

# Influence des paramètres hydrodynamiques sur le transfert de matière dans un liquide en écoulement pulsé dans une cathode cylindrique

A. GADRI\*, A. RATEL

*Ecole Nationale, d'Ingénieurs de Gabès, rte Medenine 6029 Gabès, Tunisie*

G. LACOSTE

*ENSIGC, Chemin de la Loge, 31078 Toulouse, France*

Received 7 April 1997; revised 1 December 1997

L'étude de transfert de matière dans un liquide traversant un tube cylindrique sous un régime d'écoulement pulsé a été d'abord menée expérimentalement pour différentes valeurs de paramètres caractérisant les conditions hydrodynamiques et en mettant en oeuvre la réduction électrochimique de l'ion ferricyanure à une électrode de nickel dans la soude 1M. L'expérience montre que la surimposition de la pulsation à l'écoulement permanent favorise le transfert de matière à la paroi et améliore donc la productivité du réacteur électrochimique. Il est également à noter que cette amélioration est d'autant plus importante que la vitesse moyenne de percolation est initialement faible. Par ailleurs, l'amplitude de pulsation et la fréquence jouent des rôles équivalents dans ce processus. Nous proposons dans cet article une solution analytique approchée à l'équation de diffusion-convection. Elle permet de prévoir l'accroissement de courant par rapport au régime d'écoulement stationnaire. Les résultats théoriques et expérimentaux s'accordent d'une manière assez satisfaisante.

Mots clés: *réacteur électrochimique, tube, écoulement pulsé, transfert de matière*

Mass transfer in a pulsed liquid flowing through a cylindrical tube, which constitutes the cathode of an electrochemical reactor, is studied for different values of the parameters characterising the hydrodynamic conditions. The reduction of the hexacyanoferrate(III) ion in 1 M sodium hydroxide at a nickel cathode is used. The experiments show that superimposing pulsation on a mean steady flow enhances the mass transfer rate at the wall and this increases the reactor productivity. Furthermore, we have noticed that the smaller the initial mean flow rate, the greater the enhancement. On the other hand, we have also noticed that amplitude and frequency of the pulsation play similar roles. Finally, an approximate analytical solution proposed for the convection–diffusion equation allows prediction of the extent of mass transfer enhancement with pulsation parameters. The agreement between this prediction and experimental data is satisfactory.

Keywords: *electrochemical reactor tube, pulsating flow, mass transfer enhancement*

## Nomenclature

$a$	amplitude de pulsation (m)	$I_0$	intensité totale de courant sans pulsation (A)
$C_A$	concentration de l'espèce A ( $\text{mol m}^{-3}$ )	$I_p$	intensité totale moyenne avec pulsation (A)
$C_{A\infty}$	concentration de l'espèce loin de l'électrode ( $\text{mol m}^{-3}$ )	$J_n$	fonction de Bessel de première espèce d'ordre $n$
$D_A$	coefficient de diffusion de l'espèce électroactive ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )	$k$	paramètre ( $k = (\omega/\nu)^{0.5}$ ) ( $\text{m}^{-1}$ )
$F$	nombre de Faraday = 96487 ( $\text{C mol}^{-1}$ )	$L$	longueur du réacteur tubulaire (m)
$f$	fréquence de pulsation ( $\text{s}^{-1}$ )	$P(t)$	gradient pariétal de la vitesse à la paroi du tube ( $\text{s}^{-1}$ )
$i$	nombre complexe imaginaire	$R$	rayon du tube (m)
$I$	courant d'électrolyse (A)	$\text{Re}(x)$	partie réelle du complexe $x$
		$r$	coordonnée radiale dans le tube (m)
		$Sc$	nombre de Schmidt

\* Author to whom all correspondence should be directed.

$T$	période de pulsation (s)	$x_0, x_1$	paramètres définis selon la relation 2 ( $\text{m s}^{-2}$ )
$t$	temps (s)	$y$	coordonnée radiale ( $y = R-r$ ) (m)
$t_i$	temps d'inversion de l'écoulement dans le tube (s)	$z$	coordonnée longitudinale dans le tube (m)
$v$	vitesse débitante instantanée de l'électrolyte ( $\text{m s}^{-1}$ )	<i>Symboles grecs</i>	
$v_0$	vitesse débitante permanente de l'électrolyte ( $\text{m s}^{-1}$ )	$\omega$	pulsation ( $= 2\pi f$ ) ( $\text{rad s}^{-1}$ )
		$\nu$	viscosité cinématique ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )
		$\rho$	masse volumique ( $\text{kg m}^{-3}$ )

## 1. Introduction

L'accroissement du courant d'électrolyse dans un réacteur électrochimique résulte de l'augmentation du coefficient de transfert et/ou de la surface de contact solide/liquide. Ces considérations ont conduit à l'élaboration de diverses configurations de cellules électrochimiques dont celles aux électrodes granulaires. L'idée novatrice de ces dernières années a été de vouloir mettre à profit les avantages que peut apporter un écoulement pulsé aux procédés électrochimiques utilisant des électrodes volumiques. La supériorité des électrodes granulaires pulsées réside dans le fait que le colmatage de la phase solide est évité lors de l'électrodéposition métallique et qu'une augmentation des vitesses de transfert est induite par la pulsation liquide. Le problème majeur de ces électrodes volumiques est celui de la sélectivité et de l'efficacité. En effet, la circulation du courant et les gradients de concentration engendrent un gradient de potentiel électrique dans l'électrolyte. Olive [1], puis Olive et Lacoste [2] ont mis en évidence l'existence d'une hauteur utile d'électrode. Cette hauteur représente la fraction de hauteur totale polarisée dans les conditions requises. Quand celle-ci devient très petite, l'intérêt d'utiliser l'électrode granulaire est alors discutable. On peut alors se demander comment utiliser une électrode de grande surface et limiter le gradient de potentiel. L'utilisation d'une électrode 'en nid d'abeilles' peut apporter, à notre avis, une réponse satisfaisante à cette question. Une telle électrode est constituée d'un faisceau de tubes solidaires qui viennent s'enfiler autour d'un ensemble de tiges constituant la contre-électrode. Ainsi le courant total est la somme des courants circulant dans chaque tube, et la chute de potentiel, moins importante dans chaque élément, offre la possibilité d'utiliser une grande surface d'électrode. Dans cet article, nous présentons une étude théorique et expérimentale de l'influence des paramètres pulsatoires sur le transfert de matière à l'intérieur de l'électrolyte percolant un élément de cette électrode représenté par un tube.

## 2. Travaux antérieurs

Le phénomène de transfert de matière et de chaleur à partir d'une surface à un fluide en écoulement pulsé est d'une grande importance dans de nombreux systèmes (échangeurs, colonnes d'extraction, circulation sanguine, etc.) et l'effet de la pulsation sur la performance de ces 'réacteurs' a été étudié théoriquement [3, 4], mais aussi expérimentalement [5, 6]. L'accord

entre la théorie et les résultats expérimentaux est jugé satisfaisant [7, 8]. Cependant plusieurs résultats reportés dans la littérature ne semblent pas être en très bon accord entre eux. En effet, certains auteurs ont trouvé que le coefficient de transfert est plus grand en régime pulsé qu'en régime permanent [9, 10]. Selon West et Taylor [11], il n'y a pas d'augmentation en écoulement laminaire pulsé et l'on peut atteindre 70% d'augmentation en écoulement turbulent; Mueller [12] a trouvé en revanche que le nombre de Nusselt moyen (dans le temps et dans l'espace), en écoulement pulsé, est plus faible qu'en écoulement permanent, alors que Darling [13] a montré que les deux valeurs sont pratiquement les mêmes. Faghri *et al.* [14] ont observé que, pour de faibles fréquences, le nombre de Nusselt reste indépendant de la fréquence. Karamercan et Gainer [15] ont trouvé que l'accroissement n'a lieu que lorsque le régime est initialement transitoire. Gupta *et al.* [16], puis Saylor et Berman [17] ont fait une analyse dimensionnelle du problème, et ces derniers ont tenté d'expliquer certaines contradictions des travaux antérieurs. Tous ces résultats un peu controversés montrent bien la complexité du problème et la difficulté que l'on peut avoir à le maîtriser dans sa totalité.

Dans le cadre du présent travail, nous tentons de comparer le cas où il y a inversion de l'écoulement à celui de la non-inversion et donnons une solution analytique approchée à l'équation de bilan de matière. Celle-ci s'avère applicable dans de larges domaines du nombre de Reynolds et des paramètres de pulsation.

## 3. Etude expérimentale

### 3.1. Colonne d'étude

Le montage utilisé est représenté sur la Fig. 1.

La colonne comporte deux parties: (i) Un élément d'homogénéisation constitué d'un tube en altuglass aux extrémités duquel deux grilles retiennent un empilement de billes de verre de 4 mm de diamètre, d'une hauteur de 30 cm. Cette portion de la colonne appelée également section calmante permet d'avoir une distribution uniforme de la vitesse d'écoulement à l'entrée du réacteur; et (ii) Un réacteur constitué d'un tube en acier inoxydable nickelé de 5 cm de diamètre intérieur emboîté aux deux extrémités dans deux bouts de tubes PVC, d'une anode constituée d'un fil de platine de 1 mm de diamètre et placé sur l'axe de la cathode et d'une sonde plongeant dans la solution traversant le tube et reliée à une électrode de référence au calomel saturé (ECS). Un Tube en Altuglass (TM)

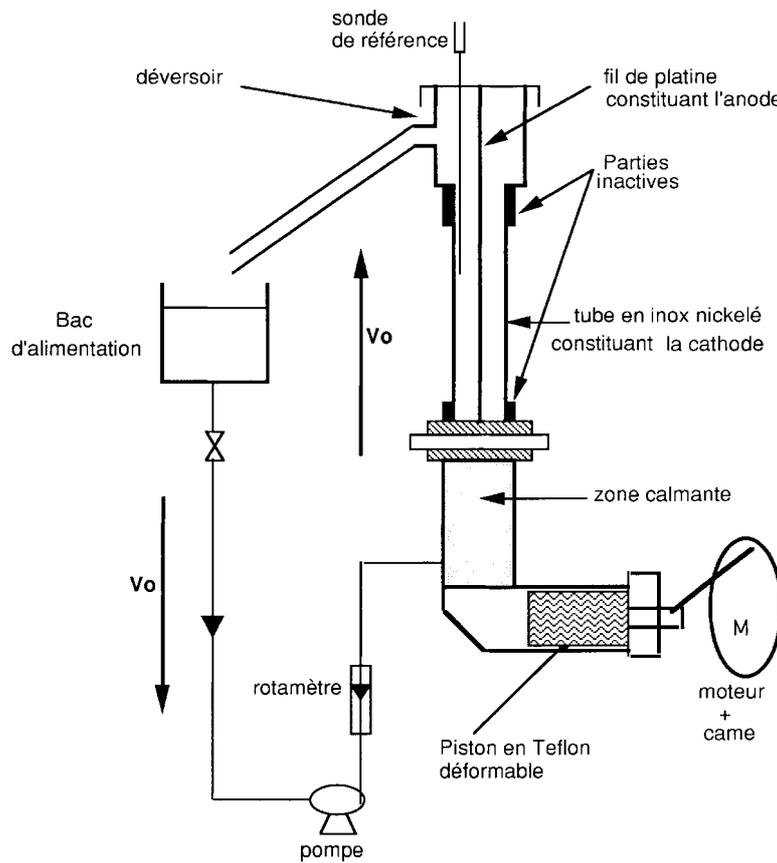


Fig. 1. Schéma du montage expérimental.

de diamètre intérieur connu et comportant un déversoir permet le retour de la solution au bac d'alimentation.

### 3.2. Système de pulsation

Le piston est en Teflon (TM) déformable. Il est actionné par un moteur dont la vitesse de rotation est réglée par un variateur de fréquence. Une came permet de transformer le mouvement de rotation du moteur en un mouvement de translation sinusoïdal du piston. La course du piston est également réglable de 0 à quelques centimètres et la mesure du déplacement du liquide dans la partie supérieure de la colonne permet le calcul de l'amplitude de pulsation du liquide dans le réacteur. La période est calculée à partir du temps correspondant à plusieurs cycles.

### 3.3. Les appareils de mesure

Un potentiostat permet d'imposer le potentiel de la cathode par rapport à l'électrode de référence. Le courant d'électrolyse est mesuré à travers une résistance placée dans le circuit de l'électrode auxiliaire. La différence de potentiel aux deux bornes de cette résistance est enregistrée à l'aide d'une table traçante.

### 3.4. Conditions de l'étude

L'expérimentation a été faite en mettant en oeuvre la réduction de l'ion  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$  en régime de diffusion

stationnaire à température ambiante. Le système  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}/\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$  en milieu  $\text{NaOH}$  1N se comporte comme un système réversible sur une surface de nickel [18] et à  $-400$  mV vs ECS, la réduction de  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$  à la cathode est limitée par la diffusion. L'électrolyte utilisé, dont les propriétés physico-chimiques sont rassemblées dans le Tableau 1, est une solution de soude normale contenant l'hexacyanoferrate (III) et (II) de potassium aux concentrations respectives de  $10^{-3}$  M et 0.125 M.

La concentration élevée de  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$  devant celle de  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$  permet, malgré la très petite surface de l'anode devant celle de la cathode, aux concentrations des deux espèces de demeurer constantes dans le circuit du liquide fermé.

Les paramètres liés à l'hydrodynamique ont été variés comme suit:

- La vitesse moyenne de percolation ( $V_0$ ), entre 1.3 et 17.2  $\text{mm s}^{-1}$  ce qui correspond à un nombre de Reynolds compris entre 65 et 868 environ
- L'amplitude de la pulsation ( $a$ ), de 0 jusqu'à 4.5 cm environ.
- La fréquence de la pulsation ( $f$ ), entre 0.3 et 2 Hz

Tableau 1. Propriétés de la solution de  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}/\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$  dans la soude normale à température ambiante

Masse volumique / $\text{kg m}^{-3}$	1076
Viscosité dynamique / $\text{Pa s}$	0.00107
Coefficient de diffusion / $\text{m}^2\text{s}^{-1}$	$0.64 \times 10^{-9}$
Viscosité cinématique / $\text{m}^2\text{s}^{-1}$	$0.99 \times 10^{-6}$

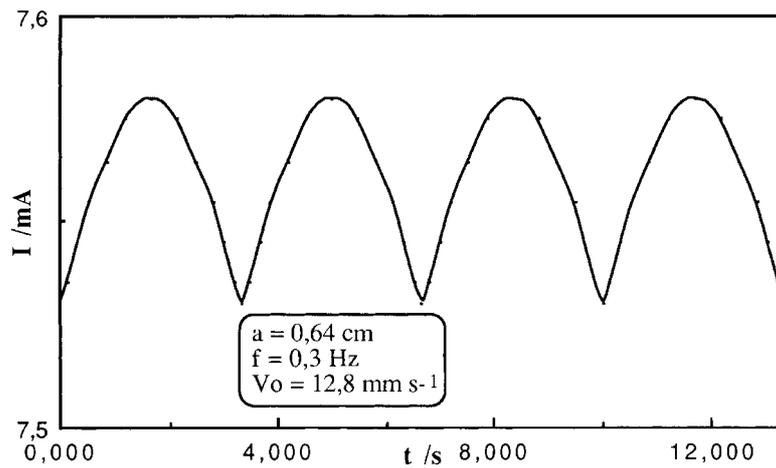


Fig. 2. Variation du courant en fonction du temps: cas d'inversion de vitesse. ( $a = 0.64$  cm;  $f = 0.3$  Hz;  $V_o = 12.8$  mm s<sup>-1</sup>).

#### 4. Résultats expérimentaux

Les deux exemples de courbes représentés sur les Figs 2 et 3 montrent la variation du courant d'électrolyse au cours du temps en régime d'écoulement pulsé. On remarque que le courant suit une variation périodique, et de période égale à celle de la pulsation hydrodynamique. Dans le cas de non-inversion de vitesse ( $a\omega < V_o$ ), le signal comporte deux extrémums par période; il en comporte quatre par période dans le cas contraire. Signalons que ce phénomène a été observé par Ratel [19] pour l'électrode poreuse percolée pulsée (E3P).

Le signal a été enregistré sous différentes conditions opératoires. Pour illustrer l'apport de la pulsation hydrodynamique sur le transfert de matière à l'électrode, nous avons porté sur les Figs 4. et 5 le rapport  $(I_p - I_o)/I_o$  en fonction de la fréquence puis en fonction de l'amplitude de pulsation. On constate alors une importante amélioration du transfert pouvant atteindre 600% par rapport au régime d'écoulement stationnaire.

A titre d'exemple, le coefficient de transfert moyen passe de la valeur  $5 \times 10^{-6}$  m s<sup>-1</sup> en régime laminaire non pulsé ( $Re = 650$ ) à  $3 \times 10^{-4}$  m s<sup>-1</sup> en régime pulsé

avec une amplitude de pulsation de 4.5 cm et une fréquence de 2 Hz environ. Contrairement aux résultats de travaux publiés [5, 20], cette amélioration n'est pas conditionnée par l'inversion de l'écoulement; et comme le montre la Fig. 6, elle est d'autant plus importante que la vitesse moyenne d'écoulement est faible. Par ailleurs et dans tous les cas, le gain de transfert semble être asymptotique et tendre vers une limite au-delà de laquelle le courant demeurerait constant même si l'on continuait à augmenter la fréquence ou l'amplitude.

#### 5. Développement mathématique

Une étude hydrodynamique nous a permis d'établir l'expression de vitesse  $V(r,t)$ . L'analyse de cette solution montre que l'inversion de l'écoulement n'a pas lieu au même instant en tout point du tube, notamment au voisinage de la paroi, ce qui rend difficile la résolution de l'équation de diffusion-convection écrite en régime quasi-stationnaire (le terme d'accumulation étant négligé)

$$V_z(r) \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_A \left( \frac{\partial^2 C_A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) \quad (1)$$

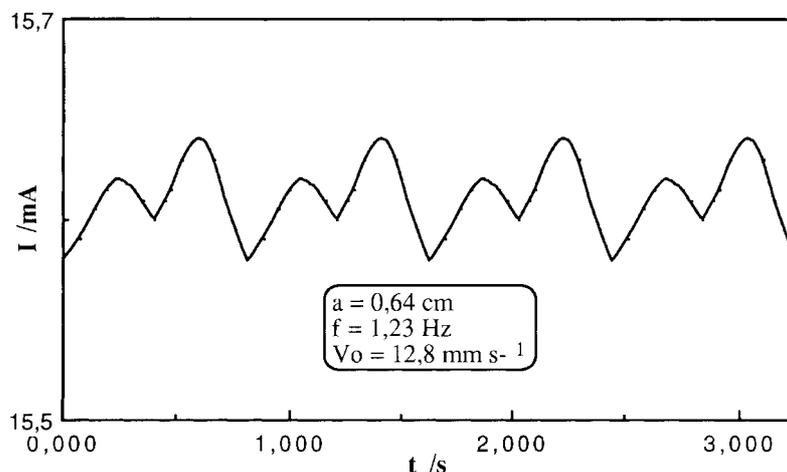


Fig. 3. Variation du courant en fonction du temps: cas de non-inversion de vitesse. ( $a = 0.64$  cm;  $f = 1.23$  Hz;  $V_o = 12.8$  mm s<sup>-1</sup>).

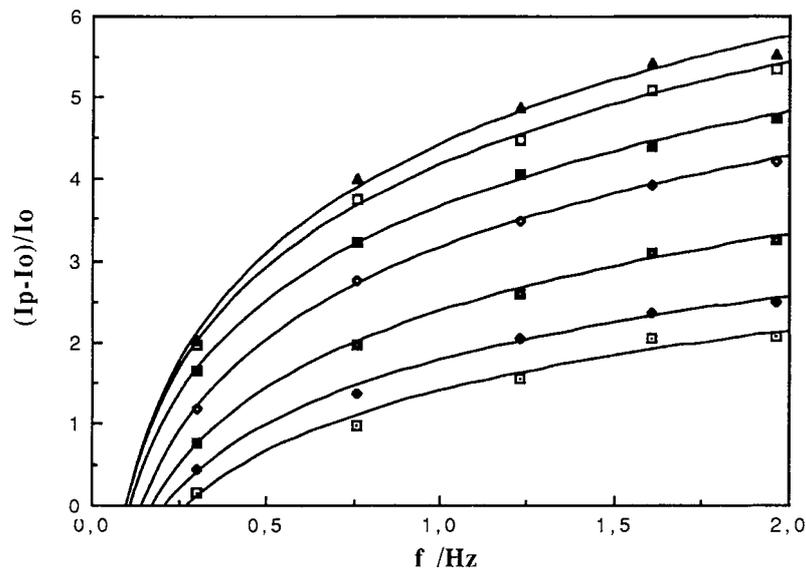


Fig. 4. Variation du gain relatif en fonction de la fréquence ( $V_o = 17.2 \text{ mm s}^{-1}$ ). Légende: ( $\square$ )  $a = 0.38 \text{ cm}$ ; ( $\blacklozenge$ )  $a = 0.64 \text{ cm}$ ; ( $\blacksquare$ )  $a = 1.02 \text{ cm}$ ; ( $\blacklozenge$ )  $a = 1.79 \text{ cm}$ ; ( $\blacksquare$ )  $a = 2.56 \text{ cm}$ ; ( $\square$ )  $a = 3.46 \text{ cm}$ ; ( $\blacktriangle$ )  $a = 4.48 \text{ cm}$ .

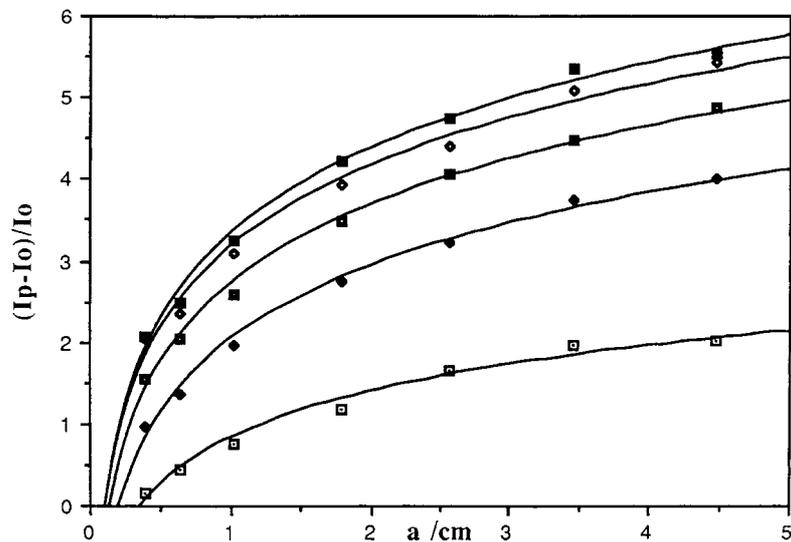


Fig. 5. Variation du gain relatif en fonction de l'amplitude ( $V_o = 17.2 \text{ mm s}^{-1}$ ). Légende ( $\square$ )  $f = 0.3 \text{ Hz}$ ; ( $\blacklozenge$ )  $f = 0.76 \text{ Hz}$ ; ( $\blacksquare$ )  $f = 1.23 \text{ Hz}$ ; ( $\blacklozenge$ )  $f = 1.61 \text{ Hz}$ ; ( $\blacksquare$ )  $f = 1.96 \text{ Hz}$ .

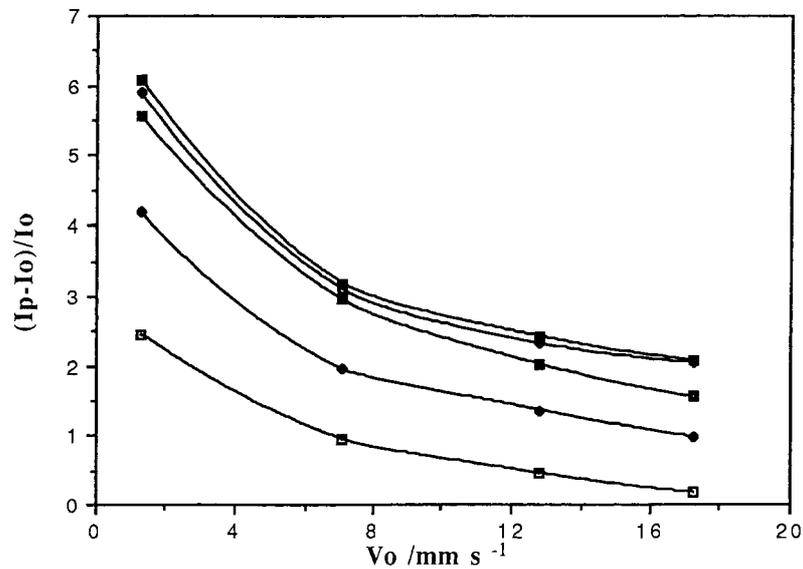


Fig. 6. Variation du gain relatif en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement ( $a = 0.38 \text{ cm}$ ). Légende ( $\square$ )  $f = 0.3 \text{ Hz}$ ; ( $\blacklozenge$ )  $f = 0.76 \text{ Hz}$ ; ( $\blacksquare$ )  $f = 1.23 \text{ Hz}$ ; ( $\blacklozenge$ )  $f = 1.61 \text{ Hz}$ ; ( $\blacksquare$ )  $f = 1.96 \text{ Hz}$ .

avec  $C_A = 0$  à  $r = R$  pour tout  $z$ .

En effet dès qu'une inversion se produit, il faut changer les conditions aux limites:

La condition

$C_A = C_{A\infty}$  à  $z = 0$  pour tout  $t \geq t_i$  et pour tout  $r$  devient

$C_A = C_A(t_i - dt)$  à  $z = L$  pour tout  $t \geq t_i$  et pour tout  $r$ .

Le  $t_i$  désignant le temps d'inversion

En conséquence, il est nécessaire d'associer à la méthode de Runge-Kutta la méthode de tir. Cependant, un tel algorithme augmenterait très fortement le temps de calcul sur un microordinateur de type PC. C'est pourquoi, nous avons opté pour une solution analytique approchée.

Pour cela, on suppose que le profil de vitesse est linéaire dans la couche limite de diffusion puisqu'elle est très mince comparée à la couche limite hydrodynamique. Cette hypothèse est légitime lorsque le nombre de Schmidt est élevé (Dans notre cas,  $Sc \approx 1500$ ).

### 5.1. Etablissement de la vitesse linéarisée

En tenant compte de la solution de l'équation de mouvement dans le cas d'oscillations forcées [21–23], on déduit que, si le gradient de pression, en variable complexe, peut se mettre sous la forme,

$$-\frac{\partial P}{\partial z} = \rho(x_0 + x_1 e^{i\omega t}) \quad (2)$$

l'expression complexe de la vitesse s'écrit:

$$V = V_{\max} \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) - i\omega \left(1 - \frac{J_0(kri^{3/2})}{J_0(kRi^{3/2})}\right) e^{i\omega t} \quad (3)$$

où  $k = \sqrt{\omega/\nu}$  et  $J_0$  désigne la fonction de Bessel de première espèce et d'ordre zéro.

On pose  $y = R - r$

La vitesse linéarisée s'écrit  $V_z = P(t) y$   
 $P(t)$ , pente de la vitesse à la surface du cylindre ( $r = R$ ), ne dépend que du temps. Par ailleurs, selon [24]

$$J'_n(z) = \frac{n}{z} J_n(z) - J_{n+1}(z)$$

pour  $n$  entier, et ainsi  $J'_0 = -J_1$

$J_1$  est la fonction de Bessel de première espèce et d'ordre 1

On a alors:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)_{y=0} &= -\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)_{r=R} \\ &= \frac{2V_{\max}}{R} - i\omega k i^{3/2} \left(1 - \frac{J_1(kRi^{3/2})}{J_0(kRi^{3/2})}\right) e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (4)$$

En prenant la partie réelle de cette expression, on obtient pour  $V$ :

$$V(y, t) = \left\{ \frac{2V_{\max}}{R} - a\omega \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \left[ \cos \frac{3\pi}{4} (A \cos \omega t + B \sin \omega t) + \sin \frac{3\pi}{4} (A \cos \omega t - B \sin \omega t) \right] \right\} y \quad (5)$$

avec

$$A = \frac{\operatorname{Re}(j_1(kRi^{3/2})) \operatorname{Re}(j_0(kRi^{3/2}))}{\left(\operatorname{Re}(j_0(kRi^{3/2}))\right)^2 + \left(\operatorname{Im}(j_0(kRi^{3/2}))\right)^2} + \frac{\operatorname{Im}(j_1(kRi^{3/2})) \operatorname{Im}(j_0(kRi^{3/2}))}{\left(\operatorname{Re}(j_0(kRi^{3/2}))\right)^2 + \left(\operatorname{Im}(j_0(kRi^{3/2}))\right)^2}$$

et

$$B = \frac{\operatorname{Im}(j_1(kRi^{3/2})) \operatorname{Re}(j_0(kRi^{3/2}))}{\left(\operatorname{Re}(j_0(kRi^{3/2}))\right)^2 + \left(\operatorname{Im}(j_0(kRi^{3/2}))\right)^2} - \frac{\operatorname{Re}(j_1(kRi^{3/2})) \operatorname{Im}(j_0(kRi^{3/2}))}{\left(\operatorname{Re}(j_0(kRi^{3/2}))\right)^2 + \left(\operatorname{Im}(j_0(kRi^{3/2}))\right)^2}$$

où  $\operatorname{Re}$  et  $\operatorname{Im}$  désignent respectivement la partie réelle et la partie imaginaire de la fonction de Bessel.

La Fig. 7 illustre la variation temporelle de la pente de la vitesse à la paroi du tube au cours d'une période.

### 5.2. Concentration et courant d'électrolyse

En négligeant par la suite le terme  $(1/r) \partial C_A / \partial r$  devant  $\partial^2 C_A / \partial r^2$  au voisinage de l'électrode cylindrique l'équation 1 devient alors:

$$P(t) y \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_A \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} \quad (6)$$

les conditions aux limites sont:

$$\begin{aligned} -C_A &= 0 & \text{à } y = 0 \text{ pour tout } z > 0 \\ -C_A &= C_{A\infty} & \text{à } y \rightarrow R \text{ pour tout } z > 0 \\ -C_A &= C_{A\infty} & \text{à } z = 0 \text{ pour tout } y \geq 0 \end{aligned}$$

Cette équation admet pour solution:

$$\frac{C_A}{C_{A\infty}} = \frac{1}{\Gamma(4/3)} \int_0^\eta \exp(-x^3) dx \quad (7)$$

avec

$$\eta = \left(\frac{P(t)}{9D_A Z}\right)^{1/3} y$$

et  $\Gamma(4/3)$  est égal à 0.892979.

Le courant est alors obtenu à partir de l'équation 7. En effet,

$$\left(\frac{\partial C_A}{\partial y}\right)_{y=0} = \frac{C_{A\infty}}{\Gamma(4/3)} \left(\frac{P(t)}{9D_A Z}\right)^{1/3} \quad (8)$$

et le courant total d'électrolyse est alors calculé à l'aide de l'expression suivante:

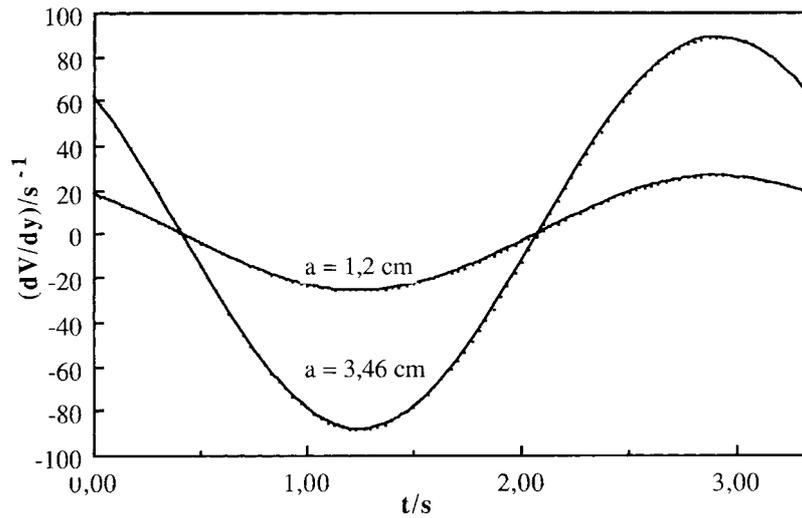


Fig. 7. Evolution temporelle de la pente de la vitesse à la paroi au cours d'une période. ( $V_o = 1.3 \text{ mm s}^{-1}$ ;  $f = 0.3 \text{ Hz}$ ).

$$I = \int_0^L dI = \int_0^L -FD_A \left( \frac{\partial C_A}{\partial y} \right)_{y=0} 2\pi R dz \quad (9)$$

soit, en tenant compte de l'expression du gradient pariétal de concentration,

$$I = \frac{-3F\pi R D_A^{3/2} C_{A\infty}}{2.08\Gamma(4/3)} P(t)^{1/3} L^{2/3} \quad (10)$$

Le courant moyen au cours d'une période est

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt \quad (11)$$

L'influence de la fréquence sur la valeur moyenne du courant d'électrolyse est illustrée sur la figure 8; celle de l'amplitude de pulsation est représentée sur la Fig. 9. Sur les mêmes figures, on a porté les points expérimentaux. On remarque que la théorie prédit de manière satisfaisante et sans ajustement de paramètre l'accroissement du transfert quand une pulsation est

surimposée à l'écoulement permanent. Cependant pour des valeurs élevées de fréquence et amplitude, on remarque un écart entre la théorie et les résultats expérimentaux. L'hypothèse la plus contestable, dans ce cas, serait celle qui consiste à négliger le terme de transfert convectif devant celui de la diffusion dans l'équation du bilan de matière.

**6. Conclusion**

Cet article décrit l'étude théorique et expérimentale du transfert de matière dans un liquide en écoulement laminaire pulsé dans un tube rigide. On constate que le transfert n'est pas toujours accru en surimposant une pulsation à l'écoulement permanent puisque le courant décroît et passe par un minimum pour une intensité relative de pulsation critique avant une forte croissance avec l'amplitude ou avec la fréquence. Rappelons ici que le même phénomène a été observé par Baird *et al.* [20] en transfert thermique ainsi que

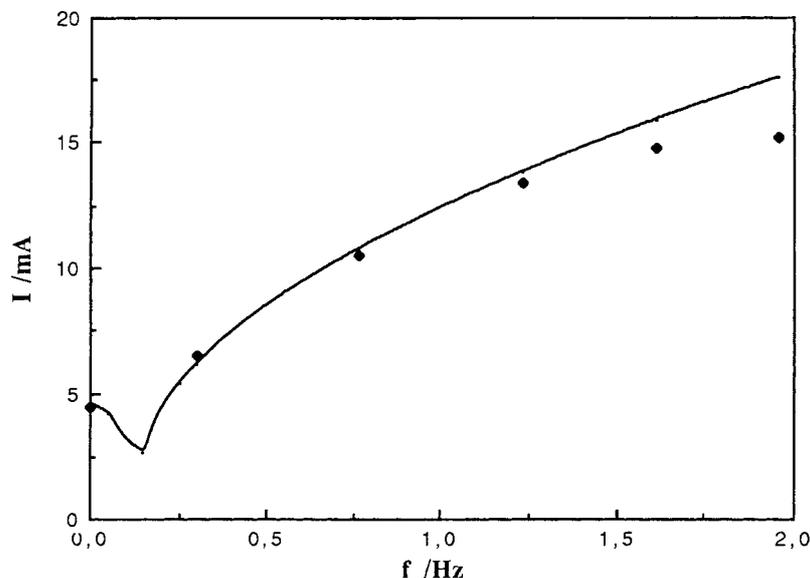


Fig. 8. Variation du courant en fonction de la fréquence ( $a = 0.38 \text{ cm}$ ;  $V_o = 12.8 \text{ mm s}^{-1}$ ). Légende: (—) modèle; (◆) expérience.

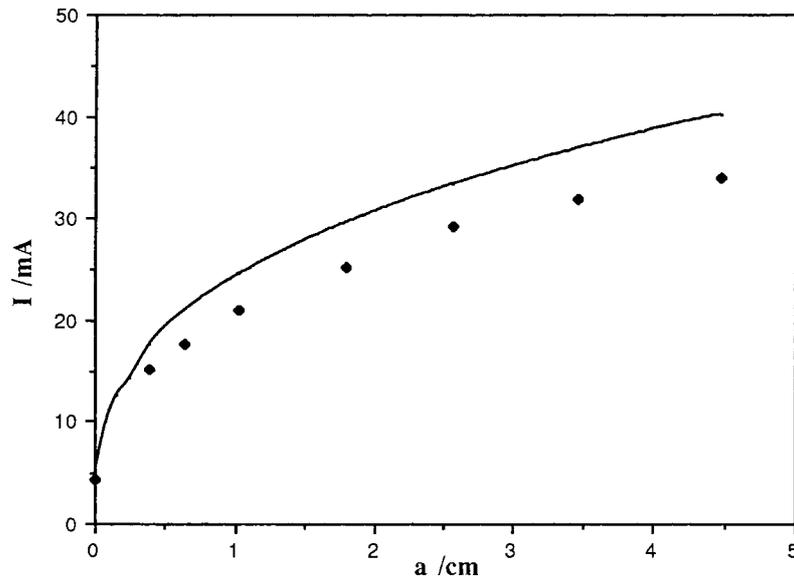


Fig. 9. Variation du courant en fonction de l'amplitude ( $f = 1.96$  Hz;  $V_o = 12.8$  mm s<sup>-1</sup>). Légende: (—) modèle; (◆) expérience.

par Ratel [25] en transfert de matière. Cependant l'inversion de vitesse n'est pas une condition nécessaire pour l'accroissement du transfert comme il a été indiqué par Michael et Hellums [5] et par Baird [20]. On remarque également que le modèle décrit convenablement le phénomène puisque les valeurs expérimentales du courant sont très proches des valeurs calculées; néanmoins lorsque la fréquence augmente les valeurs mesurées de courant s'écartent des résultats du calcul et l'écart relatif peut atteindre 15%.

## Références

- [1] H. Olive—Contribution au développement des électrodes volumiques Thèse de Docteur-Ingénieur de l'INP Toulouse, France (1978).
- [2] H. Olive and G. Lacoste, *L'onde électrique* **59** (1979) 91.
- [3] E. B. Fagela-Alabastro and J. Hellums, *AIChE J.* **15** (1969) 164.
- [4] G. Fortuna and T. J. Hanratty, *Int. J. Heat Mass Transfer* **14** (1971) 1499.
- [5] W. J. Mc. Michael and J. D. Hellums, *AIChE J.* **21** (1975) 743.
- [6] T. J. Pedley, *J. Fluid Mech.* **78** (1976) 513.
- [7] R. D. Patel, J. J. Mac Feeley and K. R. Jolls, *AIChE J.* **21** (1975) 259.
- [8] R. C. Ackerberg, R. D. Patel and S. K. Gupta, *J. Fluid Mech.* **86** (1978) 49.
- [9] R. C. Martinelli, L. M. Boelter, E. B. Weinberg and S. Yakahi, *Trans. ASME* **65** (1943) 789.
- [10] R. Lemlich, *Chem. Eng.* **68** (1961) 171.
- [11] F. B. West and A. T. Taylor, *Chem. Eng. Progress.* **48** (1952) 39.
- [12] W. K. Mueller, Proc. Fifth Midwestern Conf. Fluid Mech., Ann Arbor (1957) 146.
- [13] G. B. Darling, *Petroleum* **22** (1959) 177.
- [14] M. Faghri, K. Javdani and A. Faghri, *Lett. Heat Mass Trans.* **6** (1979) 259.
- [15] O. E. Karamercan and J. Gainer, *Ind. Eng. Chem. Fundam.* **18** (1979) 12.
- [16] S. K. Gupta, R. Patel and R. Ackerberg, *Chem. Eng. Sci.* **37** (1982) 1727.
- [17] R. D. Saylor and J. Berman, *Chem. Eng. Comm.* **52** (1987) 215.
- [18] D. J. Tagg, M. A. Patrick and A. A. Wragg, *Trans. IChemE* **57** (1979) 12.
- [19] A. Ratel, Etude des réacteurs électrochimiques à électrodes poreuses percolées par un écoulement pulsé. Thèse d'état-INP Toulouse France (1987).
- [20] M. Baird, G. Duncan, J. Smith and J. Taylor, *Chem. Eng. Sci.* **21** (1966) 97.
- [21] P. Lambossy, *Helv. Physica Acta* **25** (1952) 371.
- [22] J. R. Womersley, *J. Physiol.* **127** (1955) 553.
- [23] H. Schlichting, 'Boundary Layer Theory', McGraw-Hill, New York (1968).
- [24] N. Gastinel, 'Mathématiques pour l'informatique', Armand Colin, Paris (1970).
- [25] A. Ratel, P. Duverneuil et G. Lacoste, *J. Appl. Electrochem.* **18** (1988) 394.