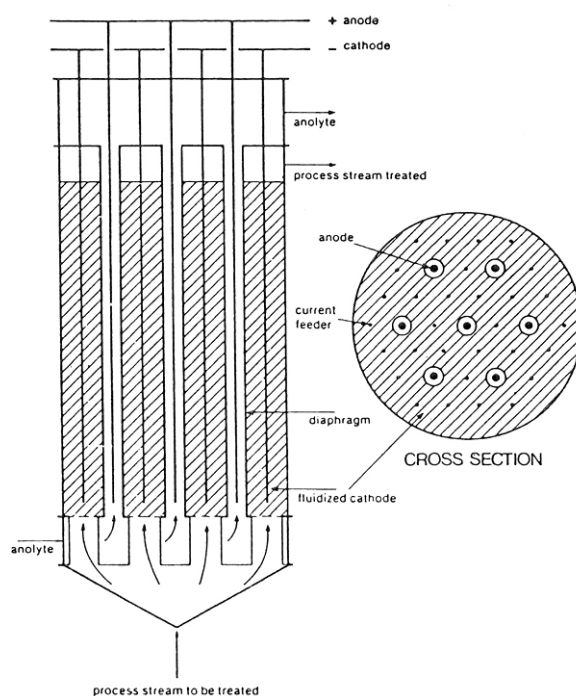


ElectroCell System AB a mis sur le marché une cellule de type *ElectroSyn* permettant d'inclure un lit de particules de carbone. Cette cellule d'électrolyse permet de réduire les concentrations en ions métalliques en dessous du ppm, avec une efficacité de courant raisonnable. Ce système est utilisé, par exemple, pour récupérer du cuivre et du zinc de solutions acides, du cuivre de solutions diluées contenant de l'EDTA et de l'argent de bains provenant du développement de films photographiques.

La cellule AKZO est une cellule d'électrolyse dont la cathode est un lit fluidisé de particules conductrices, c'est donc la cathode même qui est promoteur de turbulence. Une telle cathode, de surface spécifique très élevée et présentant en outre un régime turbulent important, permet le recours à de fortes densités de courant, ce qui assure une grande vitesse d'élimination des ions métalliques. La cellule AKZO, schématisée à la figure II.7, s'apparente à un échangeur de chaleur à faisceaux tubulaires, le lit de particules étant fluidisé autour des petits compartiments anodiques entourés de diaphragmes judicieusement répartis dans le volume de la colonne.

Cette cellule est utilisée pour la récupération du mercure à l'état d'amalgame par électrolyse et pour éliminer les ions cuivre et cadmium de solutions de zinc. Dans cette dernière application, le cuivre et le cadmium peuvent être récupérés jusqu'à des concentrations résiduelles respectives de 0.1 mg/l et 1 mg/l.

Figure II. 7 : La cellule d'électrolyse AKZO [II.3]



D'autres cellules à électrodes tridimensionnelles ont également été développées, telles : la cellule E.S.E cell de DuPont ayant pour cathode des treillis en inox, la cellule swiss-roll constituée d'un module cylindrique avec promoteur de turbulence et la cellule Porocell utilisant des cathodes en feutre de carbone.

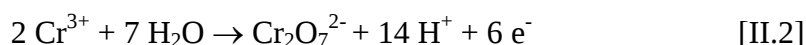
Par ailleurs, il est important de préciser que certaines des cellules décrites ci-dessus ont également été utilisées avec succès pour oxyder des cyanures, des chlorures, des colorants, de l'EDTA, ...

II.1.2 Traitement électrochimique d'effluents contenant du chrome

L'élimination du chrome d'effluents industriels ou la régénération d'effluents contenant du chrome est un autre domaine d'application de l'électrochimie [II.1-3,6-8,10,12]. Le chrome sous sa forme hexavalente, Cr(VI), est utilisé dans de nombreux secteurs industriels ; par exemple, pour la production du chlorate de sodium et en traitement de surface comme inhibiteur de corrosion ou pour le décapage de métaux ou plastiques.

Deux voies sont en général préconisées pour traiter les effluents issus de ces secteurs industriels et contenant du Cr(III) et du Cr(VI) : soit la réoxydation du chrome présent sous sa forme trivalente en Cr(VI) de manière à régénérer le flux lorsque ce dernier contient peu d'impuretés, soit la réduction des ions Cr(VI) en ions Cr(III) en milieu acide et sa précipitation sous forme de Cr(OH)₃ après neutralisation.

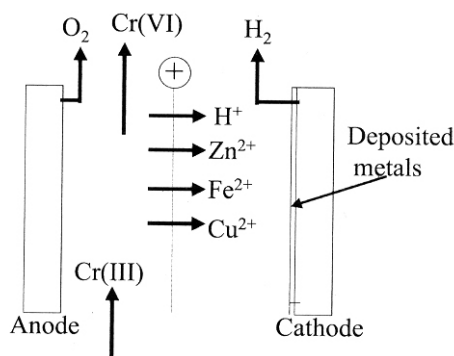
Lors du traitement de surface de métaux et de plastiques à l'aide de bains de Cr(VI) assez concentrés, l'ion est utilisé pour décaper simplement la surface, la nettoyer, ou bien pour redissoudre complètement une couche de dépôt. Au fur et à mesure du traitement, la concentration en Cr(III) augmente jusqu'à une concentration limite au-delà de laquelle, le bain de décapage n'est plus efficace : sa régénération s'impose. Cette régénération peut être réalisée par électrolyse dans le compartiment anodique d'une cellule selon la réaction suivante :



la réaction à la cathode étant le dégagement d'hydrogène. L'anode utilisée est une anode de plomb recouverte de PbO_2 , dont le rôle catalytique est essentiel pour minimiser la production d'oxygène. Anodes et cathodes sont séparées par un séparateur afin de prévenir toute réduction du Cr(VI) à la cathode.

Lorsque ces bains sont utilisés pour le décapage de pièces métalliques, ils seront pollués par des cations de fer, zinc ou nickel. L'oxydation électrochimique du Cr(III) en Cr(VI) à l'anode peut alors être couplée à l'élimination des polluants métalliques par électrodialyse grâce à l'utilisation d'une membrane échangeuse de cations sélective (Nafion 450), laissant passer les cations bivalents mais non les cations trivalents du compartiment anodique vers le compartiment cathodique. Un schéma de principe du procédé est présenté à la figure II.8.

Figure II. 8 : Régénération des bains d'acide chromique via l'oxydation du Cr(III) en Cr(VI) , avec élimination des ions métalliques selon le principe de l'électrodialyse [II.8]

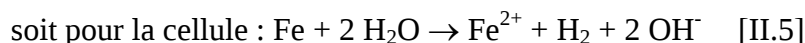
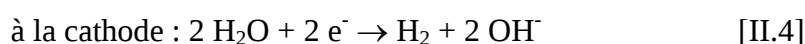


Les cations bivalents seront finalement récupérés en remplaçant régulièrement le catholyte ou simplement par électrodéposition. Pour ce type d'application, on utilise des cellules

ouvertes, des cellules de type filtre-presse ou de forme cylindrique concentrique.

Pour les effluents industriels produits notamment par le rinçage des pièces traitées, il est nécessaire, en vue de leur recyclage ou de leur rejet, d'abaisser la concentration en chrome à des niveaux très bas. Dans ces cas, on vise la précipitation du chrome sous forme d'oxyde ou d'hydroxyde, l'ion Cr(VI) ayant été réduit en Cr(III). Dans ce traitement, des ions Fe^{2+} , électrogénérés par dissolution anodique d'anodes en fer, réduisent les ions Cr^{6+} en Cr^{3+} , les ions Fe^{3+} et Cr^{3+} étant précipités simultanément à la suite de la production d' OH^- , comme le rappellent :

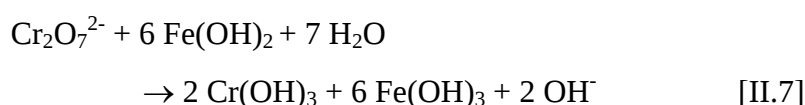
- les équations relatives à la cellule d'électrolyse :



- et les équations concernant l'électrolyte :

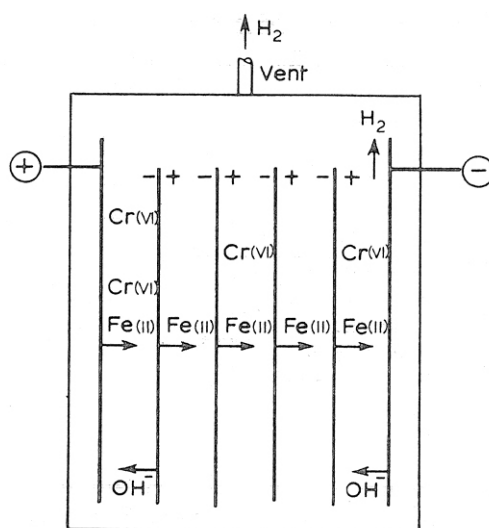


et donc :



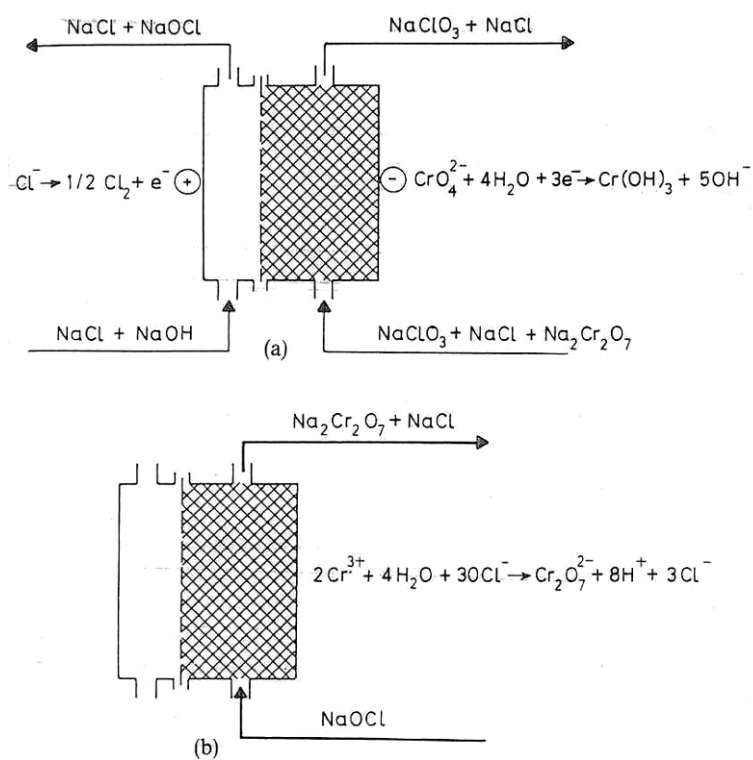
La cellule est schématisée à la figure II.9. Ce procédé permet d'obtenir des concentrations finales en chrome inférieures à 1 mg/l. Cependant, il présente le désavantage de produire une grande quantité de boues difficilement valorisables.

Figure II. 9 : Cellule d'électrolyse utilisée pour la réduction du Cr(VI) en Cr(III) par l'ion Fe(II) et leur précipitation sous forme d'hydroxyde [II.3]



Récemment, une alternative intéressante a été développée par Albright et Wilson America pour précipiter du chrome présent dans des solutions de chlorate de sodium. Ces solutions sont chargées en chrome, à raison de 3 à 4 g/l de Cr(VI), afin de permettre un meilleur rendement faradique lors de la production du chlorate de soude par électrolyse. Dans ce procédé, le précipité Cr(OH)_3 , formé par réduction directe du Cr(VI), est piégé dans la structure tridimensionnelle de la cathode (grains ou feutre de carbone) libérant une solution sans chromate. Périodiquement, le précipité sera solubilisé en faisant percoler sur la cathode imprégnée, une solution d'hypochlorite de soude, la solution ainsi formée pouvant être recyclée dans l'installation de production de chlorate de sodium. Ce procédé est schématisé à la figure II.10.

Figure II. 10 : Procédé d'élimination du Cr(VI) de solutions de chlorate :
a) élimination du Cr(VI) sous forme de $\text{Cr}(\text{OH})_3$; b) Régénération du Cr(VI)
[II.3]



II.2 Traitement par électrodialyse de solutions concentrées de sels

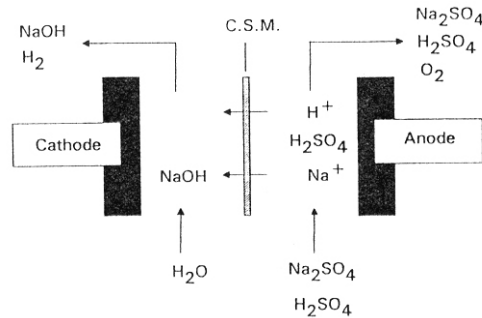
Dans de nombreux secteurs industriels, de gros volumes d'effluents concentrés en sels divers sont produits. Une solution intéressante pour traiter ces effluents est l'électrodialyse car elle permet de régénérer à partir d'un sel, l'acide et la base le constituant [II.1,4-8,10,13]. Une solution de Na_2SO_4 peut être régénérée, par électrodialyse, en une solution de NaOH et une solution de H_2SO_4 .

L'électrodialyse est à la fois une technique de séparation et de concentration dans laquelle des espèces dissoutes sont transportées à travers des membranes ioniques sous l'action d'un champ électrique. Les cations migrent tout naturellement vers la cathode et les anions vers l'anode, en traversant toutefois uniquement et respectivement les membranes cationiques (C.S.M) et anioniques (A.S.M.). Des protons sont générés à l'anode et des ions hydroxyles à la cathode.

Le recours à l'électrodialyse pour traiter une solution concentrée de sel (Na_2SO_4 par exemple) peut être réalisé en fait selon trois approches, conduisant cependant à des résultats très différents.

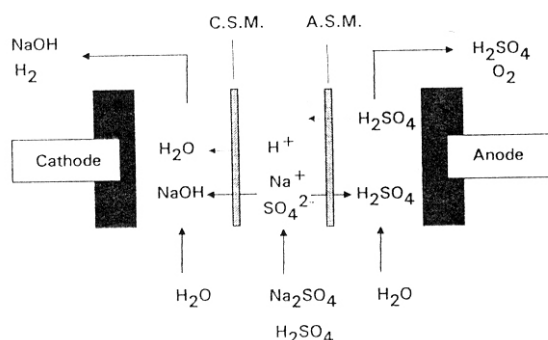
- Suivant un *design de cellule à deux compartiments avec une membrane cationique*, figure II.11 : la solution de sel est introduite dans le compartiment anodique et la base est régénérée à la cathode. Les inconvénients de ce design sont, d'une part, la non-récupération d'une solution pure d'acide sulfurique et, d'autre part, la rapide compétition entre la migration des H^+ et des Na^+ à travers la membrane cationique.

Figure II. 11 : Cellule d'électrodialyse à deux compartiments [II.10]



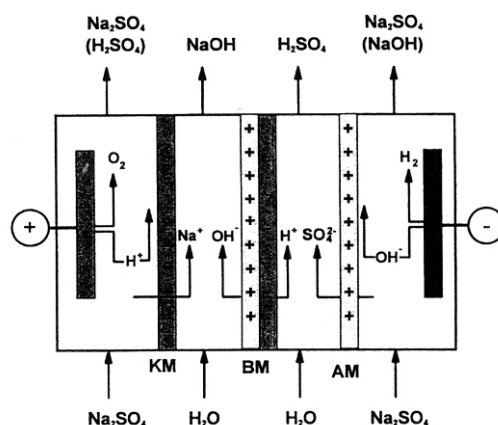
- Suivant un *design de cellule à trois compartiments*, composé d'une membrane anionique et d'une membrane cationique, figure II.12 : la solution de sel est introduite dans le compartiment central et une solution acide et une solution basique sont respectivement régénérées à l'anode et à la cathode. Suivant ce design, deux solutions pures d'acide et de base sont théoriquement obtenues. Malheureusement, la membrane anionique ne peut tolérer qu'une concentration en acide dans l'anolyte limitée si on veut éviter la diffusion des protons à travers elle, ce qui bien entendu diminuerait l'efficacité de l'électrodialyse et entraînerait l'acidification du flux contenant le sel. Notons que pour réduire au maximum cet inconvénient, il est recommandé d'utiliser des membranes anioniques à haute rétention de protons.

Figure II. 12 : Cellule d'électrodialyse à trois compartiments [II.10]



- Suivant un design de cellule utilisant des membranes bipolaires, figure II.13, qui agissent comme une source directe d'acide et de base pour le procédé. Les membranes bipolaires, BM, sont constituées d'une membrane anionique « collée » à une membrane cationique par des procédés particuliers. A l'interface, l'eau s'y dissocie avec migration des H^+ à travers la membrane cationique et migration des OH^- à travers la membrane anionique. Dans ce procédé, la cellule comporte de nombreux compartiments et une seule anode et cathode à ses extrémités. Les H^+ et OH^- sont produits, pour une part mineure, par électrolyse de l'eau et, pour une part majeure, par dissociation de l'eau dans la membrane, ce dernier phénomène nécessitant beaucoup moins d'énergie que l'électrolyse.

Figure II. 13 : Cellule d'électrodialyse à membranes bipolaires [II.10]



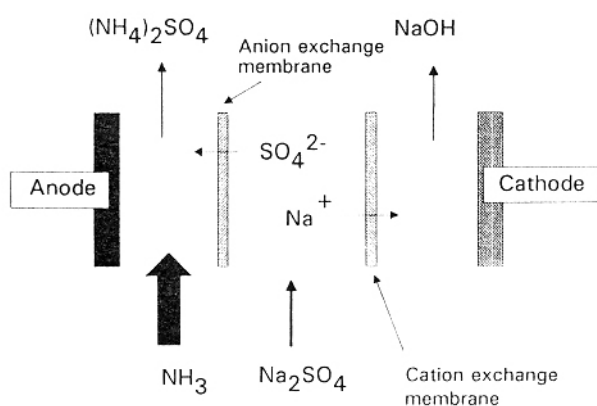
De nombreux systèmes d'électrodialyse sans membrane bipolaire (ElectroCell System AB, El-TECH, ICI, Nora) ou avec membranes bipolaires (WSI Technologies Inc. et Aquatech System) ont été commercialisés pour valoriser les solutions de Na_2SO_4 , K_2SO_4 , KCl , NaCl , KF , Na_3PO_4 .

Avant de clore ce point, il nous paraît utile de citer encore :

- le procédé mis au point par Osmotek pour retraiter des effluents de l'industrie de papeterie appelés « black liquor », en vue de précipiter la lignite et de régénérer la soude caustique ;
- le procédé développé par Genders (Electrosynthesis Co Inc.) en collaboration avec Ormiston Mining Company pour convertir le Na_2SO_4 , d'une part, en hydroxyde de sodium dans le compartiment cathodique et, d'autre part, en sulfate d'ammonium, produit largement utilisé en tant que fertilisant, dans le compartiment anodique grâce à

l'introduction dans ce dernier d'une solution de NH_3 . Ce procédé est schématisé à la figure II.14.

Figure II. 14 : Electrodialyse de solution de Na_2SO_4 avec génération d'une solution de NaOH et d'une solution de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. [II.10]



Tous ces développements ont en grande partie pu être réalisés grâce aux avancées technologiques au niveau des résistances chimique et mécanique des membranes et de leur sélectivité.

Enfin, notons que l'électrodialyse est également appliquée pour la récupération d'acides organiques ou d'ions métalliques (comme déjà présenté à la figure II.8) et pour éliminer des solutés ioniques d'un flux en les concentrant dans une autre solution.

II.3 Autres applications de l'électrochimie au traitement d'effluents industriels

L'électrochimie offre encore de nombreuses autres possibilités dans le domaine du traitement d'effluents industriels.

Nous citerons, en premier lieu, l'oxydation électrochimique des ions CN^- , fort toxiques, largement utilisés dans le secteur du traitement de surface. Le CN^- des solutions peut être oxydé directement à l'anode ou par l'intermédiaire de l'ion hypochlorite anodiquement généré [II.2,6,7,9].

L'électrochimie est également appliquée dans l'industrie nucléaire pour réduire le temps de demi-vie d'espèces radioactives, réduire la corrosivité des effluents aqueux, minimiser le volume des rejets et recycler des composés chimiques utiles. Ainsi, par exemple, avant d'immobiliser dans un ciment, les composés faiblement radioactifs, il est avantageux de faire subir à certaines solutions une réduction électrochimique. Ce traitement a pour effet simultané de réduire les nitrates et nitrites en gaz (N_2 et NH_3), de produire du NaOH qui sera recyclé et d'électrodéposer des métaux lourds ainsi que des isotopes radioactifs comme le ^{106}Ru et le ^{99}Tc .

Une autre application au domaine nucléaire repose sur le procédé Lomi qui permet de réduire la contamination radioactive des tuyaux en acier avant tout processus de maintenance ou de démantèlement d'une centrale nucléaire. Dans ce procédé, les films d'oxydes métalliques contaminés par des isotopes radioactifs, formés par la corrosion des tuyaux en acier inox, sont lixiviés en présence d'un agent réducteur puissant, un sel de vanadium (II) qui est régénéré électrochimiquement. [II .7,13,14]

La technologie électrochimique a été proposée également pour la désinfection de l'eau, l'électroflottation de précipités ou leur électrocoagulation, sans oublier le traitement d'effluents contenant des

composés organiques. La bibliographie relative à ce sujet sera présentée dans le chapitre III [II.2,3,6,10,14].

On rappellera enfin que l'électrochimie est également utilisée pour la décontamination de sols et d'eaux souterraines contaminés par des polluants organiques ou inorganiques (métaux lourds) [II.2-4,6,7,9,14].

II.4 Conclusions

Nous venons de présenter un certain nombre de procédés et de cellules électrochimiques développés ces dernières années pour traiter de nombreux effluents. Le succès du développement de cette technologie est dû, d'une part, aux nombreux progrès réalisés tant au niveau du design des cellules que des matériaux disponibles à leur bon fonctionnement (types d'électrodes, de membranes,...), et, d'autre part, à la meilleure compréhension des mécanismes impliquant des espèces électro-actives. Grâce à ces avancées technologiques, les coûts opératoires associés aux traitements électrochimiques ont pu être réduits nettement, ce qui a permis de les mettre en compétition avec les procédés classiques.

Par ailleurs, un des grands avantages des techniques électrochimiques appliquées au traitement d'effluents industriels réside dans le fait qu'elles ne déplacent pas le problème de pollution mais permettent de le supprimer. En outre, dans certaines applications, il est possible de générer un produit directement valorisable comme, par exemple, des métaux après électrodéposition ou des solutions pures d'acide ou de base après électrodialyse d'une solution de sel.