

Introduction à l'électrochimie industrielle

Jean François Fauvarque

Résumé

Les procédés électrochimiques sont indispensables pour la production d'éléments tels que l'aluminium, le sodium et le fluor par électrolyse en sels fondus. En milieu aqueux, l'électrolyse de la saumure est un procédé clé pour la production de la soude et du dichlore, donc du poly chlorure de vinyle (PVC). Le cuivre, le zinc, le nickel et le cobalt sont des métaux issus principalement de procédés électrochimiques. Presque tous les métaux peuvent être recyclés et purifiés par un procédé électrochimique. Les traitements de surface électrochimiques sont très utilisés dans les industries mécaniques, en particulier pour éviter la corrosion, ou pour apporter un élément de décoration. Les générateurs électrochimiques constituent également un volet important de l'industrie. L'électrodialyse permet le dessalement d'eaux saumâtres et la purification de solutions aqueuses. La fabrication des réacteurs et des appareils d'électrochimie représente également une part de l'activité industrielle électrochimique, sans compter la production d'un grand nombre de capteurs et d'électrodes, utilisés dans beaucoup d'autres activités industrielles.

Mots-clés

Procédés industriels, métaux non ferreux, traitements de surface, électrochimie, énergie.

Abstract

Overview on industrial electrochemistry

Electrochemical processes are mandatory for the production of elements such as aluminium, sodium and fluorine by molten salts electrolysis. In aqueous medium, production of chlorine and soda from brine electrolysis is a key process for PVC obtention. Copper, zinc, nickel and cobalt are major products of aqueous electrolysis. Almost every metal can be purified by an electrolytic process. Electrodeposition is a key process in mechanical industry corrosion protection and noble metal plating. Batteries manufacturing is another important field of electrochemical industry. Electrodialysis can be used for desalination and water treatment. Industrial electrochemistry includes also specific devices and reactors and a lot of sensors useful in many other fields.

Keywords

Industrial processes, electrolysis, metal electrowinning, metal finishing, energy.

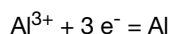
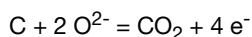
L'industrie électrochimie industrielle s'applique principalement aux procédés de production des métaux, aux traitements de surface, aux générateurs électrochimiques et à la fabrication des appareils électrochimiques. Seules les opérations effectivement industrialisées seront présentées dans cet article ; les lecteurs intéressés trouveront plus d'informations dans la littérature [1-4].

Productions industrielles électrochimiques

Productions en milieux sels fondus

• Préparation de l'aluminium

Le procédé classique repose sur la réduction d'alumine dissoute dans la cryolite, hexafluoroaluminate de sodium (à 960 °C, eutectique à 10 % en poids), avec des anodes en carbone. Tant que la concentration en alumine dans le bain est suffisante, les anions oxygène sont déchargés de préférence aux anions fluorures. La décharge des anions oxygène à l'anode de carbone produit un mélange de CO et de CO₂ :



$$E = 1,18 \text{ V/Al potentiel théorique d'électrolyse}$$

La tension par cellule vaut environ 4 V, soit une surtension d'environ 2,8 V due principalement à la chute ohmique dans le bain.

La formation de CO₂ est préférée car la consommation de l'anode est moindre. Elle se produit à un potentiel un peu plus élevé que pour CO, donc à une densité de courant élevée (environ 1 A/cm²). L'aluminium produit est liquide et titre au moins 99,5 %. Le sodium et le silicium sont deux impuretés résiduelles habituelles ; une purification est donc nécessaire pour certaines applications, par cristallisation fractionnée et/ou fusion de zone. Les sels fondus sont légèrement conducteurs électroniques (électrons dissous) ; le rendement faradique ne dépasse donc pas 95 %. La consommation électrique est importante, de 13 à 15 kWh/kg. La production mondiale atteint 41 millions de tonnes par an (Mt/an), dont 300 000 t/an en France à Dunkerque et Saint-Jean-de-Maurienne. La France importe environ 300 000 t/an et recycle 70 % de l'aluminium utilisé. Les gros producteurs sont la Chine (21 millions de tonnes) et la Russie.

Le cours de l'aluminium se situe au voisinage de 2 US\$/kg ; la production d'aluminium est donc très sensible au coût de l'énergie électrique.

• Sodium

Le sodium est obtenu par électrolyse d'un bain contenant NaCl 28 %, CaCl₂ 26 %, BaCl₂ 46 % ; le bain est liquide à 600 °C. L'anode est en carbone, le dichlore est évacué par

un collecteur en nickel passivé. Le sodium formé surnage et contient un peu de calcium. Un traitement oxydant permet d'éliminer ce calcium et le sodium obtenu est dit de qualité « nucléaire » (utilisable dans les réacteurs nucléaires refroidis au sodium fondu).

L'électrolyse est conduite sous 7 V par cellule (consommation électrique : 10 kWh/kg).

En France, la production atteint 13 000 t/an (usine de Saint-Marcel).

Le lithium est produit de façon analogue en quantité beaucoup plus faible à 40 kWh/kg.

• Magnésium

Le magnésium peut être obtenu selon deux procédés : un procédé thermique, qui utilise la réduction de la magnésite MgO par du ferrosilicium avec distillation du magnésium sous vide, et un procédé électrochimique, qui utilise l'électrolyse du chlorure de magnésium avec un bain contenant NaCl 50-60 %, CaCl₂ 15 %, MgCl₂ 20-30 % à 750 °C. La consommation est de 12 kWh/kg. La production mondiale par électrolyse est de l'ordre de 200 000 t/an ; il n'y a plus de production en France.

Il convient de noter que le sodium et le magnésium sont utilisés pour produire les métaux électropositifs (titane, niobium, terres rares...) à partir de leurs chlorures [5].

• Fluor

Le difluor est obtenu par électrolyse du sel fondu HF-KF vers 60 °C ; l'anode est en carbone, le bac en monel étant la cathode. La tension est élevée : 4-5 V par élément, pour une densité de courant de 0,6 A/cm². En France, le difluor est produit principalement par Areva Comurex.

Le même type de cellule permet la production *in situ* de divers produits fluorés [6].

Productions en milieu aqueux

• Chlore, soude

L'électrolyse de la saumure représente la plus grosse consommation d'électricité en électrochimie industrielle. La production mondiale de chlore est estimée à 77 Mt/an ; il faut en moyenne 3 kWh/kg de dichlore.

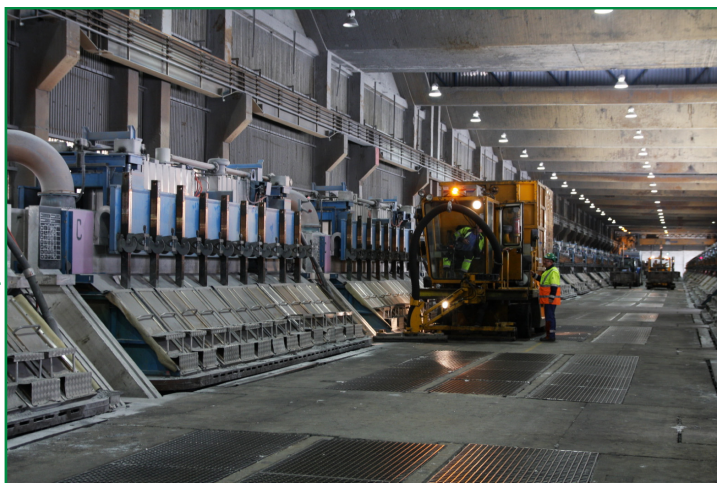
En France, la production de dichlore est d'environ 1 Mt/an. Le coût de l'électricité représente environ 50 % du coût de production du dichlore [1]. 25 % de la production sont encore assurés par le procédé à cathode de mercure, procédé fournissant de la soude à 50 % directement commercialisable. Les procédés à diaphragme et à membrane représentent chacun 37 % de la production. L'article de Christophe Millet fait le point sur l'évolution de cette production industrielle [7].

La majeure partie du dichlore produit sert à la fabrication du dichloroéthane, transformé ensuite en chlorure de vinyle monomère puis en poly chlorure de vinyle (PVC).

• Autres productions minérales en milieu aqueux

La production industrielle mondiale de chlorates est estimée à 4 Mt/an. Elle est obtenue par dismutation à chaud (70 °C) des ions hypochlorites formés par l'électrolyse sans séparateur d'une solution concentrée de chlorure de sodium. La production française est de l'ordre de 125 000 t/an (Arkema).

Le principal usage des chlorates se situe dans le blanchiment de la pâte à papier (en compétition avec le peroxyde d'hydrogène). Une partie est oxydée en perchlorate par élec-



© 2009 Jarle Vines cc-by-sa-3.0.

Production d'aluminium à Mosjøen en Norvège.

trolyse. Le perchlorate d'ammonium est utilisé pour la fabrication des propergols solides (lanceurs et missiles) [1].

• Électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau fournit du dihydrogène et du dioxygène. Ces deux gaz sont produits de façon plus économique par reformage du gaz naturel et distillation de l'air liquéfié. La production industrielle de l'hydrogène par électrolyse de l'eau est limitée aux sites de production hydraulique d'électricité (Norvège, barrage d'Assouan en Égypte...). Il s'agit en général d'une électrolyse en milieu alcalin (KOH 6 M) à 80 °C sous 30 bars. Il apparaît sur le marché de petites unités d'électrolyse à membrane conductrice protonique, dont la production peut être facilement arrêtée et reprise, contrairement à celle de l'électrolyse alcaline. Cette technologie est donc bien adaptée à l'utilisation d'électricité excédentaire en heures creuses. Le coût de la membrane et celui des catalyseurs (métaux nobles : platine et IrO₂) limitent sa généralisation [8].

Obtention et purification des métaux non ferreux

• Cuivre

Tout le cuivre est obtenu par voie électrochimique, soit après obtention pyrotechnique de cuivre « impur », soit par traitement du lixiviat de minerais pauvres. La production mondiale avoisine 17 Mt en 2012 [1] (25 Mt/an avec le recyclage). Au cours de 3 500 € par tonne, cela représente environ 70 milliards d'euros, la valeur la plus élevée des productions électrochimiques.

Deux types de procédés se partagent la production de cuivre. Dans le premier, la lixiviation oxydante des minerais fournit une solution diluée de sulfate de cuivre. La solution diluée est traitée par de la poudre de fer pour précipiter le cuivre (céméntation), ou extraite par des complexants spécifiques du cuivre et du cobalt. La solution aqueuse concentrée de sulfate de cuivre est électrolysée en milieu acide sulfurique avec une anode en plomb (avec un dégagement de dioxygène). La consommation électrique est de l'ordre de 2,5 kWh/kg. Le cobalt reste en solution et fait l'objet d'un traitement ultérieur.

Le second procédé (80 % du cuivre) est d'abord pyrométallurgique. Les minerais sulfurés de cuivre, contenant du fer, sont grillés puis fondus. Une oxydation partielle transforme le fer en oxyde, éliminé sous forme de laitier. Le sulfure de cuivre fondu (blister, conducteur électronique) est coulé en anodes ; il contient l'argent, l'or et les platinoïdes présents dans le

Conditions de raffinage électrolytique (adapté de [2]).					
Métal	Cuivre	Nickel	Cobalt	Plomb	Étain
Électrolyte	CuSO ₄ (100-140 g/L) H ₂ SO ₄ (180-250 g/L)	NiSO ₄ (140-160 g/L) NaCl (90g/L) H ₃ BO ₃ (10-20 g/L)	CoSO ₄ (150-160 g/L) Na ₂ SO ₄ (120-140 g/L) H ₃ BO ₃ (10-20g/L)	Pb ²⁺ (60-80 g/L) H ₂ SiF ₆ (50-100 g/L)	Na ₂ SnO ₃ (40-80 g/L) NaOH (8-20 g/L)
I (mA/cm ²)	10-20	15-20	15-20	15-25	5-15
Tension (V)	0,15-0,3	1,5-3,0	1,5-3,0	0,3-0,6	0,3-0,6
Température	60 °C	60 °C	60 °C	30-50 °C	20-60 °C
Rdt faradique	95 %	98 %	75-85 %	95 %	65 %
Boues	Ag, Au, Pb, Sb...	Au, Ag, Pt		Bi, Ag, Au, Sb...	Pb, Sb
En solution	Ni, As, Fe, Co...	Cu, Co	Ni, Cu		

minéral. Les anodes sont électrolysées en milieu sulfurique (consommation électrique de l'ordre de 0,5 kWh/kg). Les boues contiennent le soufre et les métaux précieux ; le nickel, le molybdène et le cobalt éventuellement présents restent en solution et sont récupérés ultérieurement. La pureté des cathodes de cuivre en bain neuf est excellente et permet la production de fils électriques.

Les principaux producteurs sont le Chili, la Chine et le Japon. Environ 40 % du cuivre produit est recyclé.

• Zinc

Le zinc, dont la production mondiale atteint 13 Mt/an, est obtenu à partir de minerais sulfurés (blende) – 50 % du zinc servent à la galvanisation de l'acier.

Plus de la moitié du zinc est obtenue par voie électrochimique. La blende est grillée en oxyde et sulfate (calcine) dissous dans l'acide sulfurique (le sulfate de plomb formé est insoluble). Après purification, la solution de sulfate de zinc (125 à 170 g/L) est électrolysée avec une anode en plomb. La solution d'acide sulfurique obtenue est recyclée dans l'attaque du produit de grillage.

Le potentiel standard du zinc (- 0,76 V) constitue une particularité du procédé, qui est rendu possible grâce à la forte surtension d'hydrogène aux cathodes de zinc. L'électrolyse doit être conduite à température relativement basse (40 °C).

L'indium est obtenu par retraitement des boues formées lors de l'attaque de la calcine par l'acide sulfurique.

• Nickel

La production mondiale est d'environ 2 Mt, principalement sous forme de ferronickel utilisé pour la production d'aciers inoxydables.

Les minerais de nickel sont sulfurés (65 %) ou oxydés (35 %). Les minerais sulfurés contiennent du fer, du nickel (0,5 à 3 %), du cuivre (0,5 à 3 %), de l'argent, de l'or, du cobalt et des platinoïdes (< 10 g/t). Le traitement pyrométallurgique des minerais fournit des ferronickels. Une partie de ces ferronickels est transformée en mattes par addition de soufre et déferrage. Les mattes contiennent 75 % de nickel, environ 25 % de soufre, un peu de fer et de cobalt.

En France, les mattes sont traitées dans l'usine de Sandouville par du chlorure ferrique aqueux et du dichlore. Le nickel passe en solution et le soufre précipite. Le chlorure ferrique est extrait par le tributyl phosphate et partiellement réutilisé. Le cobalt est extrait par la trioctylamine et le nickel est obtenu par électrolyse avec production de dichlore à l'anode. La production de nickel pur (à 99,97 %) a été de 11 000 t en 2010 à Sandouville. Le nickel pur sert à la production de superalliages (turbines d'aviation). Il est recyclé aux environs de 45 %.

L'ensemble du cobalt extrait de Nouvelle-Calédonie représente environ 3 000 t/an sous diverses formes, pour 130 000 t de nickel sous diverses formes.

Recyclage et purification des métaux en milieu aqueux

De nombreux métaux sont utilisés sous forme d'alliages ; or lors du recyclage, il est souvent utile d'obtenir le métal pur. Tous les métaux peu électropositifs (zinc compris) peuvent être recyclés et purifiés par électrolyse en milieu aqueux. Il en est de même pour les métaux électropositifs (aluminium, terres rares...), mais en bain de sels fondus.

Le métal à purifier est placé en anode (anode soluble) ; la cathode est en métal pur. Le bain et les conditions d'électrolyse sont choisis de façon à obtenir un dépôt uniforme sur la cathode. Les métaux moins électropositifs s'accumulent dans les boues anodiques, les métaux plus électropositifs s'accumulent en solution. L'électrolyte doit être changé et traité quand il devient trop chargé en impuretés. L'étain est purifié en milieu alcalin.

L'argent est purifié (99,99 %) en bain nitrate/acide nitrique et se dépose sur une cathode en acier inox sous forme de poudre cristalline peu adhérente. L'or est purifié (> 99,9 %) à partir d'électrolytes chlorurés ; l'argent et le plomb forment des boues insolubles, alors que les platinoïdes restent majoritairement en solution.

Le temps de résidence moyen en solution varie de 15 à 30 jours, ce qui immobilise une partie importante du métal à récupérer. C'est un problème, principalement pour les métaux précieux.

Le recyclage des matières contenues dans les générateurs électrochimiques constitue une des applications en développement. Le plomb des batteries au plomb est recyclé à plus de 90 %. Le cobalt, contenu dans les batteries lithium-ion, constitue un élément facilement récupérable et rentable. Le recyclage électrochimique le sépare sans difficulté des autres métaux contenus dans ces batteries (manganèse, nickel, lithium...). Les métaux précieux contenus dans les pots catalytiques sont recyclés.

Traitements électrochimiques de surface

Le syndicat des traitements de surface considère que les traitements électrochimiques représentent environ la moitié en valeur de l'ensemble des traitements de surface. Ces traitements concernent les dépôts métalliques protecteurs contre la corrosion (zincage, cadmiage, nickelage...), les dépôts destinés à améliorer les propriétés mécaniques de surface (chromage dur, dépôts antifriction), l'anodisation de

l'aluminium et d'autres métaux passivables, les dépôts décoratifs (cuvrage, argenture, dorage, nickel brillant, aluminium décoré...), le polissage électrochimique. S'ajoutent naturellement à cette liste le formage et l'usinage électrochimiques, ainsi que la peinture par électrophorèse.

Régulation de la surface des dépôts

La pièce à recouvrir est polarisée négativement ; les cations se dirigent vers les sites de champ électrique élevé, donc les sommets de dendrites. Pour éviter la croissance dendritique, les cations métalliques sont souvent complexés sous forme neutre, ou mieux anionique. L'ion cyanure est un complexant très utilisé.

Le dépôt de chrome est un exemple typique ; depuis longtemps, il se faisait à partir de l'anion chromate en milieu acide chromique. Il est ainsi possible d'obtenir des dépôts épais (plusieurs microns) de chrome dur qui protègent de l'abrasion les pièces mécaniques en acier. L'usage du chrome hexavalent étant maintenant interdit, les industriels se tournent vers des dépôts à partir de chrome trivalent, moins performants, qui font l'objet de recherches pour les améliorer. Les formulations sont en général tenues secrètes. Le nickelage apporte une bonne résistance à la corrosion et tolère des déformations limitées. La meilleure protection contre la corrosion est obtenue par zincage. Le zincage électrolytique de tôles d'acier à froid évite la formation d'une couche épaisse et fragile d'alliage fer-zinc et les tôles zinguées peuvent être embouties dans les ateliers de fabrication automobile. Le zincage assure une protection cathodique de l'acier si une rayure le met à découvert.

L'électrozincage représente environ le tiers de la production de tôles d'acier galvanisé estimée à 130 Mt/an. La consommation européenne de zinc pour galvanisation est de l'ordre de 800 000 t/an [1].

Les dépôts de chrome, de nickel et d'autres métaux sont souvent effectués au sein d'ateliers de mécanique, très nombreux mais de petite taille. Ces entreprises sont confrontées au problème du retraitement des effluents (eaux de rinçage, résidus de bains usagés...).

Dépôts décoratifs

Les dépôts brillants d'argent et d'or sont le plus souvent minces (inférieurs au micron) et déposés sur une sous-couche métallique, cuivre ou nickel. Les bains sont souvent cyanurés avec des additifs (brillanteurs). La plupart des entreprises ont quitté la France pour opérer ces dépôts en Asie du Sud-Est. Pour décorer des objets non conducteurs, leurs surfaces sont traitées par un dépôt « chimique » de palladium (< 1 µm), qui les rend conductrices, puis par un dépôt de nickel ou de cuivre (quelques µm) sur lequel est déposé l'argent ou l'or. Ces dépôts électrochimiques sont concurrencés par les dépôts sous vide d'aluminium, d'or ou d'autres substances décoratives (nitride de titane, jaune d'or).

Autres traitements électrochimiques de surface

Il existe d'autres traitements de surface pratiqués dans les industries mécaniques, en particulier en France. Les plus importants sont la peinture par électrophorèse dans l'industrie automobile, le polissage électrochimique (dissolution sélective des aspérités métalliques), le formage électrochimique et les dépôts chimiques.

Il convient également de mentionner l'usinage électrochimique. La pièce à usiner est placée en anode. L'outil est une

cathode qui injecte un électrolyte non passivant (chlorate de sodium aqueux par exemple) ; il est déplacé progressivement vers la pièce, usinée par érosion électrochimique au voisinage de l'outil. Cette technique permet d'usiner des pièces métalliques de grande dureté (titane allié par exemple), évite les modifications cristallines en surface et permet certains usinages difficiles à réaliser par des méthodes traditionnelles. Par exemple, on creuse ainsi les canaux de refroidissement par air sous pression des ailettes de turbines d'aviation en superalliage monocristallin.

Anodisation

La formation d'un film de passivation à la surface d'un métal lui confère une résistance à la corrosion ; cette résistance est particulièrement forte si le film est obtenu par anodisation. L'exemple classique est celui de l'aluminium. Il est possible de teinter la couche d'alumine hydratée, soit par un colorant, soit en y déposant un métal ou un oxyde métallique. Après un traitement de coloration, la pièce d'aluminium est plongée plusieurs minutes dans l'eau bouillante, qui gonfle l'alumine, resserre les pores et assure la durabilité de la protection de la teinte et de la résistance à la corrosion [2].

Traitement des eaux et effluents

Les entreprises sont soumises à des règles contraignantes concernant le rejet des eaux usées. Différentes méthodes électrochimiques sont utilisées pour éliminer les substances indésirables. L'électrocoagulation, le traitement des eaux de rinçage, l'oxydation des effluents contenant des bactéries ou des résidus organiques sont mentionnés dans l'article de F. Lopicque [9]. Rappelons que l'eau peut être purifiée de ses ions par électrodialyse [10].

Générateurs électrochimiques

L'industrie des générateurs électrochimiques représente une part importante de l'activité industrielle électrochimique [2-3, 11]. Rappelons simplement que les batteries au plomb acide constituent le tonnage et le chiffre d'affaires le plus important de cette industrie.

Le stockage de l'électricité produite par les énergies renouvelables reste un défi mal résolu à ce jour. La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau est une solution envisageable, à condition de diminuer le coût de l'investissement [8].

L'utilisation de l'hydrogène dans les piles à combustible (PAC) se développe, spécialement pour l'automobile (principalement en Allemagne et au Japon). Pour les véhicules électriques, la meilleure technologie est la pile à combustible à membrane conductrice de protons (PEMFC), car cette pile permet de modifier très rapidement la puissance fournie en fonction de la demande.

C'est la pile à combustible à carbonate fondu (MCFC) qui détient probablement le record de la production d'électricité. En Corée du Sud, un site vient d'installer 59 MWe, soit 21 unités DFC 3000 de 2,8 MWe chacune avec la technologie « fuel cell energy ». Les effluents gazeux sortent à plus de 600 °C et sont utilisés en cogénération d'électricité, ce qui porte le rendement électrique aux environs de 70 % par rapport au pouvoir calorifique bas (PCB) du gaz naturel utilisé. La filière SOFC (« solid oxide fuel cell ») commence à commercialiser de petites unités pour l'électricité et le chauffage d'habitats individuels (Japon, Allemagne). Les piles DMFC (« direct methanol fuel cell ») sont commercialisées pour les loisirs et les applications de puissance limitée.

Capteurs

Les méthodes électrochimiques d'analyse utilisent des électrodes spécifiques dont la fabrication relève de l'électrochimie industrielle. Les plus connues sont les électrodes de mesure de pH, l'électrode au calomel saturé de KCl, l'électrode Ag/AgCl, etc.

Des électrodes plus élaborées sont également commercialisées : électrode tournante à disque, électrodes spécifiques à membrane organique, etc. Une documentation abondante existe auprès des fournisseurs. Les nouveautés sont présentées dans l'article de J.M. Kauffmann [12].

Appareillages

Les grosses installations industrielles sont commandées auprès de grandes sociétés de génie chimique, par exemple Technip et Uhdenora en Europe, et font l'objet d'études approfondies [9]. Le lecteur trouvera également des informations dans le livre consacré au génie électrochimique [3]. Pour les petites installations, il existe de nombreuses entreprises, y compris en France. Un catalogue accessible en ligne est édité chaque année par la revue *Galvano Organo* [13].

Conclusion

L'électrochimie tient une place importante dans l'industrie mais, sauf pour quelques exceptions comme la production d'aluminium, elle est disséminée dans de nombreuses activités. Les grosses entreprises actives en électrochimie ont souvent cessé d'être françaises, même si des usines importantes y demeurent encore. Pourtant, beaucoup de procédés sont nés en France : production de l'aluminium, piles Leclanché, batteries au plomb, argenterie Christofle, pour ne citer que quelques exemples. L'électrochimie industrielle est très active dans le monde, mais son centre de gravité s'est déplacé vers l'Asie. C'est particulièrement sensible dans le domaine de la production des métaux, celle des batteries et la fabrication des objets de bijouterie grand public. Les consommateurs « électro-intensifs » en France essaient d'obtenir un tarif d'électricité aligné, par exemple, sur celui de l'électricité industrielle allemande. À cela s'ajoutent des contraintes environnementales draconiennes en Europe, moins sévères aux États-Unis, en Russie et en Chine. La France ajoute parfois des contraintes supplémentaires ; ainsi

la distribution d'hydrogène pour véhicules à piles à combustible n'y est pas encore autorisée alors que l'Allemagne équipe ses autoroutes. Les traitements électrochimiques restent cependant importants en France dans les usines de mécanique (automobile, aéronautique...). Aux Français d'inventer de nouvelles applications à l'électrochimie...

Références

- [1] Vignes J.-L., André G., Kapala F., Données industrielles, économiques, géographiques sur les principaux produits chimiques, métaux et matériaux, 9^e éd., 2013-2015, www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees
- [2] Pletcher D., Walsh F.C., *Industrial Electrochemistry*, 2nd ed., Chapman and Hall, 1990.
- [3] Wendt H., Kreysa G., *Génie électrochimique, Principes et Procédés*, Dunod, 2001.
- [4] *Encyclopedia of Applied Electrochemistry* (3 vol.), G. Kreysa, K.I. Ota, R. Savinell (eds), Springer, 2014.
- [5] Chamelot P., Massot L., Gibilaro M., Procédés électrochimiques en sels fondus pour la préparation de terres rares métalliques, *L'Act. Chim.*, 2015, 400-401, p. 93.
- [6] Fluor et produits fluorés à l'aube du XXI^e siècle, Numéro spécial de *L'Act. Chim.*, 2006, 301-302 (voir plus spécialement la préparation du difluor, p. 40).
- [7] Millet J.-C., L'électrolyse chlore-soude, *L'Act. Chim.*, 2015, 400-401, p. 118.
- [8] Mofakhami A.A., Technologies d'électrolyse de l'eau, *L'Act. Chim.*, 2015, 400-401, p. 115.
- [9] Lapique F., Génie des procédés électrochimiques : introduction et quelques tendances récentes, *L'Act. Chim.*, 2015, 400-401, p. 85.
- [10] Bailleul F., Lutin F., Intégration des technologies électromembranaires dans différentes filières industrielles : une alternative compétitive aux procédés conventionnels, *L'Act. Chim.*, 2015, 400-401, p. 90.
- [11] Fauvarque J.-F. : Les générateurs électrochimiques. Constitution, les piles, *REE*, 2006, 10, p. 58 ; Généralités sur les accumulateurs, les accumulateurs au plomb, *REE*, 2006, 10, p. 67 ; Les accumulateurs alcalins, les accumulateurs haute température, les accumulateurs en milieux non aqueux, *REE*, 2006, 11, p. 66.
- [12] Kauffmann J.M., Electrochimie analytique : potentiels et limitations, *L'Act. Chim.*, 2015, 400-401, p. 35.
- [13] www.traitement-des-surfaces.com



Jean François Fauvarque

est professeur émérite au CNAM, ancien titulaire de la chaire d'électrochimie industrielle*.

* CNAM, 292 rue Saint-Martin, F-75003 Paris.
Courriel : jean-francois.fauvarque@cnam.fr

Retrouvez-nous en ligne !



lactualitechimique.org

Archives, actus, photothèque...

LE JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE FRANCE