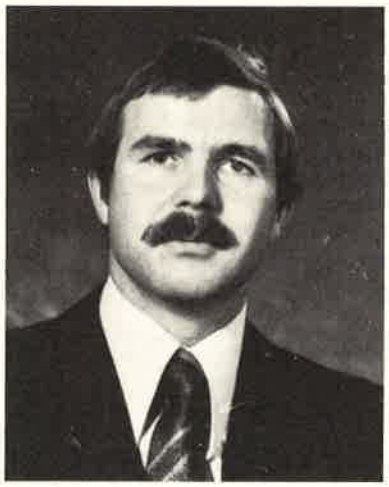
Qu'est-ce que le Génie électrochimique ? (2e partie)

par A. Storck

(Laboratoire des sciences du génie chimique, C.N.R.S.-E.N.S.I.C., 1, rue Grandville, 54042 Nancy Cedex)

III. Les réacteurs électrochimiques

III.1. Nécessité d'un génie de la réaction électrochimique



D'une manière générale et afin de compléter les diverses définitions mentionnées en I, nous dirons qu'un réacteur électrochimique désigne toute portion d'espace, où peut avoir lieu une transformation chimique par apport d'énergie électrique, ou inversement production d'électricité à partir du changement d'énergie libre associé à une réaction chimique (dans les batteries, piles et piles à combustibles).

Étant donné qu'un tel dispositif met en œuvre des phénomènes cinétiques, des transferts de matière et de chaleur, des écoulements de fluide etc..., il existe suffisamment de points communs avec les réacteurs chimiques classiques, pour tenter d'appliquer des méthodes d'approche et de résolution analogues.

Par analogie, plusieurs critères de classement sont donc à envisager suivant le point de vue auquel on se place (8) :

a) **Circulation du mélange réactionnel :** le réacteur peut être fermé (cas d'une pile ou d'une batterie) ou ouvert (pile à combustible dans laquelle le combustible et le comburant alimentent en continu le réacteur).

b) **Intervention de la variable temps :**
Le fonctionnement peut être discontinu ou permanent

c) **Degré de mélangeage des substances** à l'intérieur du réacteur. Un dernier critère de classement repose sur la nature de l'écoulement et le degré de mélangeage.

Pour les réacteurs chimiques caractérisés par l'existence d'un potentiel unique, le potentiel chimique, deux cas limites sont constitués par :
- le réacteur parfaitement agité : la conséquence de l'agitation est que la composition du mélange est constante en tout point du réacteur à un instant donné.
- le réacteur à écoulement piston :

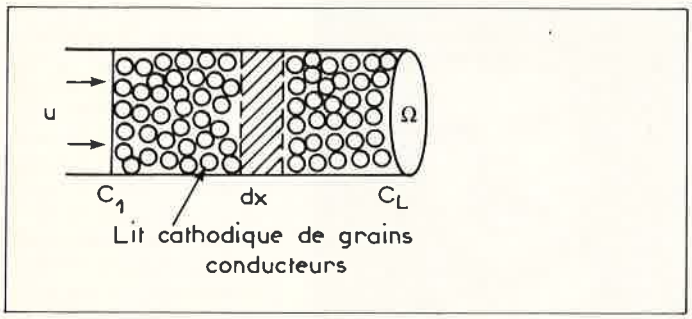
Ce terme signifie que réactifs et produits progressent en bloc et en tranches parallèles dans le réacteur.

La composition du mélange réactionnel varie donc continûment d'un point à l'autre.

Cependant, l'analogie avec les réacteurs chimiques s'arrête dès que l'on considère l'existence du deuxième potentiel caractérisant les réacteurs électrochimiques et leur conférant leur spécificité propre : *le potentiel électrique* : Φ.

Il serait alors tentant de définir l'équivalent de ces deux types de réacteurs au sens du potentiel électrique Φ ou plutôt de la densité de courant locale *i* sur l'électrode. Il faut cependant prendre garde au fait que ces notions (réacteurs parfaitement agité ou de type piston) concernent des propriétés essentiellement volumiques du fluide, alors que les réactions électrochimiques mettent en jeu des phénomènes de surface.

Considérons, à titre d'exemple et afin d'illustrer les différences fondamentales existant entre les deux types de réacteurs (chimique ou électrochimique), une cellule électrochimique cylindrique, tubulaire. Supposons d'autre part que l'écoulement soit de type piston (ou plus généralement piston avec dispersion axiale) au sens de la classification des réacteurs chimiques.
Une réaction primaire du type $A + ne^- \rightarrow B$ se produit au niveau de la cathode, constituée par exemple par un lit fixe de grains conducteurs, de longueur L, parcourue par un électrolyte à la vitesse uniforme *u*.



Lit cathodique de grains conducteurs.

Si I désigne le courant total d'électrolyse, le bilan global de matière relatif à l'espèce transformée s'écrit :

$u.\Omega.(C_1 - C_L) = I/nF$ (en supposant un rendement faradique égal à 100 %).

Par ailleurs, un bilan différentiel en régime stationnaire dans une tranche d'épaisseur *dx* du réacteur, s'écrit :

$$\Phi_x = \Phi_{x+dx} + \frac{i_x.a.dx}{nF}$$

Flux de A entrant à l'abscisse *x* — Flux de A sortant à l'abscisse $(x + dx)$ — Flux de disparition par réaction électrochimique

(*a* désigne ici la surface d'électrode par unité de longueur du réacteur).

En négligeant l'effet de la migration ionique, Φ_x peut être exprimé par :

$$\Phi_x = u.\Omega.C - D.\Omega.\frac{\partial C}{\partial x}$$

où D désigne le coefficient de dispersion axiale.
On aboutit ainsi à l'équation différentielle :

$$u.\Omega.\frac{\partial C}{\partial x} - D.\Omega.\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{i_x.a}{nF} = 0$$

Ce problème déjà fortement simplifié par un certain nombre d'hypothèses de base, ne peut être résolu qu'à partir de la connaissance de la distribution du courant i_x le long du réacteur et doit donc lui être couplé. La disposition des électrodes à l'intérieur du réacteur joue donc un rôle essentiel, puisqu'elle agit directement sur la distribution du potentiel (Paragraphe II).

On notera cependant que lorsque l'électrode opère *globalement* au courant limite de diffusion, la densité de courant limite i_x est reliée au coefficient k_x de transfert de matière local k_x par

$$i_x = n.F.k_x.C$$

et l'équation différentielle précédente peut être intégrée très simplement. Le dimensionnement et la prédiction des performances du réacteur sont alors possibles. Encore faut-il constater que ce problème correspond alors au cas classique de l'écoulement piston avec réaction chimique d'ordre 1, où l'on peut précisément s'affranchir de la spécificité de la réaction électrochimique.

Cet exemple précis et volontairement simplifié montre donc comment la théorie des réacteurs chimiques, et plus généralement la méthodologie du génie chimique, permet d'aborder simplement l'étude dynamique des cellules d'électrolyse. Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont été faites (système isotherme – indépendance des réactions se produisant au niveau des 2 électrodes, pas d'effet de la migration ionique), qui permettent précisément de se rapprocher le plus des conditions expérimentales existant dans les réacteurs chimiques. Cependant, on conçoit qu'étant donné les caractères spécifiques des réactions électrochimiques, il conviendra d'élargir considérablement le génie de la réaction chimique afin de définir et préciser les bases spécifiques d'un génie de la réaction électrochimique, qui s'avérera primordial dans la compréhension du comportement dynamique d'un processus électrochimique lors du démarrage d'une opération ou lorsqu'une variable quelconque du procédé subit une perturbation.

On notera enfin que la présence fréquente de bulles de gaz confère aux réacteurs électrochimiques diverses propriétés spécifiques, qu'il convient de mentionner plus particulièrement. En effet, la formation d'oxygène ou d'hydrogène lors des réactions aux électrodes ou la mise en œuvre de gaz dans certains procédés électrochimiques (électrolyse du chlore, oxydation de l'oxygène en peroxyde d'hydrogène, réduction du gaz carbonique en divers acides valorisables) sont à l'origine de nombreux effets, dont les influences peuvent se manifester de manière totalement opposée.

Citons à titre d'exemple :

a) **la réaction de la conductivité globale de la solution :** Elle est à l'origine d'un accroissement de la tension aux bornes de la cellule (et donc de la consommation d'énergie électrique), lorsqu'on opère à une densité de courant imposée.

b) **L'accroissement des vitesses de transfert de matière par les bulles :** l'utilisation du mouvement des bulles s'avère être un moyen très efficace dans la réduction du coût de l'agitation de l'électrolyte, les coefficients de transfert de matière aux électrodes pouvant subir un accroissement d'un facteur multiplicatif de l'ordre de 5 par rapport à la convection naturelle.

c) **La modification des propriétés physiques de l'électrolyte.**

Dans le domaine des réactions mettant en jeu des gaz, l'apport du G.E. devra se manifester dans :
- la détermination des « hold-up » du réacteur (qui semble être le paramètre décisif sur la conductivité) ;
- la résolution de tous les problèmes liés à la coalescence et au mouvement des bulles (ce problème est, semble-t-il, un des plus importants dans l'électrolyse de l'eau) ;
- la mise au point de corrélations générales (inexistantes à l'heure actuelle).

Les méthodes utilisées classiquement en génie chimique dans l'étude des réacteurs diphasiques gaz-liquide pourront par ailleurs être directement transposées au cas des réacteurs électrochimiques.

III.2. Les réacteurs de type nouveau

Depuis plus d'un siècle, l'industrie et la technologie électrochimique ont été gouvernées par quelques grands procédés, dont nous avons mentionné l'importance au début de ce travail.
Il s'agit principalement des procédés en vue de la production :
- de chlore, chlorates, perchlorates et soude par électrolyse en solution ;
- d'aluminium par électrolyse de sels fondus ;
- d'hydrogène et d'oxygène par électrolyse de l'eau.

Il est important de mentionner que l'ensemble de ces procédés sont caractérisés par la présence *d'espèces réagissantes en grande concentration* et que les phénomènes de transfert de matière y jouent un rôle secondaire voire inexistant.

Il suffit, pour s'en convaincre, de suivre l'évolution technologique des cellules à chlore pour constater que les problèmes principaux à résoudre ne résidaient effectivement pas dans la recherche de l'amélioration des propriétés de transfert, mais plutôt dans la mise au point de nouveaux matériaux d'électrodes et séparateurs (passage progressif des cellules à mercure → à diaphragme → à membrane).

Il faut cependant noter qu'à chacun de ces grands procédés classiques de l'industrie électrochimique correspondent bon nombre d'autres, pour lesquels l'espèce active est présente en faible concentration et où l'influence des phénomènes de transfert devient prépondérante puisque la limitation du courant par la diffusion est directement proportionnelle à la concentration.

Citons les cas célèbres :
- de la récupération de métaux à partir de solutions diluées ;
- du traitement des effluents et de la lutte contre la pollution ;
- du vaste domaine des synthèses électroorganiques pour lesquelles les solubilités des espèces sont généralement faibles.

Les cent premières années de l'industrie électrochimique ont donc été marquées par une situation telle que les électrochimistes s'accommodaient de ces faibles flux de transfert et les géométries des réacteurs étaient bien souvent inadaptées au type de procédé considéré.

Il est toutefois apparu peu à peu qu'un faible investissement supplémentaire, une sophistication apparente dans la construction des cellules et une légère surconsommation d'énergie pour accroître les flux de matière pouvaient s'avérer en fait excessivement rentable à long terme dans le bilan économique et énergétique global du procédé.

On a alors assisté à la mise au point de réacteurs électrochimiques de type nouveau, dont le développement est actuellement assuré à l'échelle du laboratoire pour la plupart et d'ores et déjà à l'échelle industrielle pour certains.

Les divers critères de qualité auxquels tentent de satisfaire les géométries proposées sont de quatre types :
- accroissement des vitesses de transfert de matière aux électrodes en vue d'augmenter les densités de courant opératoires et donc la production des réacteurs ;
- simplicité relative de la conception et de la construction des cellules ;
- uniformité de la distribution du potentiel assurant une bonne sélectivité de fonctionnement et une distribution assez resserrée des produits de la réaction ;
- accroissement de la surface spécifique des électrodes par unité de volume du réacteur et minimisation des frais d'investissement.

Dans le cadre de ce dernier point, le tableau IV suivant (proposé par Ibl) compare pour différentes cellules d'électrolyse, la surface spécifique d'électrode A_s (surface d'électrode par unité de volume de cellule) et A_e (surface d'électrode par unité de volume d'électrode) .

Ce tableau met clairement en évidence l'accroissement considérable des deux paramètres A_s et A_e dans les réacteurs de type nouveau par rapport à la cellule classique à chlore de Hooker.

Tableau IV

	$A_s[cm^2/cm^3]$	$A_e[cm^2/cm^3]$
Cellule à chlore [Hooker]	0,037	0,3
Électrode tournante	0,1	20
Électrolyseur à tank	0,13	20
Filtre-presse	0,3-1,7	20
Cellule à espace capillaire	1-5	20
Lit fixe de particules conductrices	10-50	150
« Swiss Roll » Cellule	20-50	200
Lit fluidisé	20-100	150

La figure 5 présente une revue de quelques types de cellules, qui semblent devoir être, dans un avenir plus ou moins proche, vouées à un développement industriel important.

- **la cellule à espace capillaire** dans laquelle des électrodes à disque sont disposées parallèlement, l'espace inter-électrode pouvant être très faible et de l'ordre d'une fraction de millimètre (ces faibles dimensions ont pour conséquence directe la minimisation des pertes par effet Joule à l'intérieur du réacteur). La figure 5*a* donne un exemple de cellule utilisée pour l'hydrodimérisation d'acrylonitrile en adiponitrile.

- **la cellule à électrode tournante ou « pump cell » :** elle est constituée essentiellement par une électrode circulaire fixe et une seconde électrode du même type, en rotation, et assurant le pompage de l'électrolyte.
L'écoulement turbulent ainsi produit assure un flux de matière satisfaisant et un bon mélangeage de l'électrolyte dans l'espace inter-électrode (dont la dimension est en moyenne de 0,7 mm). Cette cellule est particulièrement bien adaptée à la récupération de métaux sous

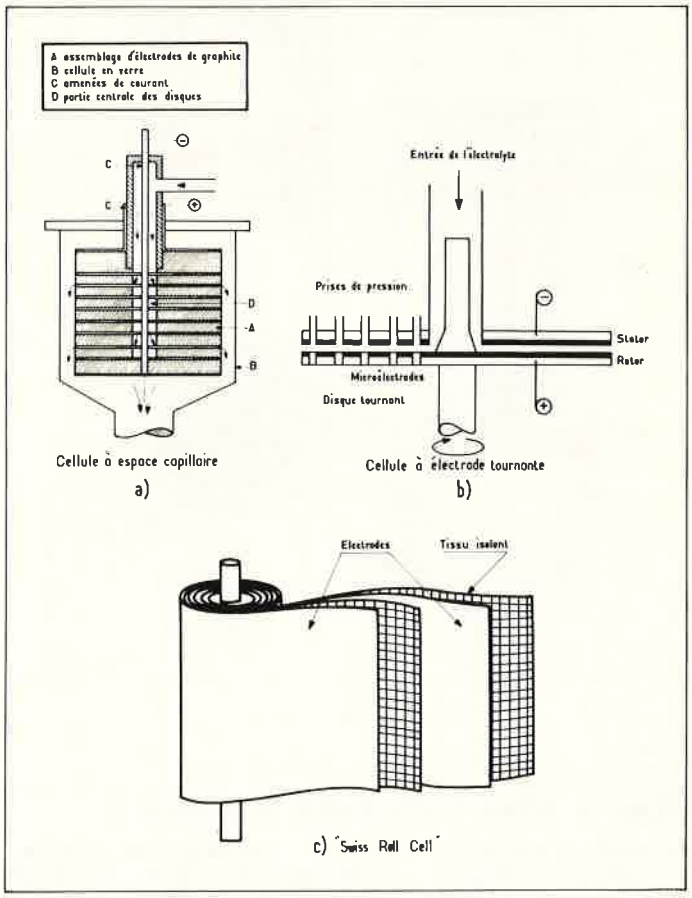


Figure 5. Revue de quelques nouveaux types de cellules électrochimiques.

forme poudreuse (possibilité d'opérer au courant limite de diffusion) et d'une manière plus générale à tous les procédés nécessitant le mélangeage des produits cathodiques et anodiques issus de la réaction. Des expériences à l'aide de traceur ont montré que l'écoulement à l'intérieur du réacteur était de type piston.

Dans le domaine des dispositifs où l'on cherche à accroître les vitesses de transfert en promouvant la turbulence du liquide, citons divers types de cellules mettant en œuvre des obstacles au voisinage des électrodes :

• **la « Swiss Roll Cell »,** dans laquelle deux feuilles métalliques, séparées par un tissu isolant de faible épaisseur, sont enroulées sur elle-même.
La toile isolante joue donc un double rôle : isolation de l'anode et de la cathode et promotion de la turbulence du liquide au voisinage des électrodes.
L'électrolyte circulant par convection forcée peut être pompé axialement ou radialement. Cette cellule a trouvé des applications intéressantes dans les domaines de la récupération des métaux à partir de solutions diluées, de l'électrosynthèse organique et de la dépollution de solutions (destruction des cyanures).

• **La « Chemelec Cell »** utilisant la fluidisation de grains isolants au voisinage des électrodes. Le mouvement incessant des particules fluidisées agissant en tant que promoteurs de turbulence de la phase liquide a un effet bénéfique sur la qualité des dépôts métalliques et sur les phénomènes de polarisation de concentration au niveau de l'électrode de travail. Ce type de cellule a été utilisé pratiquement lors de la récupération de cuivre à partir d'une solution de $CuSO_4$ acide et dans les dépôts de PbO_2.

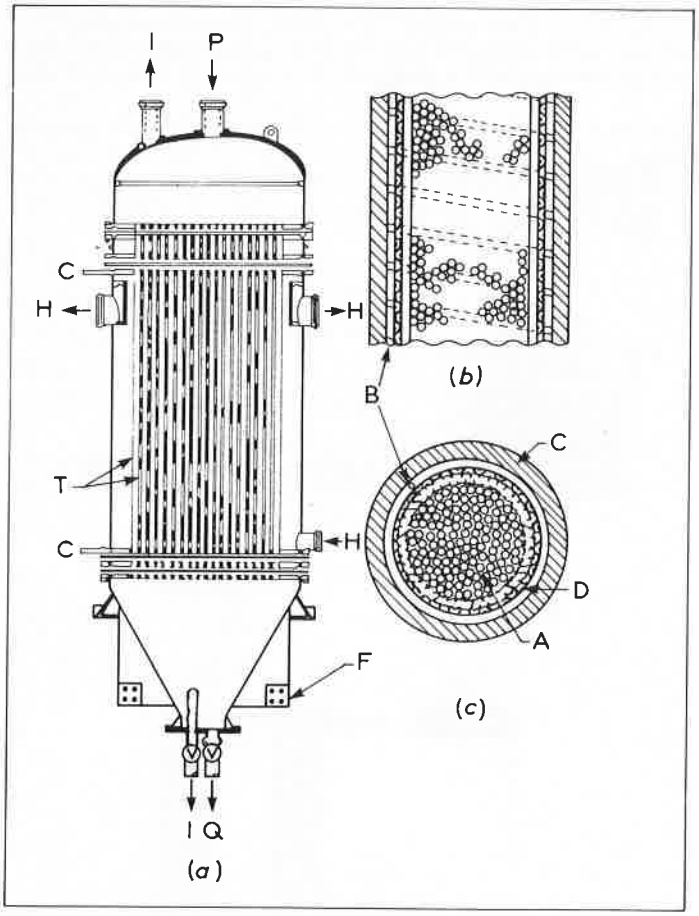


Figure 6. Cellule Nalco (d'après la référence 9).

A : anode granulaire en plomb ; B : distributeur du catholyte ; C : cathode en acier ; D : diaphragme ; F : amenée de courant anodique ; H : entrée et sorties de l'échangeur de chaleur ; I : entrée et sorties de l'électrolyte ; P : orifice d'entrée des particules en plomb ; Q : orifice de sortie des particules consommées ; T : tubes.

• **Les électrodes tridimensionnelles fixes ou fluidisées :** rappelons que ces dispositifs consistent en un lit fixe ou fluidisé de grains conducteurs au contact d'une amenée de courant et traversé par un électrolyte en écoulement (Figure 4).

Ce type de cellule a été utilisé pour la première fois vers 1910 à l'échelle industrielle dans le procédé Nalco (Figure 6) en vue de la production de plomb tétraalkyle.
Le compartiment cathodique est constitué par un faisceau de tubes en acier au voisinage desquels sont disposés des diaphragmes séparant les surfaces internes de ces tubes d'un lit fixe de plomb jouant le rôle d'anode consommable. L'électrolyte traversant chaque tube est un réactif de Grignant et un fluide réfrigérant circulant dans la calandre permet d'évacuer les calories produites par effet Joule. Dans les conditions expérimentales utilisées, le plomb tétraalkyle est obtenu avec un rendement en courant supérieur à 96 %.

Par la suite, l'utilisation des électrodes tridimensionnelles qui possèdent une évidente analogie avec les procédés de catalyse hétérogène, a fait l'objet de nombreux travaux de recherche à l'échelle du laboratoire en vue de leurs applications :
• dans l'extraction des métaux (Cu, Hg etc...) à partir de solutions diluées.
• les synthèses électroorganiques ;
• les oxydations des polluants organiques et des ions cyanure.

Il n'en reste pas moins que le problème de la distribution de potentiel à l'intérieur de ces matrices conductrices constitue la plus grande difficulté rencontrée dans la mise en œuvre pratique des réacteurs correspondants et un certain nombre de règles doivent être prises en compte, si l'on désire mettre à profit le caractère volumique des électrodes.

III.3. Les méthodes de séparation

Un réacteur électrochimique ne constitue fréquemment qu'un maillon dans un enchaînement plus ou moins complexe d'opérations de fractionnement, de séparations, de réactions chimiques etc... Les méthodes de séparations doivent donc y être considérées à 3 niveaux :

• **en « amont » du réacteur,** où il s'agit de séparer ou mettre en solution les produits devant être ultérieurement transformés ou récupérés électrochimiquement. Citons le cas en électrométallurgie (10) de la lixiviation destinée à mettre en solution des métaux valorisables à partir de minerais, des séparations solide-liquide permettant d'éliminer certains résidus solides et de l'extraction liquide-liquide permettant de séparer d'une solution, soit des impuretés, soit un métal de valeur.

• **en « aval » du réacteur électrochimique,** où l'objectif consiste à séparer, d'un mélange réactionnel ou d'une électrode, la matière désirée. L'ensemble des méthodes classiques de séparation sont l'extraction liquide-liquide, la distillation, l'absorption etc... et reposent sur des opérations unitaires bien connues en génie chimique. Une mention particulière doit être faite de la séparation des bulles de gaz, pour laquelle l'utilisation de cyclones et de dévésiculeurs est particulièrement importante, ou de la purification d'un gaz produit électrochimiquement et éventuellement valorisable (utilisation de colonnes d'absorption, de pulvérisation etc...).
En ce qui concerne plus particulièrement le cas de l'électrolyse de l'eau, où il s'agit de réaliser la séparation de gaz (hydrogène et oxygène) d'un milieu liquide de potasse dans des conditions relativement sévères de température et de pression, des études récentes ont soulevé le problème du coût des séparateurs, qui entrerait pour moitié dans le coût global de l'électrolyseur. (Les différents types de séparateurs possibles utilisent les ondes ultrasonores, les séparateurs centrifuges ou à cyclones, des plateaux de décantation ou des effets de filtrage sur grilles.

• **au « cœur » même du réacteur électrochimique :**
L'utilisation d'éléments séparateurs (membranes, diaphragmes) destinés à isoler les compartiments anodique et cathodique au sein du

réacteur est une possibilité qui peut s'avérer parfaitement adaptée dans l'amélioration de la sélectivité de fonctionnement du procédé : dans l'industrie du chlore-soude, le remplacement des diaphragmes par des membranes adéquates permet d'obtenir une qualité de soude, pour laquelle les opérations de séparation « aval » (évaporation, purification) se trouvent considérablement simplifiées.

Un réacteur plus sélectif (par la mise au point de membranes plus appropriées et la recherche d'une distribution de potentiel plus uniforme à l'intérieur de la cellule) permet de minimiser l'importance des séparations effectuées au niveau « aval ». Inversement, des méthodes de séparation simples et efficaces ont pour conséquence directe une simplification du « design » du réacteur et des conditions opératoires plus souples. Le problème doit donc être considéré dans son ensemble et faire l'objet d'études technico-économiques visant à minimiser le coût global de l'enchaînement d'opérations constituant le procédé.

III.4. L'optimisation énergétique et économique des réacteurs électrochimiques

L'on a vu précédemment qu'un des objectifs du génie électrochimique était la mise en œuvre des procédés dans des conditions économiquement optimales.

Le terme « optimisation » est donc un mot clé du génie électrochimique. Rappelons en son principe (Figure 7) :
Le coût global d'une opération électrochimique résulte d'une compétition entre celui de l'énergie électrique consommée dans la cellule, celui des investissements et aussi de toutes les dépenses associées au mélangeage de l'électrolyte. En effet, lorsqu'on augmente la densité de courant i à l'intérieur de la cellule, la surface d'électrode et donc les investissements nécessaires pour transformer un flux donné de matière décroissent, mais parallèlement l'énergie électrique consommée est accrue. Le coût global présente donc une valeur optimale pour une certaine valeur i_{opt} de la densité de courant opératoire.

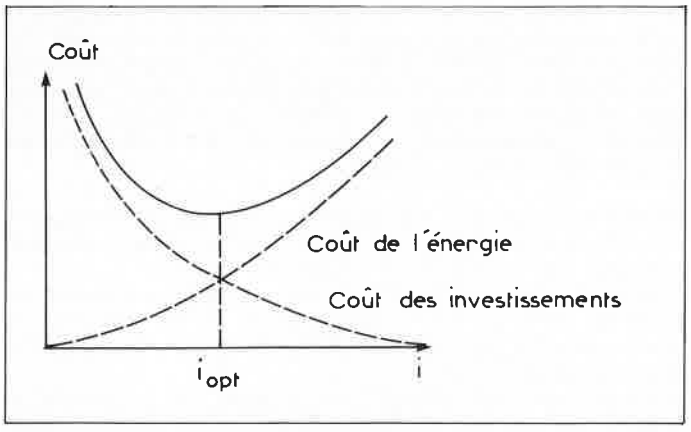
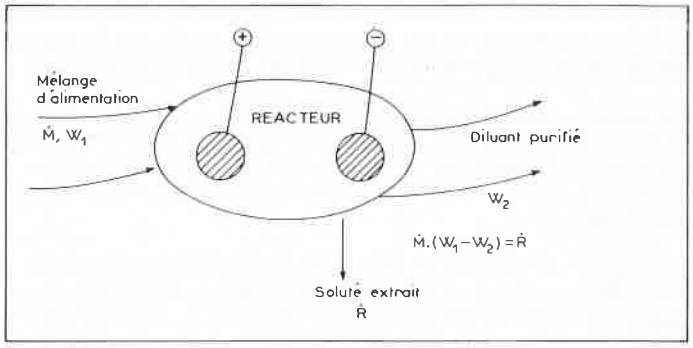


Figure 7.

Il convient toutefois de généraliser ce principe en tenant compte des divers critères d'optimisation qui peuvent être définis et conduire à des choix ou des décisions fondamentalement différentes



$$\eta = \frac{\dot{R}}{\dot{M}W_1} = \frac{\text{Débit extrait}}{\text{Débit maximal entrant}}$$

Considérons un réacteur électrochimique traversé par un débit massique $\dot{M}$ d'un électrolyte contenant une concentration massique W_1 d'un soluté (ions métalliques, polluants ou plus généralement espèces électroactives).
L'optimisation technico-économique d'un tel procédé peut en général se ramener à l'un ou l'autre des 2 cas extrêmes suivants :

a) **Purification de diluant**
Dans de nombreux cas, l'objectif est de préparer un diluant purifié et donc d'abaisser la concentration jusqu'à une certaine valeur W_2 imposée à l'avance. *Le taux d'extraction* η *est donc imposé* et l'objectif devra être atteint en minimisant *le coût total de l'opération par kg de fluide traité*, soit minimiser $\frac{C_T}{\dot{M}}$ à η constant.
Le dessalement de l'eau de mer par électrodialyse, la dépollution des eaux résiduaires entrent dans cette première catégorie.

b) **Extraction du soluté**
Supposons au contraire que le soluté soit la substance valorisable. L'objectif technico-économique sera alors de minimiser le coût total C_T (en francs par an) par kg de soluté extrait, à débit de production $\dot{R}$ imposé soit :
Minimiser $\frac{C_T}{\dot{M}.\eta}$ à $\dot{M}.\eta$ constant.
Les exemples pratiques sont nombreux et concernent toutes les techniques de récupérations de substances rares.

Ces deux objectifs *sont donc fondamentalement différents* ainsi que les techniques d'optimisation correspondantes.

Des études récentes ont par exemple montré que l'optimisation de la densité de courant dans l'électroraffinage du cuivre permettait d'atteindre des économies considérables (11) de l'ordre de 50 dollars par tonne de cuivre produite.

Dans le contexte actuel de disparition progressive des sources classiques d'énergie et d'augmentation de leur prix, les problèmes liés à l'optimisation énergétique et économique des réacteurs ont pris une importance de tout premier plan et des méthodes rationnelles et plus générales d'optimisation tenant compte d'impératifs techniques, économiques, voire écologiques devront être développées dans le cadre du génie électrochimique et en constituer l'une des bases.

IV. Conclusions. Perspectives et avenir du génie électrochimique

A l'avenir, les procédés électrochimiques industriels vont probablement connaître un développement, d'autant plus important que les formes primaires d'énergie fossile actuellement disponible vont s'appauvrir progressivement et être supplantées par d'autres formes de l'énergie provenant du développement des réacteurs solaires et nucléaires.

Cette mutation nécessitera la mise au point de nouveaux systèmes de stockage de l'énergie et toutes les recherches portant sur le développement des piles à combustibles à électrolyte acide, des batteries d'accumulateurs sodium-soufre destinées à supplanter les batteries classiques au plomb sont vouées à un avenir prometteur.

Mc Mullin a écrit (12) : « *la réaction chimique, comme la politique, est l'art du possible; la réaction électrochimique, comme la tactique militaire, est l'art de surpasser l'impossible en appliquant un champ électrique* ».

Cette métaphore conserve toute sa signification et les ingénieurs futurs du génie électrochimique devront apprendre à réexaminer de manière critique la mise en œuvre des réactions chimiques compte tenu de la nouvelle forme électrique de l'énergie, dont le coût deviendra peu à peu compétitif devant les autres types d'énergie.

Le développement des synthèses électroorganiques depuis quelques années est un exemple de voie nouvelle pour laquelle le génie de la réaction électrochimique devrait s'avérer très utile. Le tableau V donne une liste des procédés commerciaux existant ou en voie de développement.

L'avantage des procédés électroorganiques réside essentiellement :
- dans leur propreté relative par rapport aux procédés chimiques utilisant des agents chimiques oxydants (comme les sels de manganèse) ou réducteurs (l'industrie électrochimique est non polluante).

Tableau V

- Procédé Monsanto : Production d'adiponitrile par dimérisation de l'acrylonitrile

$$2\,CH_2 = CHCN + 2\,H_2O + 2e^- \underset{(ACN)}{} \rightarrow N \equiv C - (CH_2)_4 - C \equiv N + 2\,OH^- \underset{(ADN)}{}$$

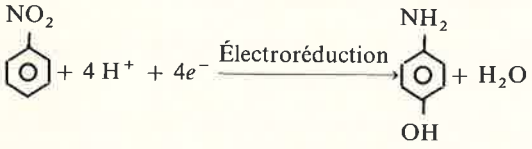
- Procédé Nalco : Production de plomb tétraéthyle par oxydation anodique

$$Pb + 4(C_2H_5)Mg^+ \rightarrow Pb(C_2H_5)_4 + 4\,Mg^{++} + 4e^-$$

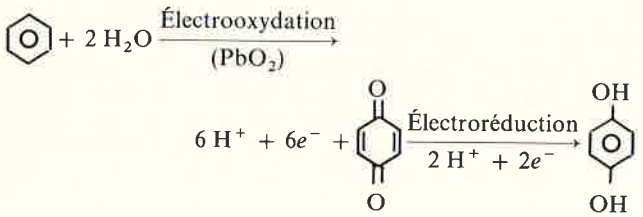
- Production d'oxyde de propylène (Bayer, Kellog)

$$CH_3 - CH = CH_2 (H_2O) \xrightarrow{\text{Électrosynthèse indirecte}} CH_3 - CH(O) - CH_2$$

- Production de *p*-amino phénol (C.L.B.)



- Production d'hydroquinone



- dans la possibilité de contrôler le degré d'oxydation ou de réduction d'une substance par l'intermédiaire du potentiel électrique ;
- dans leur plus grande simplicité technologique nécessitant donc moins de maintenance et fournissant la possibilité d'une plus grande automatisation.

Un des points faibles actuels réside dans le coût de l'énergie électrique et des frais d'investissement plus élevés par rapport aux procédés conventionnels.

Des études économiques récentes (13) ont cependant montré que, s'il est vrai que l'énergie électrique intervient pour une bonne partie dans le coût total d'une opération électrochimique, il n'en est pas moins vrai que globalement le procédé peut s'avérer compétitif.

Par ailleurs, le glissement vers une société « tout électrique » ainsi que l'accroissement probable des prix de certains réactifs chimiques traditionnels ne feront qu'améliorer cette compétitivité. On notera enfin que l'intensification des procédés d'électrosynthèse nécessitera la mise au point de nouveaux principes de construction de cellules.

Dans le domaine de la protection de l'environnement et de la dépollution, citons quelques procédés importants, dont le développement sera lié à celui du G.E. :
- l'électrodialyse pour le dessalement de l'eau de mer,
- la destruction directe des cyanures (issus des bains de galvanoplastie) en cyanates ou indirecte par chloruration,
- la prévention de la pollution des eaux par les métaux lourds à l'état d'ions dangereux pour la vie aquatique,
- le traitement des déchets municipaux par stérilisation et désodorisation électrochimiques.
- l'électrorécupération de l'argent accumulé dans les bains de traitement photographique.
- la réduction électrochimique de CO_2 qui offre de nombreuses possibilités pour la production de composés organiques (acides formique, oxalique, tartrique etc...) directement ou indirectement valorisables.

Dans le domaine des matériaux, de nouvelles membranes et électrodes devront être mises au point afin d'améliorer les performances globales des réacteurs électrochimiques. C'est ainsi que le développement de membranes échangeuses d'ions s'avère d'ores et déjà très profitable dans l'industrie du chlore en vue de l'obtention de soude d'une grande pureté. La mise au point d'anodes en titane recouverte d'un revêtement catalytique a permis dans ce même domaine d'accroître considérablement les densités de courant opératoire sans augmenter la tension de cellule.

En 1974, la Commission de prospective en électrochimie réunie par le C.N.R.S. a conclu qu'il était regrettable que peu de relations existent en France entre chercheurs et industriels.
Ainsi que l'a mentionné Mihé (14) récemment, cette situation est liée en bonne partie au faible développement de l'enseignement de l'électrochimie et par suite au manque de langage commun entre ingénieurs et spécialistes.
Nous pensons d'une manière plus générale que ce manque de communication est dû à l'inexistence d'une discipline de type « Génie électrochimique » analogue à celle enseignée dans certaines grandes universités américaines de génie chimique (15, 16).

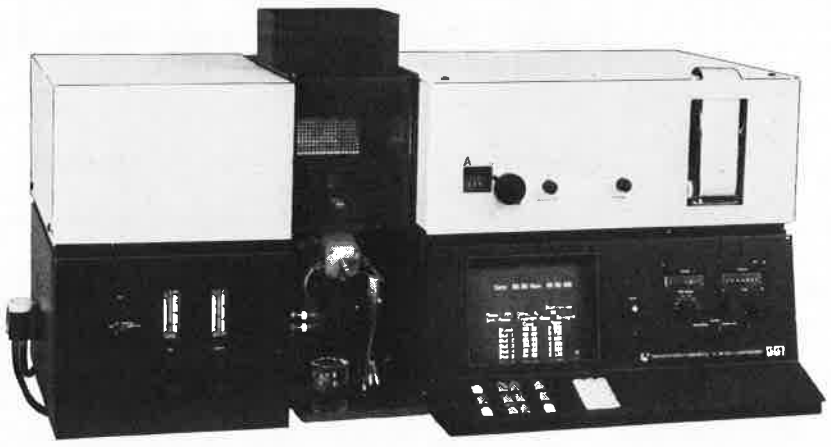
Un des rôles de l'ingénieur du génie électrochimique de demain sera donc sans aucun doute de faire le lien entre les découvertes scientifiques purement fondamentales et la réalité économique du futur.

Bibliographie

(1) N. Ibl,« Fundamentals of Electrochemical Engineering » Conférence présentée au 24e Congrès international de chimie pure et appliquée » Hambourg (Sept. 1973).
(2) A.D.S. Tantram et A.C.C. Tseung, *The Chemical Engineer*, 1975, p. 599.
(3) C. Wagner, « Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering », Vol. 2 (1962).
(4) N. Ibl, « Distribution du courant dans les systèmes électrochimiques », *Techniques de l'ingénieur*, 1976, p. 12.

(5) J.S. Newman, « Electrochemical Systems » Prentice Hall, Englewood Cliffs N.J. (1973).
(6) J. Villermaux et P. Le Goff, « Quelles recherches fondamentales en génie chimique », *L'actualité chimique*, 1978, **1**, 24.
(7) F. Cœuret, « L'électrode poreuse percolante », *Electrochimica Acta*, 1976, **21**, 203.
(8) J. Villermaux, « Génie de la réaction chimique », Tome 1, Cours à l'E.N.S.I.C., (Nancy, 1976).
(9) N.L. Weinberg, « Technique of Electroorganic Synthesis, Part-I ». John Wiley, New York (1974).
(10) P. Blanquet, « Application des processus électrolytiques en hydrométallurgie » ; Conférence aux « 43e Journées de la S.E.E. Paris (29/12 au 30/12 1978).
(11) N. Ibl, « Optimization of copper refining », *Electrochimica Acta*, 1977, **22**, 465.
(12) R.B. Mac Mullin, « Design and Materials of Construction for Electrolytic Cells », *J. Electrochem. Soc. Rewiews and News*, 1973, 135 C.
(13) J.L. Fitzjohn, « Electroorganic Synthesis », *Chem. Engng. Progr.*, 1975, **71** (2), 85.
(14) J. Millet, « L'insertion de l'électrochimie dans la technique industrielle et la vie quotidienne », *Le Progrès Technique*, 1978, **10**, 19.
(15) J. Jorne, « A course in Electrochemical Engineering », *Chemical Engineering Education* », 1977, p. 164.
(16) R. Alkire, « A course in Electrochemical Engineering », *Chemical Engineering Education*, 1976, p. 158.

ABSORPTION ATOMIQUE



IL 551 vidéo 1

Le seul spectrophotomètre d'absorption atomique à écran vidéo

- stockage des conditions analytiques
- mémorisation des courbes de calibration jusqu'à 10 éléments
- jusqu'à 5 standards et statistiques
- option graphique ; présentation des pics rapides sur l'écran vidéo.

R. Delhomme et Cie
INDUSTRIE RDL
32, avenue de Saint-Mandé – 75012 PARIS
Tél. : 346.11.44