

TECHNICAL NOTES

Transfert de matière global et local entre un jet liquide et des disques circulaires

A. BENSMAILIF et F. COEURET

Laboratoire de Génie des Procédés, C.N.R.S.-E.N.S.C.R., Avenue du Général Leclerc,
35700 Rennes-Beaulieu, France

(Received 20 November 1989 and in final form 25 January 1990)

1. INTRODUCTION

SI DE NOMBREUX travaux se sont rapportés au transfert de matière (ou de chaleur) entre un jet circulaire, immergé ou non immergé, et une surface solide recevant perpendiculairement ce jet, c'est surtout le cas des fluides gazeux—et donc des jets immergés—qui a reçu la majeure attention [1]. Le bombardement de surfaces solides par des jets liquides a aussi quelques applications industrielles, et principalement dans l'industrie des traitements de surface (gravure des circuits imprimés, électro-polissage, électro-usinage, dépôt électrolytique). C'est la raison pour laquelle il est intéressant de maîtriser le transfert de matière entre jet liquide et paroi solide. Pour des études expérimentales de cette question, la méthode électrochimique de mesure des coefficients de transfert de matière [2] est incontestablement la plus aisée à mettre en oeuvre, la plus précise, la plus reproductible, et elle a l'avantage de permettre des mesures locales.

Quelques auteurs seulement ont utilisé cette méthode électrochimique pour l'étude du transfert de matière global jet-paroi solide [3-6] et, si l'influence séparée de paramètres comme la hauteur du jet, le diamètre de la surface de transfert circulaire et la vitesse de sortie du jet, a été recherchée, l'étude de l'influence du diamètre du jet ne semble pas avoir été abordée. Des corrélations empiriques ou semi-empiriques ont été établies par les auteurs; elles sont rassemblées au Tableau 1, où les domaines correspondants de variation des paramètres ont également été précisés.

Il est bien connu, par ailleurs, que l'hydrodynamique correspondant à l'impact d'un jet (Fig. 1(a)) est telle que le transfert est maximum dans la zone du point d'arrêt pour décroître ensuite dans la zone correspondant au jet rasant. Cependant, seul Kataoka *et al.* [6] semblent avoir fait des mesures électrochimiques de caractère local pour confirmer une telle évolution spatiale du transfert, mais ils ne font pas de comparaison quantitative de leurs résultats avec des corrélations de la littérature.

Dans le cadre d'un travail consacré au transfert de matière lors de l'impact de jets multiples [7], nous avons été amenés à effectuer des déterminations électrochimiques de coefficients de transfert de matière globaux et locaux entre un jet circulaire et une surface solide, en faisant varier en particulier le diamètre du jet. Le but du présent article est de rapporter ces résultats et de les intégrer dans le contexte de la littérature sur la question.

2. PARTIE EXPERIMENTALE

Les jets cylindriques (immergés ou non immergés), de diamètre d , sont issus de distributeurs en plexiglass de

2×10^{-2} m d'épaisseur et tombent verticalement sur des disques circulaires de rayon R (Fig. 1(a)). Le réacteur et l'ensemble du dispositif expérimental sont ceux précédemment utilisés par Nanzer *et al.* [8] dans leurs études relatives aux jets multiples. Les coefficients de transfert de matière locaux et globaux entre les jets et les disques sont mesurés par la méthode électrochimique qui utilise la réduction de $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ en $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$; le liquide des jets est un mélange de ferricyanure de potassium 0,005 M et de ferrocyanure de potassium 0,05 M dans la soude 0,5 M. Les expériences ont lieu à 30°C. Le liquide (ou électrolyte) circule en circuit fermé au-travers d'un réservoir (où est effectuée la régulation de température), d'une pompe centrifuge, d'une batterie de rotamètres et du réacteur lui-même où est réalisé le jet. L'évacuation du liquide par déversement à partir de la partie haute ou de la partie basse du réacteur permet d'opérer sur des jets immergés ou sur des jets non-immergés.

Le coefficient de transfert de matière global, k_d , ou local, k_d , est obtenu à partir de l'intensité I_L du courant limite réactionnel à la surface de transfert (électrode) considérée sous le jet de surface A_s , et de la concentration C_0 en ions ferricyanure, au travers de l'expression :

$$k_d(\text{ou } k_d) = \frac{I_L}{FA_s C_0} \quad (1)$$

La concentration C_0 , qui reste en principe constante dans la méthode mise en jeu, est connue exactement par dosage ampérométrique sur électrode à disque tournant de platine à l'aide d'un sel de cobalt.

Pour les études de transfert global, les surfaces de transfert (cathodes) sont des disques de cuivre, délimités sur des plaques de circuit imprimé, et nickelés électrolytiquement. Comme le montre la Fig. 1(b), chaque disque de rayon R (0,01; 0,015 et 0,024 m) est avoisiné par une petite surface, de même matériau que le disque, et qui sert d'électrode de référence dans la méthode électrochimique.

Les études de transfert local utilisent un disque circulaire de nickel, de diamètre 9×10^{-2} m, et qui porte (voir Fig. 1(c)) 35 microélectrodes circulaires en nickel (diamètre 4×10^{-4} m), régulièrement espacées de 2×10^{-3} m suivant deux rayons R_1 et R_2 perpendiculaires. Suivant R_1 les microélectrodes sont numérotées de 1 à 17, la microélectrode 18 étant au centre du disque, tandis que suivant R_2 les lettres A à Q désignent les microélectrodes. La microélectrode 18 est donc juste située au point d'arrêt O. La surface de ce disque de nickel est polie au papier à l'eau puis à la pâte diamant.

Les jet cylindriques ont respectivement pour diamètres $d = 0,003$; 0,0036; 0,005; 0,01 et 0,015 m. Le débit de liquide, qui a été varié de $4,4 \times 10^{-6}$ à $3,3 \times 10^{-4}$ m³ s⁻¹, est, comme en [8], uniformisé par une section calmante disposée en amont du distributeur. Ceci correspond à une variation du nombre de Reynolds de sortie des jets $Re = \bar{u}d/\nu$ entre 2000 et 30000. Les données physico-chimiques à 30°C sont

† Adresse actuelle: Institut de Chimie Industrielle, U.S.T.H.B., B.P. 32, El Alia, Bab Ezzouar, Algérie.

NOMENCLATURE

A_e	aire de la surface de transfert [m^2]	Sc	nombre de Schmidt, ν/D
C_0	concentration des ions ferricyanure [$mol\ m^{-3}$]	Sh	nombre de Sherwood local, $k_d d/D$
d	diamètre du jet [m]	Sh^0	valeur de Sh au point d'arrêt
d_m	diamètre de la microélectrode [m]	\bar{Sh}	nombre de Sherwood global, $\bar{k}_d d/D$
D	coefficient de diffusion moléculaire des ions ferricyanure [$m^2\ s^{-1}$]	u	vitesse axiale de l'écoulement au point d'arrêt [$m\ s^{-1}$]
F	nombre de Faraday	\bar{u}	vitesse moyenne débitante du jet [$m\ s^{-1}$]
H	hauteur du jet [m]	x	distance radiale comptée positivement à partir du point d'arrêt [m].
I_L	intensité du courant limite de diffusion [A]	Symboles grecs	
k_d	coefficient de transfert de matière local [$m\ s^{-1}$]	ν	viscosité cinématique [$m^2\ s^{-1}$]
k_d^0	valeur de k_d au point d'arrêt	ρ	masse volumique du liquide [$kg\ m^{-3}$].
\bar{k}_d	coefficient de transfert de matière global [$m\ s^{-1}$]		
R	rayon de la cathode [m]		
Re	nombre de Reynolds de sortie des jets, $\bar{u}d/\nu$		

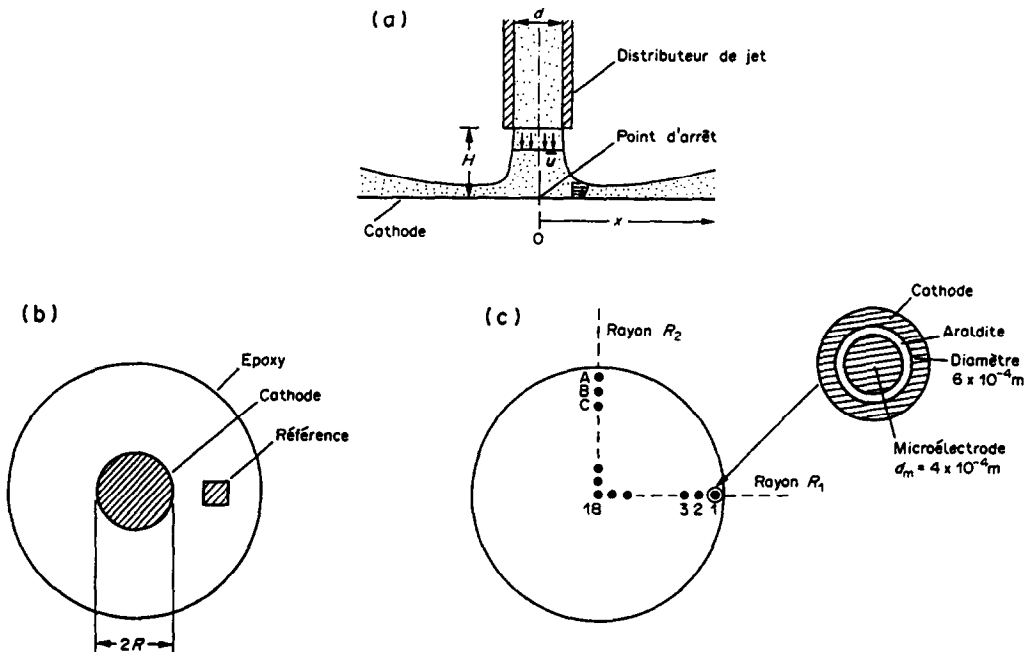


FIG. 1. Vue schématique du système jet/paroi solide et des électrodes: (a) caractéristiques du jet; (b) cathode pour le transfert de matière global; (c) cathode pour le transfert de matière local.

$8,8 \times 10^{-10} m^2\ s^{-1}$ pour le coefficient de diffusion du ferricyanure D , $9,4 \times 10^{-7} m^2\ s^{-1}$ pour la viscosité cinématique ν (donc $Sc = \nu/D = 1070$, nombre de Schmidt), $1050 kg\ m^{-3}$ pour la masse volumique ρ .

3. RESULTATS ET DISCUSSION

L'expérience a montré [7] que le transfert de matière ne dépendait pas significativement du caractère immergé ou non-immergé du jet, comme l'avaient déjà montré Hsueh et Chin [9] sur le cas des jets uniques bidimensionnels. Sauf lorsque ce sera précisé, les résultats ci-dessous correspondront à des jets immergés.

3.1. Transfert de matière global

Le rapport H/d de la hauteur H du jet à son diamètre d a été varié entre 1 et 4, tandis que R/d a été varié entre 0,33 et 4. Les résultats ont été exprimés sous la forme des variations de $\bar{Sh} = \bar{k}_d d/D$ en fonction de Re .

La Fig. 2, qui donne pour $H/D = 2$ les variations de $\bar{Sh}/(Re^{1/2} Sc^{1/3})$ en fonction de R/d , permet une comparaison

avec d'autres travaux de la littérature. On peut constater l'existence de deux domaines:

—L'un, pour $0,2 < R/d < 1$ correspondant à la zone entourant le point d'arrêt et pour lequel ce paramètre R/d est sans influence. Nos résultats se trouvent décrits par la corrélation obtenue par Chin et Tsang [5] dans le cas de jets immergés turbulents.

—L'autre, pour $1 < R/d < 4$, correspondant à la zone d'écoulement latéral, pour lequel $\bar{Sh}/(Re^{1/2} Sc^{1/3})$ décroît lorsque R/d augmente. Il y a accord quantitatif des résultats avec la corrélation semi-théorique de Chin et Hsueh [10], mais aussi avec la corrélation empirique établie par Coeuret [4] pour $0,68 < R/d < 2,7$ et des disques circulaires de petit diamètre bombardés par des jets uniques immergés de diamètre $1,1 \times 10^{-3} m$.

La Fig. 3, qui correspond au domaine $R/d < 1$, précise, pour l'ensemble de la gamme de variation du nombre de Reynolds ($2000 < Re < 30000$), le bon accord avec la corrélation de Chin et Tsang [5].

En conclusion, les résultats de transfert de matière global

Tableau 1. Corrélations de transfert de matière liquide-paroi

Auteurs	Diamètre du jet, $d \times 10^{-2}$ (m)	H/d	R/d	Re	Corrélation	Type d'écoulement	Type de corrélation
Chin et Hsueh [10]	0,476 et 0,635	0,5-5	$R/d < 0,8$ $0,8 < R/d < 4$	2500-20 000	$\overline{Sh} = 0,9 Re^{1/2} Sc^{1/3} (H/d)^{-0,09}$	jet non immergé	semi-théorique
Chin et Tsang [5]	0,318 et 0,635	0,5-5 0,2-6,0	0,1-0,5 0,1-10	2500-20 000 $Re < 2000$	$\overline{Sh} = 0,77 Re^{1/2} Sc^{1/3} (R/d)^{-1/2}$ $\overline{Sh} = 1,51 Re^{1/2} Sc^{1/3} g(Sc) (H/d)^{-0,054}$	jet immergé	semi-théorique
Coetret [4]	0,11	$H/d \leq 1,1$ 2-6	0,1-10 0,45-2,73 au point d'arrêt	$4000 < Re < 16 000^a$ 4000-50 000 turbulent*	$\overline{Sh} = 1,12 Re^{1/2} Sc^{1/3} g(Sc) (H/d)^{-0,057}$ $\overline{Sh} = 0,92 Re^{1/2} Sc^{1/3} (R/d)^{-1/2}$ $Sh = 1,016 Re^{1/2} Sc^{1/3}$	jet immergé	semi-théorique empirique théorique
Firouztale <i>et al.</i> [14]	2,54	$H/d \rightarrow \infty$	0,026 à 0,25	laminaire turbulent	$Sh = 1,04 Re^{1/2} Sc^{1/3}$ $Sh = 1,04(1 + 0,733 Re^{-1/2})^{1/2} Re^{1/2} Sc^{1/3}$	écoulement normal à un disque	semi-théorique semi-théorique

^aCorrélation tracée à la Fig. 6.
 $g(Sc) = 1 - 0,08459/Sc^{1/3} - 0,016368/Sc^{2/3} - 0,0057398/Sc + 0,0014288/Sc^{4/3} + \dots$
 $g(Sc) = 1$ pour $Sc > 1000$.

obtenus ici viennent confirmer la validité de corrélations connues et obtenues par la méthode électrochimique. Le paramètre diamètre du jet, qui est la dimension caractéristique retenue, semble être entièrement pris en compte dans les nombres adimensionnels Sh , Re , H/d et R/d .

3.2. Transfert de matière local

Les microélectrodes ont permis d'obtenir les distributions radiales des coefficients locaux de transfert de matière k_d . Deux distributions expérimentales, qui correspondent à une situation géométrique donnée, mais qui sont caractéristiques de l'ensemble des résultats, sont reportées à la Fig. 4 où elles sont comparées à la solution théorique obtenue par Kataoka et Mizushina [11], donnée graphiquement dans [6], et correspondant aux conditions de turbulence libre. On peut constater l'existence d'un maximum de transfert situé au voisinage de $x/d = 0,3$ pour $H/d = 2$, ce qui est en accord avec les résultats de Kataoka *et al.* [6] pour ce qui concerne aussi le cas d'une surface plane, bien que ce dernier travail utilise un jet ascendant, contrairement à notre présent travail qui met en oeuvre des jets descendants. Ces derniers auteurs attribuent l'existence de ce maximum à l'effet d'accélération du liquide situé dans l'espace délimité par le plan de l'orifice de sortie du jet et la surface réceptrice du jet. Quant au minimum qui apparaît autour du point d'arrêt, son existence s'accorde aussi avec les résultats des refs. [6, 9].

Le transfert de matière au point d'arrêt, c'est-à-dire au niveau de la microélectrode 18, mérite un intérêt particulier, d'autant plus que ce problème a fait l'objet d'approches théoriques. Les données expérimentales, obtenues pour $H/d = 2$, des valeurs de R/d comprises entre 0,02 et 0,05, et pour des jets immergés et non-immergés, ont été reportées à la Fig. 5 sous la forme des variations du nombre de Sherwood au point d'arrêt, $Sh^0 = k_d^0 d/D$, en fonction de Re .

Des auteurs se sont intéressés aux aspects théoriques du transfert de matière à un disque circulaire de rayon R placé perpendiculairement à un écoulement laminaire uniforme dans un tube de diamètre d [12, 13], cas reconnu comme étant l'un de ceux qui donnent lieu à des distributions uniformes des coefficients locaux de transfert (surface de transfert uniformément accessible). Cependant, comme l'ont souligné Firouztale *et al.* [14], les relations théoriques obtenues dans [12, 13] expriment que k_d varie avec la position radiale, ce qui n'est pas compatible avec les caractères de surface uniformément accessible. Comme cette situation hydrodynamique s'apparente à celle correspondant à un jet de gros diamètre d dont seule la partie centrale tombe sur une surface solide, Firouztale *et al.* ont repris ces développements théoriques et, particulièrement, la question du lien entre vitesse dans l'axe du disque, u , et vitesse moyenne de l'écoulement incident, \bar{u} . Ils ont obtenu l'expression théorique suivante :

$$\frac{k_d d}{D} = 1,20 \alpha^{1/2} \left(\frac{u}{\bar{u}}\right)^{1/2} \left(\frac{\bar{u} d}{v}\right)^{1/2} Sc^{1/3} \quad (2)$$

dans laquelle $u/\bar{u} = 2$ si le régime d'écoulement est laminaire, tandis que pour le régime turbulent u/\bar{u} serait déduit de :

$$\frac{u}{\bar{u}} = 1 + 0,733 \left(\frac{\bar{u} d}{v}\right)^{-1,8} \quad (3)$$

qui résulte de la combinaison de la distribution universelle des vitesses avec l'équation de Blasius [15]. Dans (2), k_d est bien indépendant de facteurs géométriques autres que le diamètre d du gros jet incident. C'est la raison pour laquelle (2) peut être comparé aux expressions donnant Sh^0 , c'est-à-dire le transfert de matière au point d'arrêt d'un jet liquide sur un solide.

La valeur de la constante α de (2) a été obtenue expérimentalement [14], permettant ainsi l'écriture des expressions semi-théoriques données dans le Tableau 1. Pour ce qui concerne plus précisément le cas des jets, la solution théo-

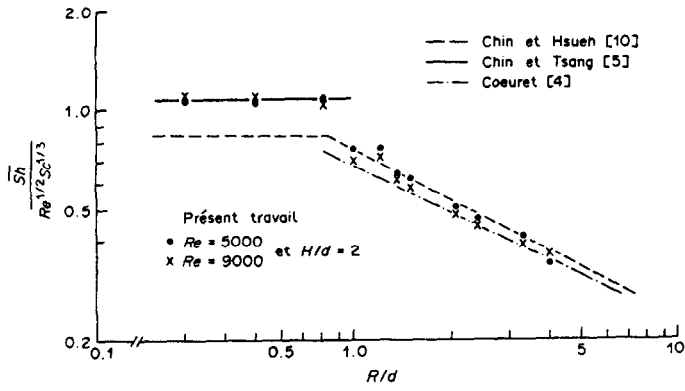


FIG. 2. Influence de R/d sur le transfert de matière global.

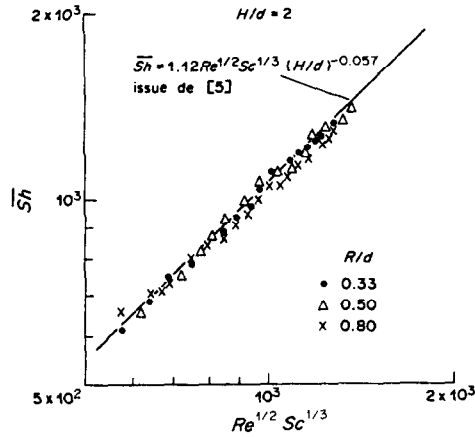


FIG. 3. Corrélation des résultats de transfert de matière global pour $H/d = 2$ et $0,33 < R/d < 1$.

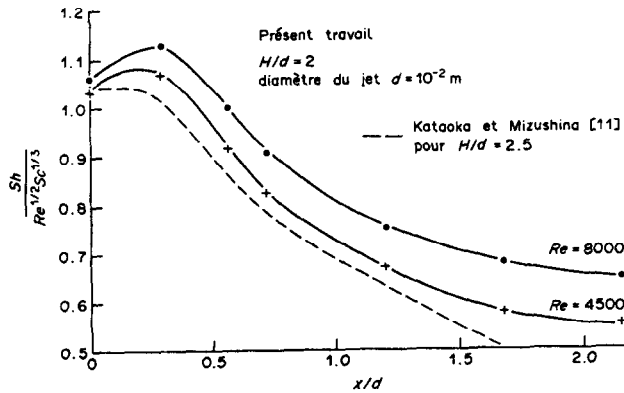


FIG. 4. Distribution radiale du nombre de Sherwood local.

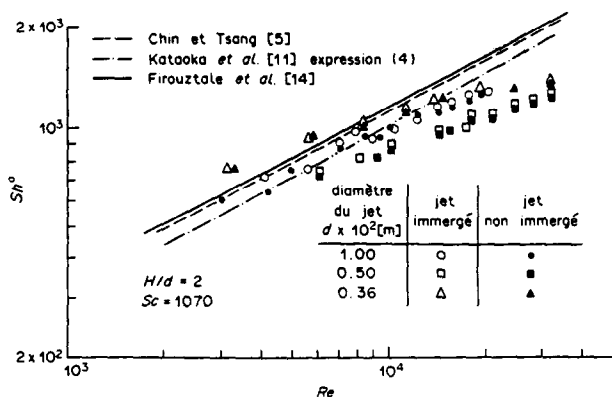


FIG. 5. Transfert de matière dans la zone du point d'arrêt. Comparaison avec d'autres données de la littérature.

rique numérique obtenue par Kataoka et Mizushina [11] pour le régime turbulent, et rapportée graphiquement dans [6], s'assimile, au point d'arrêt, à l'expression :

$$Sh^0 = 1,016 Re^{1/2} Sc^{1/3}. \quad (4)$$

Sur la Fig. 5 ont été reportées, pour $Sc = 1070$, trois corrélations correspondant au régime turbulent, dont (4) et la corrélation semi-empirique de Chin et Tsang [5] à laquelle il peut être attribué un caractère local étant donné les valeurs de R/d utilisées par ces auteurs. On peut constater que, si nos résultats ne répondent pas une influence de Re en $Re^{1/2}$, l'accord quantitatif entre eux et ces corrélations, et en particulier celle de Kataoka et Mizushina [11], est assez satisfaisant, compte-tenu du caractère quasi-ponctuel de nos mesures. La Fig. 5 souligne aussi, clairement, qu'il n'y a pas de différence essentielle entre jet immergé et jet non-immersé, remarque qui reste d'ailleurs valable pour des faisceaux de jets suffisamment distants les uns des autres et donc sans interaction mutuelle appréciable [8].

4. CONCLUSION

Cinq valeurs ont pu être successivement attribuées, entre $0,3 \times 10^{-2}$ et $1,5 \times 10^{-2}$ m, au diamètre d de l'orifice de sortie des jets circulaires, alors que la plupart des auteurs se sont limités, dans leurs travaux, à une ou deux valeurs de d .

Ceci nous a permis de faire le point quant à la position de la littérature vis-à-vis de la représentation des coefficients globaux ou locaux de transfert de matière sur des surfaces planes recevant perpendiculairement des jets circulaires de liquide. Il apparaît qu'à ce jour, la panoplie de corrélations est satisfaisante pour le calcul du coefficient de transfert global et pour celui du coefficient de transfert de matière local au point d'arrêt. La technique des microélectrodes nous a permis, par ailleurs, d'atteindre la distribution spatiale des coefficients locaux.

Remerciements—A. Bensmaili remercie le Gouvernement Algérien pour sa contribution financière au présent travail.

REFERENCES

1. H. Martin, Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces. In *Advances in Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 1-60. Academic Press, New York (1977).
2. J. R. Selman and C. W. Tobias, Mass transfer by the

limiting current technique. In *Advances in Chemical Engineering*, Vol. 10, p. 212. Academic Press, New York (1978).

3. B. Subba Rao, M. S. Krishna and G. J. V. Jaganna Dharaju, Ionic mass transfer with submerged jets—I, *Periodica Polytech., Chem Engng (Budapest)* 17(2), 185 (1973).
4. F. Coeuret, Transfert de matière lors de l'impact normal de jets liquides circulaires immergés, *Chem. Engng Sci.* 30, 1257 (1975).
5. D. T. Chin and C. H. Tsang, Mass transfer to an impinging jet electrode, *J. Electrochem. Soc.* 125(9), 1461 (1978).
6. K. Kataoka, Y. Kamiyama, S. Hashimoto and T. Komai, Mass transfer between a plane surface and an impinging turbulent jet: the influence of surface pressure fluctuations, *J. Fluid Mech.* 119, 91 (1982).
7. A. Bensmaili, Thèse en préparation (1991).
8. J. O. Nanzer, A. Donizeau and F. Coeuret, Overall mass transfer between electrodes and normal impinging submerged multijets of electrolyte, *J. Appl. Electrochem.* 14, 51 (1984).
9. K. L. Hsueh and D. T. Chin, Mass transfer of a submerged jet impinging on a cylindrical surface, *J. Electrochem. Soc.* 133(9), 1845 (1986).
10. D. T. Chin and K. L. Hsueh, An analysis using the Chilton-Colburn analogy for mass transfer to a flat surface from an unsubmerged impinging jet, *Electrochim. Acta* 31(5), 561 (1986).
11. K. Kataoka and T. Mizushina, Local enhancement of the rate of heat-transfer in an impinging round jet by free-stream turbulence, *Fifth Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 2, pp. 305-309, FC 8.3. Society of Heat Transfer of Japan (1974).
12. S. L. Marchiano and A. J. Arvia, Ionic mass transfer on fixed disk and conical electrodes under streaming solutions—I. Theoretical approach, *Electrochim. Acta* 12, 801 (1967).
13. H. Matsuda and J. Yamada, Limiting diffusion currents in hydrodynamic voltammetry—I. Fixed disk and ring electrodes in laminar uniform flow, *J. Electroanalyt. Chem.* 30, 261 (1971).
14. E. Firouztale, J. E. Stein and J. S. Ultman, Polarographic determination of mass transfer in a stagnation flow, *Chem. Engng Commun.* 22, 11 (1983).
15. C. O. Bennett and J. E. Myers, *Momentum, Heat and Mass Transfer*, 2nd Edn, pp. 158-164. McGraw-Hill, New York (1974).