

- [18] Feess H., Wendt H., dans *Technique of Electroorganic Synthesis, Part. III*, Weinberg N.L., Tilak B.V. Eds ; John Wiley and Sons, New-York, **1982**, p. 81-177.
- [19] *Electrochemistry in Colloids and Dispersions*, Mackay R.A., Texter J. Eds, VCH, NY **1992** a) Thomalla M., p. 273-289 ; b) Rusling J.F., Hu N., Zhang H., Howe D.J., Chang-Ling-Miaw, Couture E.C., p.303-318.
- [20] Par exemple : - Fendler J.H., *Membrane Mimetic Chemistry*, John Wiley and Sons, New-York, **1982**.
- *Physics of Amphiphiles : Micelles, Vesicles and Microemulsions*, Degiorgio V., Corti M., Eds, Academic Press, Amsterdam, **1985**.
- Lardet D., Thomalla M., *Bull. Soc. Chim. Fr.*, **1988**, p. 524.
- [21] Ibrisagic' Z., Misovic' V., Tabakovic' I., Santic I., *J. Appl. Electrochem.*, **1986**, *16*, p. 907.
- [22] Miras M.C., Silber J.J., Sereno L., *Electrochim. Acta*, **1988**, *33*, p. 851.
- [23] Vettorazzi N., Fernandez H., Silber J.J., Sereno L., *ibid.*, **1990**, *35*, p. 1081.
- [24] Sarsenbaeva G.M., Avrutskaya I.A., Fioschin M.Ya, *Soviet Electrochem.*, (translated from *Electrochimiya*), **1977**, *13*, p. 245.
- [25] Sarsenbaeva G.M., Novikova O.N., Avrutskaya I.A., Fioschin M.Ya, *ibid.*, **1977**, *13*, p. 497.
- [26] Avrutskaya I.A., Sarsenbaeva G.M., Tsar'kov P.D., Fioshin M.Ya, *ibid.*, **1978**, *14*, p. 405.
- [27] Davidovic' A., Tabakovic' I., Davidovic' D., *J. Electronanal. Chem.*, **1990**, *280*, p. 371.
- [28] Reichardt C., *Solvents and Solvents Effects in Organique Chemistry*, VCH : Weinheim, **1988**.
- [29] Andreaes S., Zahnow E.W., *J. Am. Chem. Soc.*, **1969**, *91*, p. 4181.
- [30] Ebersson L., Helgee B., *Acta Chem. Scand.*, **1975**, *B29*, p. 451.
- [31] Laurent E., Rauniyar G., Thomalla M., *J. Appl. Electrochem.*, **1984**, *14*, p. 741.
- [32] Rauniyar G., Thomalla M., *Bull. Soc. Chim. Fr.*, **1989**, *2*, p. 156.
- [33] a) Jaeger D.A., Bolikal D., Nath B., *J. Org. Chem.*, **1987**, *52*, p. 276 et *Surfactants in Solution*, Vol. 9, Mittal K.L., Ed., Plenum Press, New-York, **1989**, p. 149-152.
- [34] a) Ellis S.R., Pletcher D., Gough P., Korn S.R., *J. Appl. Electrochem.*, **1982**, *12*, p. 687.
b) Forsyth S.R., Pletcher D., dans *Recent Advances in Electroorganic Synthesis*, Torii S., Ed., Elsevier, Amsterdam, **1987**, p. 61-66.
c) Fleischmann M., Tennakoon C.L.K., Bampfield H.A., Williams P.J., *J. Appl. Electrochem.*, **1983**, *13*, p. 593.
d) Fleischmann M., Tennakoon C.L.K., Gough P., Steven J.H., Konn S.R., *ibid.*, **1983**, *13*, p. 603.
- [35] a) Franklin T.C., Iwunze M., *J. Electroanal. Chem.*, **1980**, *108*, p. 97
b) *Idem*, *Anal. Chem.*, **1980**, *52*, p. 973.
c) Franklin T.C., Iwunze M., Gipson S., dans *Inorganic Reactions in Organized Media*, Holt. S.L., Ed, ACS Symp. Ser., **1982**, *177*, p. 139-155.
d) Franklin T.C., Otha M., *Surf. Technol.*, **1983**, *18*, p. 63.
e) Franklin T.C., Mathew S., dans *Surfactants in Solution*, vol. 10, Mittal K.L., Ed., Plenum Press, New-York, **1989**, p. 267-286.
- [36] Robin D., Comtois M., Martel A., Lemieux R., Kam Cheong A., Belot G., Lessard J., *Can. J. Chem.*, **1990**, *68*, p. 1218.
- [37] Chambriou P., Roger L., Lessard J., Béraud V., Mailhot J., Thomalla M., *ibid.*, **1995**, *73*, p. 804.
- [38] Béraud V., Lessard J., Thomalla M., *ibid.*, **1977**, *75*, p. 1529.
- [39] Rusling J.F., *Acc. Chem. Res.*, **1991**, *24*, p. 74.

3. Electrochimie sous ultrasons : réacteurs d'électrosynthèse organique et d'électrodépollution sous champ ultrasonore

Patrick Cognet, Anne-Marie Wilhelm, Henri Delmas

Introduction

L'irradiation d'un liquide par les ultrasons de puissance donne naissance au phénomène de cavitation : croissance de microbulles présentes au sein de la solution puis vibrations de ces bulles jusqu'à leur implosion violente. La cavitation engendre alors des effets mécaniques en milieu homogène (dégazage, agitation) mais surtout en milieu hétérogène liquide-liquide et liquide-solide à proximité des interfaces. Lors de l'implosion des bulles de cavitation près de l'interface, des microjets de liquide dirigés vers cette surface conduisent au décapage, à l'érosion du solide ou à la cassure de ces grains ou gouttes. Les ultrasons peuvent donc assister les réactions électrochimiques par leur effets physiques en limitant l'accumulation de bulles à l'électrode (dégazage), en évitant l'épuisement en espèces électroactives à proximité de l'électrode (agitation, transfert de matière) et par activation continue des électrodes (érosion, décapage). A ces effets physiques peuvent se superposer des effets sur la chimie des réactions puisque l'implosion des bulles de cavita-

tion peut produire des radicaux, que ce soit en milieu organique [1] ou aqueux.

Le choix de la fréquence ultrasonore permet de privilégier les effets mécaniques (basse fréquence 20-80 kHz) ou chimiques (plus haute fréquence 100-1000 kHz). La combinaison de ces deux effets peut être mise à profit dans les procédés électrochimiques, que ce soit en électrodépollution ou en électrosynthèse organique.

Électrosynthèse organique

La sonoélectrochimie, c'est-à-dire le domaine de recherche qui s'intéresse à l'incidence des ultrasons de puissance sur les procédés électrochimiques, est une science relativement ancienne puisque les premiers essais d'application des ultrasons à l'électrochimie datent des années 30 [2, 3, 4]. Depuis, les ultrasons ont trouvé de nombreuses applications dans ce domaine [5]. L'intérêt des électrochimistes s'est d'abord essentiellement porté sur l'utilisation

des ultrasons en électroanalyse et en électrochimie des métaux. Cependant, depuis une quinzaine d'années, l'électrochimie organique sous ultrasons a suscité un regain d'intérêt et est devenue un domaine d'investigation important de la sonoélectrochimie.

L'utilisation des ultrasons en électrosynthèse organique peut intervenir essentiellement à deux niveaux :

- avant électrolyse, pour la préparation et l'activation des électrodes,
- pendant l'électrolyse, pour assister la réaction.

Préparation de catalyseurs

Les ultrasons ont été utilisés pour la préparation et le traitement de catalyseurs. Leurs effets sur la cristallisation des solides se traduit par des tailles de particules plus petites avec une distribution plus étroite. Ainsi, la réduction de sels métalliques sous ultrasons conduit à la production de catalyseurs avec une activité supérieure à celle observée pour des catalyseurs préparés sous agitation mécanique conventionnelle.

D'autre part, différentes méthodes d'analyse de surfaces (rayon X, spectroscopie Auger...) ont révélé que le nickel de Raney traité par les ultrasons présentait une meilleure activité : augmentation du nombre de sites catalytiques et élimination des impuretés passivantes.

L'oxydation du di-acétone-L-sorbose (DAS) en acide céto-gulonique (DAG) est une étape de la synthèse de la vitamine C. Cette réaction a été au Laboratoire de Génie Chimique, à l'ENSIGC de Toulouse en collaboration avec EDF. Elle a été menée dans un réacteur de type Grignard modifié; L'anode était constituée de mousse de nickel. Une suspension d'hydroxyde de nickel jouait le rôle de médiateur d'oxydation et d'électrode volumique. La contre-électrode était en titane platiné et un séparateur en polyéthylène était intercalé entre les deux électrodes. Le réacteur comportait un seul compartiment. L'irradiation ultrasonore à 500 kHz de ce médiateur en suspension provoque une diminution importante du diamètre moyen des particules d'hydroxyde de nickel (autour de 0,12 mm au lieu de 0,88 mm avant sonication). La diminution de la taille des particules d'hydroxyde de nickel a permis de diminuer la quantité de médiateur engagée pour l'électrolyse : il est donc beaucoup plus efficace. Pour traiter la même quantité de DAS, la quantité d'oxyde de nickel nécessaire pour obtenir un rendement chimique de 85 % est divisée par 10 (passage de 80 à 8 g/L de médiateur) [6].

Électrosynthèse

En ce qui concerne la conduite des réactions d'électrosynthèse organique ou organométallique proprement dites, une des premières recherches menées dans le domaine a concerné la synthèse de dianions Se_2^{2-} et Te^{2-} [7] directement à partir d'une poudre de sélénium avec une cathode en carbone. La méthode a été appliquée avec succès pour la production de Te_2^{2-} et Te^{2-} à partir de tellure. Ces composés ont pu être utilisés *in situ* dans des solvants aprotiques tels que le DMF ou le THF pour la synthèse de composés sélé-

niens ou telluriens par réaction nucléophile avec des halogénoalcanes. La synthèse de diarylchalcogénures non symétriques par électroréduction de chalcogénures diarylés symétriques à une électrode de carbone a également été rapportée. L'anion $\text{C}_6\text{H}_5\text{Se}^-$ peut ainsi être obtenu puis l'électroréduction est poursuivie sous ultrasons après ajout de bromobenzonitrile pour conduire à $\text{C}_6\text{H}_5\text{SeC}_6\text{H}_4\text{CN}$ avec un rendement de 57 %. Ce mécanisme $\text{S}_{\text{NR}}1$ a été plus tard exploité pour produire des phénylsélénobenzophénones et leurs analogues dérivés du tellure [8-11].

La synthèse de composés de type polysilanes a pu être menée en milieu aprotique à l'aide d'une anode consommable de Mg, Al ou Cu et dans une cellule non divisée. Dans le cas d'un précurseur tel que le $\text{C}_6\text{H}_5\text{MeSiCl}_2$, l'irradiation de la cellule d'électrolyse permet d'augmenter de façon sensible le rendement en polysilane (de 22 à 33 %) [12]. D'autres applications apparentées concernent l'électrosynthèse de polymères de germanium ou copolymères de type silane-germanium à partir de dérivés dihalogénés.

Une autre application des ultrasons en électrochimie organique concerne la polymérisation en chaîne électroinitiée. Lors de la copolymérisation de l'isoprène avec le α -méthyl styrène à une électrode de platine et en cellule divisée, l'irradiation ultrasonore permet de travailler à des potentiels plus bas. Le copolymère 50/50 est obtenu à un potentiel de - 2,6 V (/Ag/Ag⁺) contre - 3 V sans ultrasons [13].

Dans le domaine des polymères conducteurs, la qualité des films de polythiophène déposés à une électrode peut être améliorée par les ultrasons [14].

Dans tous les exemples précités, les ultrasons sont utilisés en électrochimie organique pour faciliter une réaction attendue et cette activation est toujours à prendre en compte dans les réactions d'électrosynthèse organique. Toutefois, la possibilité que les ultrasons puissent intervenir directement dans le mécanisme d'une réaction électrochimique n'a été mise en évidence qu'à la fin des années 80. La réaction qui illustre en premier ces effets est l'électrooxydation d'anions carboxylates (réaction de Kolbe) [15-19]. La présence d'ultrasons affecte la distribution des produits en favorisant un mécanisme à deux électrons et en augmentant la proportion d'alcène produit. Les effets des ultrasons sur cette réaction sont décrits en détail par Walton dans une revue consacrée à la sonoélectrochimie [20].

Plus récemment, les ultrasons ont également été employés dans les réactions d'électroréduction. Un rendement de 70 % en *p*-aminophénol a pu être obtenu par conversion du nitrobenzène, à une échelle de 50 g, en présence d'un tensioactif non ionique et en milieu sulfurique [21]. Un travail récent s'est focalisé sur le contrôle par les ultrasons de la sélectivité de produits issus des réactions d'électroréduction. La réduction du benzaldéhyde [22, 23], de l'acide benzoïque ou de l'acétophénone illustrent bien l'objectif poursuivi. Dans tous les cas, il semble que les ultrasons favorisent la voie de réduction qui implique l'échange du plus petit nombre d'électrons par molécule au contraire de la réaction d'électrooxydation pour laquelle l'échange du plus grand nombre d'électrons est favorisé. Cependant, dans l'état actuel des connaissances, les

généralisations restent hasardeuses. Beaucoup d'autres réactions d'électroréduction ont été menées sous ultrasons comme l'électroréduction d'halogénures de méthyle à une électrode d'étain réactive [20]. Des composés inhabituels peuvent être électrogénérés sous ultrasons comme le tétramésityldisilène obtenu à partir du dichlorodimésitylsilane avec des rendements supérieurs à 90 % [23].

La réaction d'électroréduction des cétones aromatiques en milieu neutre a été choisie comme exemple d'illustration de l'activation ultrasonore. Cette réaction a été étudiée à l'Institut de Technologie de Tokyo [23] et plus récemment au Laboratoire de Génie Chimique, à l'ENSIGC de Toulouse [24]. La réduction de l'acétophénone en milieu neutre donne naissance à un radical anion (I) qui par protonation fournit un radical (II). Ce radical est plus facilement réductible que la cétone et se transforme, au cours d'une deuxième réduction, en alcool.

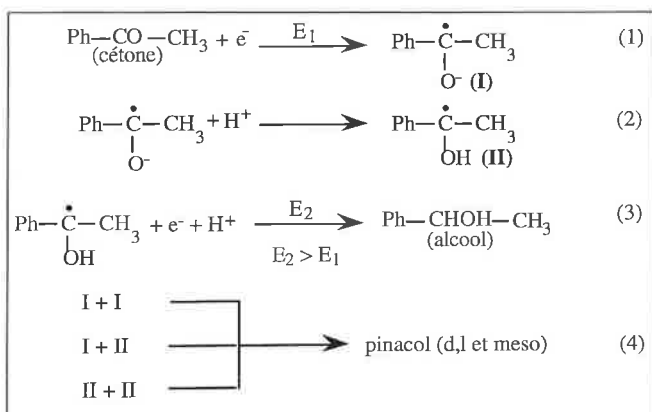


Figure 1 - Schéma réactionnel de l'électroréduction de l'acétophénone en milieu neutre.

L'application d'un champ ultrasonore provoque l'accélération du transfert des radicaux au sein de la solution où ils peuvent réagir entre eux pour donner le produit de couplage recherché : le pinacol. Les ultrasons permettent d'orienter la compétition alcool/pinacol préférentiellement vers la réaction de dimérisation. Ainsi, le rapport alcool/pinacol reste autour de 7 sans ultrasons et peut tendre vers 1 sous irradiation ultrasonore à 20 kHz, après passage de 2F/mole d'acétophénone [25]. Par ailleurs, la présence d'ultrasons autorise l'utilisation d'une électrode de zinc plus sélective mais passivée très rapidement par un film de pinacol dans les conditions ordinaires. Cette réaction permet donc de mettre à profit trois effets différents des ultrasons : l'agitation de la solution qui conduit à l'accélération du transfert de matière, le décapage de l'électrode qui prévient la formation d'un film de pinacol passivant, le dégazage de la solution qui permet d'éliminer l'oxygène formé à l'anode.

Une autre illustration de l'incidence des ultrasons sur la sélectivité des réactions d'électrosynthèse concerne la réduction de composés gem-dichlorés par le procédé à anode soluble [26]. Il est en général aisé d'obtenir le produit de réduction partielle : le monochloronorcarane; le remplacement du deuxième atome de chlore par un atome d'hydrogène est beaucoup plus difficile. Lors de la réduction du dichloronorcarane sur cathode de zinc, la superposition d'un champ ultrasonore au champ électrique permet d'obtenir le

norcarane (produit de réduction totale) de façon presque quantitative.

L'irradiation ultrasonore produit donc des effets bénéfiques dans les réactions d'oxydation et de réduction électrosynthétiques et peut jouer un rôle avant, pendant et après les phénomènes électrochimiques fondamentaux. En augmentant la sélectivité des réactions, en accélérant le transfert des substrats à l'électrode et en diminuant les tensions de cellules requises, les ultrasons offrent de nouvelles perspectives à l'électrosynthèse organique. Toutefois, l'aspect énergétique et le coût encore élevé des appareillages ultrasonores doivent être pris en compte afin de décider de la viabilité de tels procédés.

Application à l'électrodépollution

Dans le domaine du traitement des eaux, l'électrochimie permet l'oxydation directe ou indirecte de composés tels que les phénols ou les polychlorophénols [27, 28]. Cependant, ces procédés sont souvent pénalisés par des temps de réaction trop longs ou par des besoins en énergie trop importants. Certains auteurs se sont intéressés à l'apport des ultrasons sur de tels systèmes.

Par exemple, Mizzera [29] a montré que la superposition d'un champ acoustique à un champ électrique appliqué lors de la dégradation des phénols conduit à un taux de conversion élevé et produit essentiellement l'acide maléique. Pétrier *et al.* [30] ont réalisé la dégradation de chlorophénols et du benzène sous ultrasons. Ces produits plus volatils que le phénol migrent à l'intérieur des bulles de cavitation où ils sont pyrolysés. Les travaux de Connors et Rusling [31] sur la déchloration électrocatalytique des biphenyls polychlorés en biphenyls ont montré que l'apport des ultrasons améliore le taux de conversion d'un facteur trois tout en diminuant notablement la durée d'électrolyse.

Au Laboratoire de Génie Chimique, Trabelsi [32] a étudié l'oxydation du phénol par voie sonochimique à plusieurs fréquences. Après 60 minutes de sonoélectrolyse à 80 kHz, il obtient de la *p*-quinone qui représente un produit plus toxique que le phénol lui-même. A 540 kHz par contre, la quinone n'est plus présente dans le milieu, ce qui rend ce procédé intéressant. Enfin, il a été nécessaire d'optimiser la géométrie et la position des électrodes au sein du réacteur sono électrochimique. Dans ce but, Trabelsi *et al.* [33] ont exploré la distribution des effets ultrasonores à l'aide d'une sonde électrochimique : il s'agit d'une électrode dorée où l'on réalise la réduction du ferricyanure en milieu alcalin sous contrôle diffusionnel. Cette réaction est donc sensible aux effets mécaniques de la cavitation : le courant limite mesuré peut être relié à l'intensité de la cavitation. Ces mesures ont permis de mettre en évidence les zones de plus forte intensité ultrasonore.

A titre d'exemple, sous ultrasons seuls à 540 kHz, la dégradation presque totale du phénol s'obtient en 100 minutes pour une solution chargée à 89 mg/L. Le couplage ultrasons-électrochimie permet d'obtenir une dégradation de 95 % en 10 minutes, sur électrode de titane platiné et en milieu NaCl [34]. Des améliorations de ce procédé peuvent être obtenues en utilisant un autre électrolyte support que

NaCl pour éviter les produits de dégradation organochlorés et l'utilisation d'électrodes de type semi-conducteur, elles mêmes génératrices de radicaux OH°.

Références de la partie 3

- [1] Suslick K. S., *Ultrasound : its Chemical, Physical an Biological effects*, VCS Publishers, Weinheim RFA, **1988**.
- [2] Moriguchi N., *J. Chem. Soc. Jpn.*, **1934**, 55, p. 349.
- [3] Schmid G., Ehret L., *Z. Elektrochem.*, **1937**, 43, p. 597.
- [4] Piontelli R., *Atti Accad. Lincei, Classe Sci. Matem; Fis. Nat.*, **1938**, 27, p. 581.
- [5] Mason T. J., Lorimer J. P., Walton D. J., *Ultrasonics*, **1990**, 28, p. 333.
- [6] Ait-Lyazidi H., *Doctorat d'Etat, Université des Sciences de Meknes*, **1996**.
- [7] Gautheron B., Tainturier G., Degrand C., *J. Am. Chem. Soc.*, **1985**, 197, p. 5579.
- [8] Degrand C., *J. Chem. Soc. Commun.*, **1986**, p. 1113.
- [9] Degrand C., *J. Org. Chem.*, **1987**, 52, p.1421.
- [10] Degrand C., *J. Electroanal. Chem.*, **1987**, 283, p. 239.
- [11] Degrand C., Prest R., Nour M., *Phosphorous Sulfur*, **1987**, 38, p. 201.
- [12] Shono T., Kashimura S., Ishifune M., Nishida R., *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, **1990**, p. 1160.
- [13] Akbulut. U., Toppare L., Yurttas B., *Polymer*, **1986**, 27, p. 803.
- [14] Osawa S., Ito M., Tanaka K., Kuwano J., *Synthetic Metals*, **1987**, 18, p.145.
- [15] Chyla A., Lorimer J. P., Mason T. J., Smith G., Walton D. J., *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, **1989**, p. 603.
- [16] Tashiro M., Tsuzuki H., Goto H., Mataka S., **1991**, *Chem. Express.*, 6, p. 403.
- [17] Walton D. J., Chyla A., Lorimer J. P., Mason T. J., *Synth. Commun.*, **1990**, 20, p. 1843.
- [18] Mason T. J., Lorimer J. P., Bates D. M., *Ultrasonics*, **1992**, 30, p. 40.
- [19] Lorimer J.P., Mason T.J., Mistry B.P., *Ultrasonics*, **1990**, 25, p. 23 .
- [20] Walton D.J., Phull S. S., *Advances in Sonochemistry*, **1996**, 4, p. 205.
- [21] Abohe M., Matsuda K., Nonaka T., *Denki Kagaku Oyobi Kogyo Butsuri Kagaku*, **1994**, 62, p. 1298.
- [22] Nonaka T., Matsuda K., Atohe M., *Chem. Lett.*, **1994**, p. 1619.
- [23] Ono Y., Nishiki Y., Nonaka T., *Chem. Lett.*, **1994**, p. 1623.
- [24] Ghanem-Lakhal A., Cognet P., Berlan J., Delmas H., Wilhelm A.-M., Fabre P.-L., *Fourth European symposium on Electrochemical Engineering*, CHISA '96, Prague, **1996**.
- [25] Molle C., Ghanem-Lakhal A., Cognet P., Delmas H., Wilhelm A.-M., Fabre P.-L., *ECCE-I*, Florence, **1997**.
- [26] Ghanem-Lakhal A., Belmant C., Cognet P., Berlan J., Lacoste G., Fabre P.-L., Jud J.-M., *Entropie*, **1996**, 195, p. 1.
- [27] Plattner E., Comminelis C., *Process Technologies for water treatment*, Plenum, In S. Stucki ed., New York, **1988**.
- [28] Comminelis C., Pulgarin C., *J. Appl. Electrochem.*, **1991**, 21, p. 1403.
- [29] Mizzera J., *brevet n° 119 155*, Pologne, **1982**.
- [30] Pétrier C., Jeunet A., Luche J.-L., Reverdy G., *J. Am. Chem. Soc.*, **1992**, 114, p. 3148.
- [31] Connors T. F., Rusling J. F., *Chemosphere*, **1984**, 13, p. 415.
- [32] Trabelsi F., *Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse*, **1995**.
- [33] Trabelsi F., Ait-Lyazidi H., Berlan J., Fabre P.-L., Delmas H., Wilhelm A.-M., *Ultrasonics*, **1996**, 3, p. 125.
- [34] Trabelsi F., Ait-Lyazidi H., Berlan J., Fabre P.-L., Delmas H., Wilhelm A.-M., *Chem. Eng. Sci.*, **1996**, 51, p. 1857.

4. Électrodépollution : traitement électrochimique des eaux résiduaires chargées en matières organiques toxiques

Didier Gandini, Christos Comminellis, Noureddine Belhadj Tahar, André Savall

1. Introduction

Le traitement des eaux résiduaires chargées en matières organiques pose un important problème dans l'industrie chimique. Ces vingt dernières années, des efforts croissants ont été fournis par les industriels pour limiter ces pollutions à la source par l'amélioration des procédés, le recyclage des produits et la maîtrise du traitement des déchets dès leur production.

Lorsqu'une industrie est confrontée à un problème de traitement d'effluents, une réflexion multiple est nécessaire car la méthode universelle et simple n'existe pas. Les rejets industriels présentent des caractéristiques physico-chimiques, biologiques et écologiques très variables. Cette extrême diversité explique les efforts consentis actuellement par les industriels dans la recherche de technologies de traitement appropriées à chaque situation. Des méthodes physico-chimiques, électrochimiques et biologiques sont étudiées et leur couplage est souvent envisagé.

Si l'électrochimie a prouvé son efficacité dans les procédés de destruction d'effluents aussi nocifs que les cyanures par oxydation [1], ou encore la récupération de métaux lourds par réduction cathodique [2], elle peut aussi apporter sa contribution pour le traitement des solutions aqueuses chargées en matières organiques sous forme d'un :

- i) prétraitement avant un traitement biologique, pour transformer les composés non biocompatibles en produits biodégradables,
- ii) traitement final pour l'oxydation complète des composés organiques en dioxyde de carbone.

2. Mécanisme d'oxydation électrochimique des composés organiques en solution aqueuse

Le processus d'oxydation électrochimique d'un composé organique R est précédé par une étape de transport par diffusion-convection du réactif en solution (R_{sol}) puis