

TRANSFERT DE MATIERE AUTOUR D'UNE SPHERE IMMERGEE DANS UNE COUCHE FLUIDISEE PAR UN LIQUIDE

J. P. RIBA et J. P. COUDERC

Institut du Génie Chimique, L.A. C.N.R.S. No. 192, Chemin de la loge,
 31078 Toulouse Cedex, France

(reçu le 24 janvier 1979 et le manuscrit révisé le 3 juillet 1979)

Résumé – Les auteurs étudient, par voie électrochimique, le phénomène de transfert de matière autour d'une sphère fixe immergée dans une couche de particules du diamètre de la sphère de mesure, fluidisées par un liquide. La comparaison des résultats obtenus avec ceux de la bibliographie montre que le phénomène observé est représentatif du phénomène de transfert de matière entre le liquide et la couche fluidisée. Ce résultat permet aux auteurs d'approfondir l'analyse de l'influence des paramètres caractéristiques des couches fluidisées sur le coefficient de transfert de matière entre une particule de la couche et le liquide.

NOMENCLATURE

- C_A^{sol} , concentration en espèce électroactive au sein de la solution ;
 d_p , diamètre des particules ;
 D , coefficient de diffusion ;
 F , constante de Faraday ;
 g , accélération de la pesanteur ;
 I , intensité de courant électrique ;
 I_{lim} , intensité limite de diffusion ;
 k , coefficient de transfert de matière ;
 n , nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction électrochimique ;
 S , aire de l'électrode ;
 v , vitesse de circulation du liquide ;
 ϵ , degré de vide de la couche ;
 ρ_L , masse volumique du liquide ;
 ρ_S , masse volumique du solide ;
 μ , viscosité ;
 ν , viscosité cinématique.

Nombre sans dimension

- Re , nombre de Reynolds, $Re = \frac{d_p v \rho_L}{\mu}$;
 Re' , nombre de Reynolds modifié, $Re' = \frac{Re}{1 - \epsilon}$;
 Ga , nombre de Galilée, $Ga = \frac{d_p^3 \rho_L^2 g}{\mu^2}$;
 Mv , nombre de masse volumique, $Mv = \frac{\rho_S - \rho_L}{\rho_L}$;
 Sc , nombre de Schmidt, $Sc = \frac{\mu}{\rho_L D}$;
 Sh , nombre de Sherwood, $Sh = \frac{k d_p}{D}$;
 J_D , facteur de Chilton Colburn, $J_D = \frac{Sh}{Re Sc^{1/3}}$.

LES ÉTUDES du phénomène de transfert de matière en couche fluidisée par les liquides publiées à ce jour sont de deux natures différentes.

Le premier type d'étude est relatif au transfert de matière entre le liquide de fluidisation et soit un objet immergé dans la couche, soit la paroi de la colonne de fluidisation. Le second type d'étude est lui relatif au transfert de matière entre le liquide et les particules fluidisées.

A notre connaissance, seuls Mullin et Treleaven [1] ont tenté de faire un lien entre ces deux types d'études en comparant, pour quelques conditions expérimentales, le phénomène de transfert de matière autour d'une particule sphérique identique aux particules fluidisées, soit lorsque cette particule est maintenue immobile en un point de la couche, soit lorsqu'elle peut se mouvoir librement au sein de cette dernière.

Aussi, dans le présent travail nous nous proposons de poursuivre cette comparaison en complétant les études antérieures par une analyse expérimentale approfondie du phénomène de transfert de matière autour d'une sphère fixe immergée dans une couche fluidisée de particules du diamètre de cette sphère.

I. TRAVAUX ANTERIEURS

1.1. Transfert de matière entre la couche fluidisée et la paroi de la colonne ou un objet immergé

La plupart des auteurs [2-13] ont retenu la méthode électrochimique de mesure du coefficient de transfert de matière pour étudier expérimentalement ce phénomène. Les colonnes de fluidisation employées sont, soit des cylindres de section droite circulaire, soit l'espace annulaire compris entre deux cylindres coaxiaux de section droite circulaire [8, 9]. Les auteurs analysent soit le transfert de matière entre la couche fluidisée et la paroi de la colonne, soit entre la couche et un objet immergé. Les objets retenus sont, soit des plaques planes [12], soit des cylindres [4, 5, 13], soit des sphères [5], mais dans tous les cas les dimensions

de l'objet sont grandes devant la taille des particules fluidisées.

De l'ensemble de ces travaux, il ressort que :

(i) Le coefficient de transfert de matière varie notablement avec la vitesse de circulation du fluide en passant par un maximum lorsque le degré de vide de la couche est voisin de 0,6 et en décroissant ensuite rapidement. Il faut cependant noter que cette loi de variation n'est pas suivie lorsque l'objet autour duquel est étudié le transfert de matière est de forme sphérique, pour une telle forme, Valentin et Le Goff [5] ont constaté que le coefficient de transfert de matière n'est que peu dépendant du degré de vide de la couche.

(ii) L'ensemble des études recouvre un domaine de conditions opératoires important, y compris en ce qui concerne l'influence des propriétés physiques du système fluidisé.

(iii) Les différents résultats expérimentaux obtenus sont le plus souvent lissés par une relation de la forme $\epsilon J_D = a(Re')^b$ se traduisant graphiquement dans le mode de représentation de la Fig. 1 par une droite. Lorsqu'il n'en est pas ainsi [2, 10, 12] nous avons calculé par la relation originale proposée le produit ϵJ_D pour différentes valeurs du nombre de Reynolds modifié Re' régulièrement réparties dans le domaine qui nous intéresse, et placé les points représentatifs correspondant sur la Fig. 1. Ces points étant pratiquement alignés, seule la droite moyenne les joignant a été tracée sur la figure pour des raisons de clarté. Notons enfin qu'une seule des déterminations expérimentales de Valentin et Le Goff [5] se situe dans le domaine de nombre de Reynolds modifié, envisagé sur la Fig. 1. C'est pourquoi les résultats de ces auteurs sont matérialisés sur cette figure par un seul point.

Cette figure montre que les résultats obtenus varient notablement d'une étude à l'autre, ce qui est tout-à-fait normal si l'on songe que les obstacles immergés dans la

couche fluidisée diffèrent suivant les chercheurs en dimension et en forme.

1.2. Transfert de matière entre le liquide et les particules fluidisées

Les études du phénomène de transfert de matière entre un liquide et des particules fluidisées que l'on peut relever dans la bibliographie [14-24] sont effectuées par la technique expérimentale de dissolution, et le système fluidisé le plus étudié est constitué de particules d'acide benzoïque mises en suspension dans de l'eau. Les solides employés sont généralement de forme sphérique mais on rencontre aussi des travaux effectués avec des particules d'autre forme [14]. Les diverses analyses ont permis de mettre en évidence les principaux résultats suivants :

(i) A l'exception de Nanda et coll. [14], les chercheurs ont observé une faible influence de la vitesse de circulation du liquide sur le coefficient de transfert de matière.

(ii) Les influences du diamètre des particules et de la vitesse de circulation du liquide sur le phénomène de transfert ont été bien étudiées; par contre peu de travaux sont consacrés à l'analyse de l'influence des propriétés physiques du système fluidisé sur l'intensité du transfert de matière.

(iii) Enfin, les auteurs présentent les résultats de leurs expériences de deux manières différentes, soit en exprimant les variations du facteur de Chilton et Colburn modifié ϵJ_D en fonction du nombre de Reynolds modifié $Re/(1 - \epsilon)$, soit en exprimant les variations du nombre de Sherwood en fonction des groupes adimensionnels de Reynolds, de Galilée, de masse volumique et de Schmidt. Ce second mode de corrélation a l'avantage de ne faire intervenir que des groupes indépendants et facilite l'organisation des expériences et l'exploitation des données obtenues.

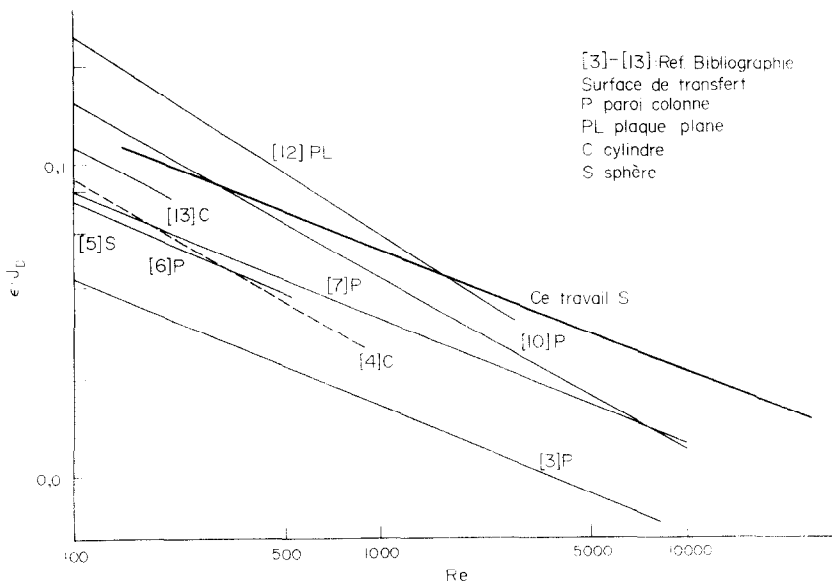


FIG. 1. Transfert de matière entre la couche fluidisée et une paroi ou un obstacle.

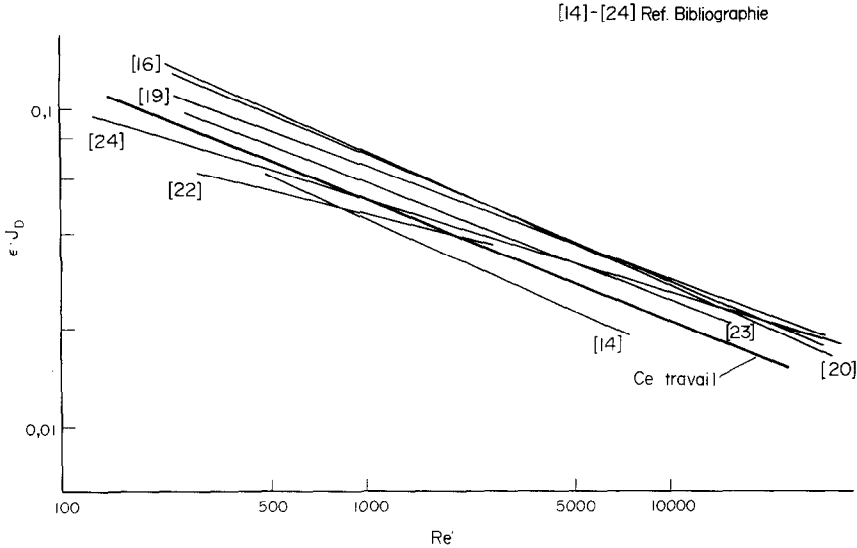


FIG. 2. Transfert de matière entre la couche et le liquide de fluidisation.

Toutefois, comme le premier mode de corrélation conduit à une représentation graphique simple des résultats expérimentaux, nous avons essayé, comme précédemment, de lier les données de tous les chercheurs suivant ce mode, Fig. 2. Seules les expériences de Evans et Gerald [15] ne peuvent pas être représentées par une droite dans le plan $\varepsilon J_D, Re'$. La Fig. 2, qui est à la même échelle que la Fig. 1, met en évidence l'accord satisfaisant qui existe entre les divers travaux publiés.

En conclusion, cette analyse bibliographique montre, que seuls Mullin et Treleaven [1], et beaucoup plus récemment Valentin et Le Goff [5], ont abordé l'étude du phénomène de transfert de matière autour d'une sphère immergée dans une couche fluidisée. L'objectif principal de ces derniers auteurs était d'analyser le transfert lorsque la sphère se déplace d'un mouvement uniforme dans la couche fluidisée. Ils ont travaillé avec une sphère de grande dimension devant la taille des particules fluidisées et ont observé au cours de leur étude que lorsque la sphère est immobile le coefficient de transfert de matière dépend très peu du degré de vide de la couche.

Nous allons donc porter maintenant notre attention sur le phénomène de transfert de matière autour d'une sonde fixe immergée dans une couche fluidisée mais de la même taille que les particules constituant la couche.

2. TECHNIQUE EXPERIMENTALE

2.1. Mesure du coefficient de transfert de matière

Dans ce travail, le coefficient de transfert de matière est mesuré par la méthode électrochimique classique [2-13], l'espèce électroactive choisie étant l'ion ferricyanure $Fe(CN)_6^{3-}$. Ce coefficient est lié au courant limite de diffusion observé par la relation

$$k = \frac{I_{lim}}{nFSC_A^{sol}} \quad (1)$$

2.2. Installation de fluidisation

Elle comprend un réservoir de 200 l en matière plastique, une pompe centrifuge dont le corps est en polyéthylène et une colonne en altuglass de 94 mm de diamètre intérieur, munie d'une déverse (Fig. 3). La colonne est fermée en sa partie inférieure par un distributeur en polyéthylène fritté (Vyon) précédé d'une section calmante, de manière à obtenir à la base de la colonne un profil de vitesse uniforme, et d'éviter ainsi tout phénomène de passages préférentiels. La température de la solution de fluidisation est réglée à $0,1^\circ C$, et son débit mesuré à l'aide d'un organe deprimogène étalonné permettant la détermination de la vitesse de circulation du liquide dans la colonne.

2.3. Sondes

Les sondes (Fig. 4) employées sont des sphères en laiton, rectifiées, de diamètres 5, 7, 9 et 10 mm. Elles sont recouvertes d'un dépôt électrolytique d'or de $5 \mu m$ et fixées à l'extrémité d'une tige d'acier servant d'amenée de courant. Cette tige est isolée électriquement de la solution de fluidisation par une gaine en matière plastique thermorétractable. Un couvercle fixé sur la déverse de la colonne de fluidisation maintient en place les sondes qui sont polarisées à l'aide d'un potentiostat Tacussel PRT 10-05. Le circuit électrique du potentiostat est fermé par une électrode annulaire en nickel située au sommet de la colonne, et les tensions sont repérées par rapport à une électrode de référence au calomel saturée.

2.4. Produits

Les particules fluidisées sont des billes de 5, 7, 9 et 10 mm en matières plastiques de masses volumiques 1100 et 1350 kg/m^3 et en verre de masse volumique 2530 kg/m^3 .

Les solutions renferment $2 \cdot 10^{-3}$ mole/l de $Fe(CN)_6 K_3$, 0,5 mole/l de NaOH jouant le rôle d'électro-

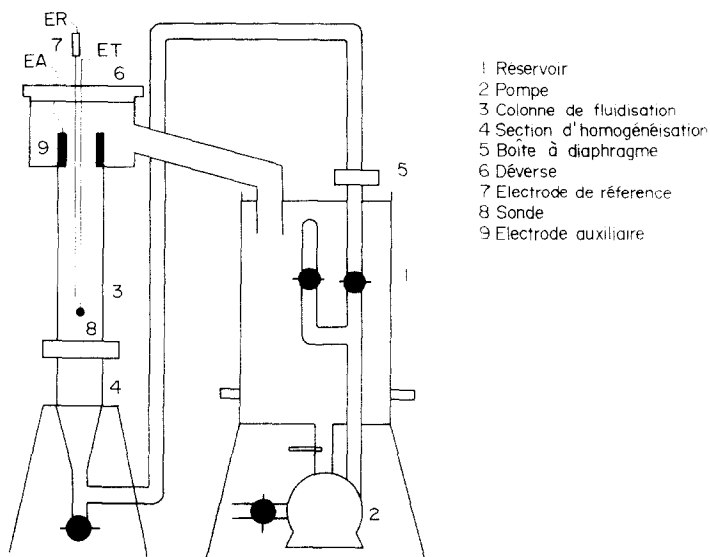


FIG. 3. Installation de fluidisation.

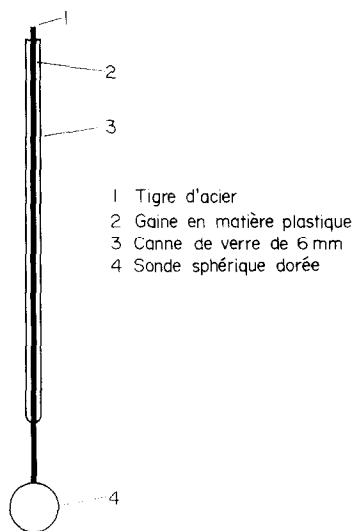


FIG. 4. Sondes de mesure.

lyte indifférent et $2 \cdot 10^{-3}$ mole/l de $\text{Fe}(\text{CN}_6) \text{K}_4$.

Pour étudier l'influence des propriétés physiques du système fluidisé sur le transfert de matière, nous avons fait varier la température des solutions de fluidisation et ajouté à certaines d'entre elles du polyéthylène glycol de masse molaire 4000 ou 6000.

Les propriétés physiques des solutions de fluidisation utilisées sont rassemblées dans le Tableau 1.

La viscosité des solutions est mesurée à l'aide d'un viscosimètre à chute de bille et le coefficient de diffusion de l'ion $\text{Fe}(\text{CN}_6)^{3-}$ est obtenu par la technique de l'électrode à disque tournant. Nous nous sommes par ailleurs assuré que les solutions renfermant du polyéthylène glycol ont bien un comportement Newtonien.

Enfin, pour chaque série d'expériences, la teneur en

ion $\text{Fe}(\text{CN}_6)^{3-}$ des solutions est déterminée par dosage polarographique sur électrode à disque tournant.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

Pour étudier le phénomène de transfert de matière entre une sonde fixe immergée dans une couche fluidisée et le liquide, nous avons effectué 249 déterminations expérimentales dans le domaine de conditions opératoires suivant :

vitesse de circulation du liquide

$$3 \cdot 10^{-2} \text{ à } 2 \cdot 10^{-1} \text{ m/s}$$

diamètre des particules solides

$$5 \cdot 10^{-3} \text{ à } 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

masse volumique des particules solides

$$1 \cdot 100 \text{ à } 2 \cdot 530 \text{ kg/m}^3$$

viscosité cinématique du liquide

$$0,61 \cdot 10^{-6} \text{ à } 2,83 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

coefficient de diffusion de l'ion $\text{Fe}(\text{CN}_6)^{3-}$

$$3,67 \cdot 10^{-10} \text{ à } 11,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$$

Les manipulations ont été conduites de manière que le degré de vide de chaque système fluidisé varie entre 0,45 et 0,90. Elles montrent que :

(i) Pour un système fluidisé donné, le coefficient de transfert de matière est pratiquement indépendant de la vitesse de circulation du liquide, donc du degré de vide du système, cela même pour des valeurs élevées de ce degré de vide.

(ii) Dans le domaine de diamètres de particules exploré, le coefficient de transfert de matière ne dépend pas du diamètre des particules.

Ces deux résultats montrent que le phénomène de transfert de matière étudié ici, suit plutôt les lois caractéristiques de transfert de matière entre le liquide et les particules constituant une couche fluidisée que

Tableau 1. Solutions de fluidisation

Nature	Température (°C)	v (m ² /s)	D (m ² /s)
Sans PEG	25	$1,03 \cdot 10^{-6}$	$7,38 \cdot 10^{-10}$
	30	0,93	8,30
	35	0,83	9,15
	40	0,75	10,00
	45	0,68	10,85
	50	0,61	11,89
10% en poids de PEG 4000	25	2,80	3,70
	30	2,50	4,39
	35	2,23	4,96
	40	1,97	5,58
4% en poids de PEG 6000	35	1,47	5,46
	40	1,31	5,97

celles caractérisant le transfert entre la couche fluidisée et les parois de la colonne ou entre la couche fluidisée et un objet immergé. Rappelons, en effet, que la plupart des chercheurs ayant analysé en couche fluidisée le transfert de matière entre le liquide et les particules ont trouvé que l'intensité de ce transfert était pratiquement indépendante du degré de vide de la couche, alors que ceux s'étant intéressés au transfert de matière liquide-paroi ont observé une rapide décroissance du coefficient de transfert lorsque le degré de vide de la couche fluidisée augmente après que ce coefficient soit passé par une valeur maximale pour un degré de vide de l'ordre de 0,6.

D'autre part, en ce qui concerne le second résultat, Tournie [20] a remarqué, dans un domaine de diamètre de particules fluidisées voisin du nôtre, que l'intensité du transfert de matière entre le liquide et les particules était indépendante du diamètre de celles-ci.

3.2. Comparaisons avec les travaux antérieurs

Afin de comparer nos résultats expérimentaux avec ceux relevés dans la bibliographie, nous avons mis en équation nos données en utilisant les deux modes classiques de corrélation que nous avons présentés précédemment et nous avons obtenu :

$$(1) \text{ mode de corrélation } \varepsilon J_D = 0,787 (Re')^{-0,39} (2)$$

$$\text{écart relatif moyen } s = 10\%$$

$$(2) \text{ mode de corrélation } Sh$$

$$= 0,272 Re^{-0,07} Ga^{0,36} Mv^{0,37} Sc^{0,33} (3)$$

$$\text{écart relatif moyen } s = 6\%.$$

3.2.1. *Comparaison des résultats obtenus avec ceux relatifs au transfert de matière entre la couche fluidisée et une paroi ou un obstacle.* En plaçant sur la Fig. 1 la droite représentative de la relation (2), on constate que les valeurs du produit εJ_D trouvées au cours de ce travail sont situées dans le même domaine que celles observées lors de l'étude du transfert de matière entre la couche fluidisée et une paroi. Il convient toutefois de remarquer que ce domaine est étendu et que la droite représentative de l'équation (2) est située à une des extrémités de celui-ci. Cette figure montre enfin que nos déterminations expérimentales sont assez différentes de celles de Valentin et Le Goff, auteurs ayant travaillé dans des conditions voisines des nôtres, mais avec une sonde sphérique de grande dimension devant la taille des particules fluidisées.

Pour pouvoir comparer facilement nos déterminations expérimentales à celles relevées dans la bibliographie, nous avons calculé, Tableau 2, pour chaque relation de corrélation proposée, l'écart relatif moyen

$$s = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\varepsilon J_{Dexp} - \varepsilon J_{Dcalc}}{\varepsilon J_{Dcalc}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Le Tableau 2 montre que les valeurs de ces écarts sont dans l'ensemble élevées.

3.2.2. *Comparaison des résultats obtenus avec ceux relatifs au transfert de matière entre le liquide et les particules fluidisées.* En portant, sur la Fig. 2, la droite représentative de l'équation (2), on voit que celle-ci est située à l'intérieur du domaine balayé par les relations lissant les résultats expérimentaux relevés dans la bibliographie. Ce domaine est étroit puisque, comme

Tableau 2. Transfert de matière entre la couche et une paroi ou un obstacle

Auteurs	Surface de transfert	s (%)	
Carbin et coll.	Obstacle cylindrique	185	Valeurs des auteurs toujours inférieures aux nôtres
Jottrand et coll.	Obstacle plan	40	Valeurs des auteurs réparties autour des nôtres
Xifra et coll.	Paroi de la colonne	70	Valeurs des auteurs réparties autour des nôtres
Smith et coll.	Paroi de la colonne	215	Valeurs des auteurs toujours inférieures aux nôtres
Venkata, Rao	Paroi de la colonne	67	Valeurs des auteurs toujours inférieures aux nôtres
Coeuret et coll.	Obstacle cylindrique	91	Valeurs des auteurs toujours inférieures aux nôtres
Storck et coll.	Paroi cylindrique	99	Valeurs des auteurs toujours inférieures aux nôtres

on l'a déjà remarqué, il y a un assez bon accord entre les diverses études publiées.

Dans le Tableau 3 sont indiqués les écarts relatifs moyens entre nos résultats expérimentaux et ceux calculés à partir des corrélations des autres auteurs. Les valeurs de ces écarts sont beaucoup plus faibles que celles du Tableau 2.

3.3. Premières conclusions

Cette comparaison de nos résultats avec ceux des travaux antérieurs met en évidence :

(i) Que l'intensité du transfert de matière autour d'une sphère fixe immergée dans une couche fluidisée de particules du diamètre de la sphère suit les mêmes lois de variation avec la vitesse de circulation du liquide et le diamètre de la sphère que l'intensité du transfert de matière entre une particule fluidisée et le liquide,

(ii) Que les valeurs des coefficients de transfert de matière observées au cours de ce travail sont très proches des valeurs obtenues dans les études du transfert de matière entre des particules fluidisées et un liquide.

On peut donc conclure, comme Mullin et Treleaven [1], mais dans un domaine de conditions expérimentales beaucoup plus étendu que le phénomène de transfert de matière autour d'une sphère du diamètre des particules fluidisées, maintenue immobile en un point de la couche, est représentatif du phénomène de transfert de matière entre les particules fluidisées et le liquide. Ainsi, les divers mouvements de la particule solide, qui sont d'ailleurs lents en fluidisation liquide, n'affecteraient pas de façon significative l'intensité du transfert de matière. C'est pourquoi nous allons maintenant mettre à profit les résultats que nous avons obtenus pour approfondir l'étude des influences des propriétés physiques des couches fluidisées sur le coefficient de transfert de matière entre les particules et le liquide, puisque l'analyse bibliographique a montré que ces influences ont été peu étudiées.

4. APPLICATION A L'ETUDE DU TRANSFERT DE MATIERE ENTRE LES PARTICULES FLUIDISEES ET LE LIQUIDE

Nous avons déjà présenté, de façon globale, les résultats obtenus sous la forme de la relation de corrélation (3) qui permet de préciser l'influence des

divers paramètres adimensionnels caractérisant les couches fluidisées homogènes : commentons-la.

Influence du nombre de Reynolds

Notre travail expérimental comme ceux de Damronglerd [18], de Vanadurongwan, Laguerie et Couderc [16] et de Tournie [20] montre que le nombre de Reynolds est pratiquement sans influence sur l'intensité du transfert de matière entre le liquide et les particules d'une couche fluidisée.

Influence de nombre de Galilée

Cette influence est mise en évidence sur la Fig. 5, correspondant à des systèmes fluidisés de nombre de masse volumique $Mv = 0,35$, où sont portés en échelles logarithmiques les variations de la valeur moyenne du rapport $Sh/Re^{-0,07} \cdot Sc^{0,33}$ en fonction du nombre de Galilée. L'exposant 0,36 obtenu par analyse régressive est en accord convenable avec les valeurs trouvées par

Damronglerd, Couderc et Angelino [19]: 0,30

Vanadurongwan, Laguerie et Couderc [16]: 0,30

et Tournie [20]: 0,32.

Influence du nombre de Schmidt

La Fig. 6 montre à titre d'exemple pour les systèmes de nombre de masse volumique $Mv = 0,35$, les variations de la valeur moyenne du rapport $Sh/Re^{-0,07} \cdot Ga^{0,36}$ en fonction des 12 valeurs du nombre de Schmidt envisagées dans ce travail.

La plage de variations de ce nombre est à notre connaissance la plus vaste analysée à ce jour dans l'étude du transfert de matière entre un liquide et des particules en couches fluidisées $550 < Sc < 7700$.

L'exposant du nombre de Schmidt déduit de l'analyse régressive est 0,33. Nous noterons que cette valeur est la même que celle que prévoit la théorie de la couche limite pour la partie frontale d'une sphère isolée. Elle diffère toutefois de la valeur 0,436 trouvée par Vanadurongwan et coll. [16], les seuls chercheurs ayant étudié l'influence de ce paramètre. Nous pensons que cet écart peut s'expliquer par la différence d'amplitude des domaines explorés par cet auteur $300 < Sc < 1300$ et par nous-même $550 < Sc < 7700$.

Tableau 3. Transfert de matière entre la couche et le liquide

Auteurs	S (%)	
Couderc et coll.	52	Valeurs toujours supérieures aux nôtres
Rowe et coll.	19	Valeurs réparties autour des nôtres
Damronglerd et coll.	25	Valeurs toujours supérieures aux nôtres
Vanadurongwan et coll.	26	Valeurs réparties autour des nôtres
Tournie	27	Valeurs toujours supérieures aux nôtres
Nanda et coll.	30	Valeurs réparties autour des nôtres
Upadhyay et coll.	15	Valeurs réparties autour des nôtres
Dwivedi et coll.	15	Valeurs réparties autour des nôtres

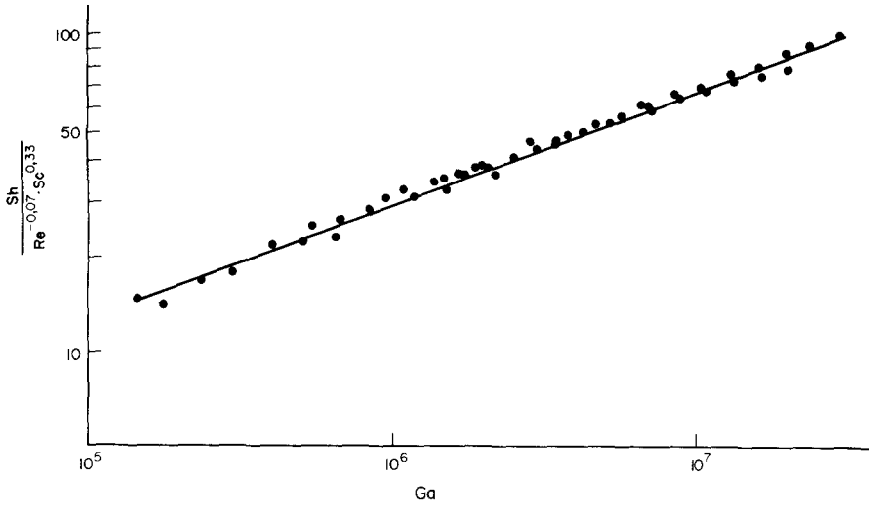


FIG. 5. Influence du nombre de Galilée.

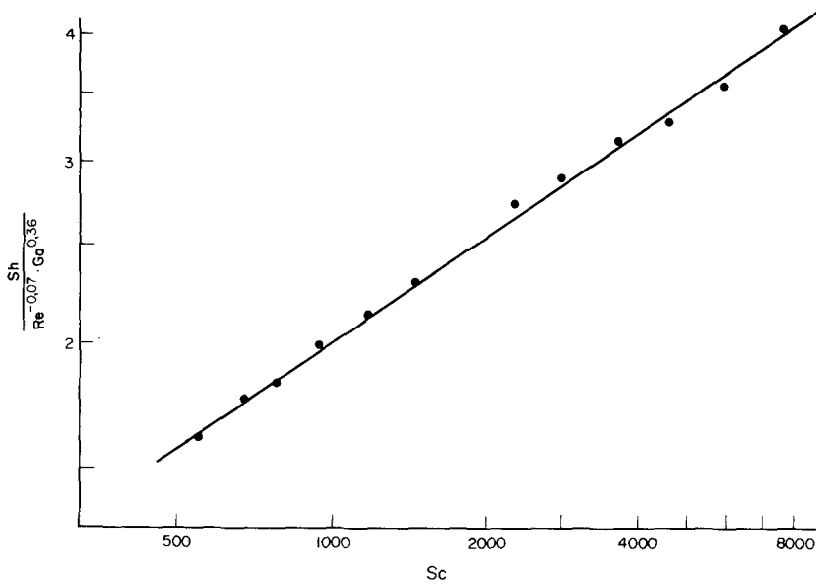


FIG. 6. Influence du nombre de Schmidt.

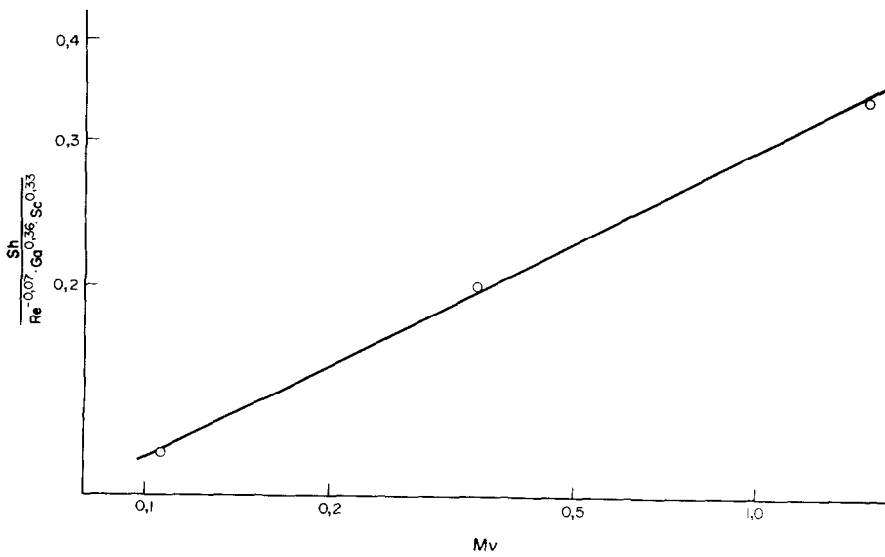


FIG. 7. Influence du nombre de Masse volumique.

Influence du nombre de masse volumique

Les variations du nombre de Sherwood avec le nombre de masse volumique sont portées en échelles logarithmiques sur la Fig. 7 pour des valeurs des nombres de Galilée de $1,08 \cdot 10^6$ et de Schmidt de 1450. Du fait de la difficulté de se procurer des sphères en matériaux de différentes masses volumiques les déterminations sont peu nombreuses, ce qui explique peut être la différence entre la valeur de l'exposant du nombre de masse volumique 0,37 que nous trouvons et celle 0,30 proposée par Vanadurongwan, Laguerie et Couderc [16]. Il y a certainement aussi, comme pour l'influence du nombre de Schmidt un effet de l'étendue du domaine expérimental exploré. Nous remarquons enfin que l'exposant du nombre de masse volumique est pratiquement égal à celui du nombre de Galilée. Ce résultat, déjà observé lors d'études hydrodynamiques [26, 27] est vraisemblablement dû à la signification physique du produit $Ga.Mv$ qui représente sous forme adimensionnelle le rapport de la force de traînée s'exerçant sur une particule à son poids apparent.

4.1. Relations simplifiées

La faible valeur de l'exposant du nombre de Reynolds trouvée lors de l'établissement de la relation de corrélation précédente suggère la recherche d'une relation simplifiée dans laquelle ce nombre ne figurerait plus. Une nouvelle analyse régressive portant sur les nombres de Sherwood, Galilée, Schmidt et masse volumique conduit alors à l'expression :

$$Sh = 0,267 Ga^{0,33} Sc^{0,34} Mv^{0,37} \quad (4)$$

L'écart relatif moyen entre les valeurs expérimentales du nombre de Sherwood et celles calculées par cette relation est de 5,9%, alors que celui correspondant à la relation 3 renfermant le nombre de Reynolds était de 5,2%. La relation complète et la relation simplifiée ont donc une précision équivalente.

Enfin, si nous comparons les valeurs des exposants du diamètre des particules solides dans le nombre de Sherwood et le nombre de Galilée, nous notons que le coefficient de transfert de matière k est sensiblement indépendant de la taille des solides fluidisés. Ce résultat, déjà observé par Tournie [20] lors d'expériences de dissolution, conduit à la relation de corrélation suivante :

$$k = 0,567 \left(\frac{\mu}{\rho_L} \right)^{0,33} \cdot (Sc)^{-0,66} \cdot (Mv)^{0,37} \quad (5)$$

où k , μ et ρ_L sont exprimés en unités S.I.

Cette relation, bien que dimensionnelle, a l'avantage d'être très simple et de mettre clairement en évidence qu'en couche fluidisée le coefficient de transfert de matière, indépendant de la vitesse du liquide et de la taille des solides, ne dépend en fait que des propriétés physiques du système. Pour un couple solide-liquide donné, à température constante, le coefficient de transfert de matière est donc constant.

Il s'agit là d'une propriété remarquable, tout à fait caractéristique des milieux fluidisés.

CONCLUSIONS

Il est intéressant de noter que les valeurs du coefficient de transfert de matière entre la couche fluidisée et les parois de la colonne ou un obstacle immergé sont du même ordre de grandeur que celles correspondant au transfert entre le liquide et les solides fluidisés.

Mais, si l'ordre de grandeur est le même, on enregistre cependant des différences significatives suivant la forme et la taille de l'obstacle immergé. C'est ainsi que les variations de l'intensité du transfert avec la vitesse du liquide ne présentent pas les mêmes caractéristiques lorsque l'obstacle est une sphère ou lorsqu'il a une autre forme. C'est ainsi également que l'intensité du transfert semble dépendre de façon importante de la taille de la sphère immergée.

Lorsque la sphère fixe a un diamètre égal à celui des particules fluidisées qui l'entourent, le transfert s'avère identique, à la précision des déterminations effectuées, à celui qui se produit entre le liquide et les solides fluidisés. Il est alors possible d'exploiter cette propriété pour analyser simplement l'influence de certains paramètres, tels que la masse volumique des solides, la viscosité du liquide et la diffusivité de matière, qu'il est difficile d'étudier par d'autres techniques.

Les résultats de cette étude systématique confirment que le transfert ne dépend que des propriétés physiques du système et permettent de proposer des corrélations valables dans un large domaine de conditions expérimentales.

BIBLIOGRAPHIE

1. J. W. Mullin et K. T. Treleaven, Solid-liquid mass transfer in multiparticulate systems, Paper 3rd Congr. European Fed. Chem. Engrs, London B66 (1962).
2. J. W. Smith et D. H. King, Electrochemical wall mass transfer in liquid particulate systems, *Can. J. Chem. Engng* **53**, 41 (1975).
3. D. H. King et J. W. Smith, Wall mass transfer in liquid fluidized beds, *Can. J. Chem. Engng* **45**, 329 (1967).
4. D. C. Carbin and D. R. Gabe, Electrodeposition from a fluidized bed electrolyte: the mass transport correlation, *Electrochem. Acta* **19**, 645 (1974).
5. G. Valentin et P. Le Goff, Fluidisation par liquide: étude du transfert de matière entre le liquide et un objet mobile dans le lit, *Chem. Engng JI* **15**, 185 (1978).
6. A. Storck et F. Vergnes, Transfert de matière entre un électrolyte et une paroi cylindrique immergée dans un lit fluidisé liquide-solide: influence de la masse volumique des particules fluidisées, *Powder Technol.* **12**, 209 (1975).
7. G. J. V. Jagannadharaju et C. Venkata Rao, Ionic mass transfer in the presence of fluidized solids, *Indian J. Technol.* **3**, 201 (1965).
8. M. S. Krishna, G. J. V. Jagannadharaju et C. Venkata Rao, Mass transfer at the two walls of concentric annuli: electrode reactions in fluidized beds, *Indian J. Technol.* **4**, 8 (1966).
9. M. S. Krishna, Transfer rates at the inner wall of annular fluidized beds, *Indian J. Technol.* **10**, 163 (1972).
10. H. A. Xifra et U. Bohm, Solid-liquid fluidization: liquid to wall mass transfer, *Lat. Am. J. Chem. Engng et Appl. Chem.* **5**, 39 (1975).
11. A. Storck et F. Coeuret, Wall to liquid mass transfer in fluidized beds, *Can. J. Chem. Engng* **55**, 427 (1977).

12. R. Jottrand et F. Grunchard, Transfert de matière dans les lits fluidisés liquides, 3rd Congr. European Fed. of Chem. Engrs, London, p. 374 (1962).
13. F. Coeuret et P. Le Goff, Local porosity, fluctuations of porosity and mass transfer coefficients in liquid fluidized bed, *Chem. Engr No.* 207, C.E. 75 (1967).
14. A. Nanda, S. K. Ghosal et E. A. Mukerjea, Mass transfer in liquid-solid batch fluidized beds, *Chem. Age of India* 26, 55 (1975).
15. G. C. Evans et C. F. Gerald, Mass transfer from benzoic acid granules to water in fixed and fluidized beds at low Reynolds numbers, *Chem. Engng Prog.* 49(3), 135 (1935).
16. V. Vanadurongwan, C. Laguerie et J. P. Couderc, Influence des propriétés physiques sur le transfert de matière en fluidisation liquide, *Chem. Engng JI* 12, 29 (1976).
17. J. P. Couderc, H. Gibert et H. Angelino, Transfert de matière par diffusion en fluidisation liquide, *Chem. Engng Sci.* 27, 11 (1972).
18. S. Damronglerd, Transfert de matière en fluidisation homogène, Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Paul Sabatier, Toulouse (1973).
19. S. Damronglerd, J. P. Couderc et H. Angelino, Mass transfer in particulate fluidization, *Trans. Instn Chem Engrs* 53, 17 (1975).
20. P. Tournie, Transfert de matière en fluidisation liquide, Thèse de Docteur-Ingénieur, Institut National Polytechnique de Toulouse (1977).
21. L. K. McCune et R. H. Wilhem, Mass and momentum transfer in solid-liquid system, fixed and fluidized beds, *Ind. Engng Chem.* 41, 1124 (1949).
22. P. N. Rowe and K. T. Claxton, Heat and mass transfer from a single sphere to fluid flowing through on array, *Trans. Instn Chem. Engrs* 48, 321 (1965).
23. S. N. Upadhyay et F. Tripathi, Liquid phase mass transfer in fixed and fluidized beds of large particles, *Chem. Engng Data* 20, 20 (1975).
24. P. N. Dwivedi et S. N. Upadhyay, Particle-fluid mass transfer in fixed and fluidized beds, *Ind. Engng Process. Des. Dev.* 16(2), 157 (1977).
25. F. Opekar et P. Beran, Rotating disk electrodes, *J. Electroanal. Chem.* 69(1), 1 (1976).
26. J. P. Riba, R. Routie et J. P. Couderc, Conditions minimales de mise en fluidisation par un liquide, *Can. J. Chem. Engng* 56, 26 (1978).
27. J. P. Riba, J. P. Couderc, Expansion de couches fluidisées par des liquides, *Can. J. Chem. Engng* 55, 118 (1977).

Abstract—Mass transfer around a fixed sphere immersed into a bed of spherical particles of equal diameter, fluidized by a liquid, has been studied using an electrochemical technique. A comparison with previous works has shown that the data obtained are similar to the one corresponding to mass transfer between the liquid and every fluidized particle. This property has then been used to study in details the influence of some characteristic parameters of fluidized beds on this mass-transfer phenomenon between the liquid and the fluidized solids.

STOFFÜBERGANG AN EINER KUGEL IN EINEM FLÜSSIGKEITSFLIEßBETT

Zusammenfassung—Der Stoffübergang an einer festen Kugel, die in einem Flüssigkeitsfließbett von Partikeln gleichen Durchmessers umgeben ist, wurde mittels einer elektrochemischen Methode untersucht. Ein Vergleich der erhaltenen Resultate mit Werten aus der Literatur zeigt, daß die beobachteten Vorgänge charakteristisch für den Stoffübergang zwischen der Flüssigkeit und den Partikeln eines Fließbettes sind. Dieses Ergebnis ermöglichte den Autoren die ausführliche Untersuchung des Einflusses charakteristischer Parameter von Fließbetten auf die Stoffübergangszahl zwischen einem Einzelpartikel des Fließbettes und der Flüssigkeit.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИЙ ВЫСОКИХ ПОРЯДКОВ МЕЖДУ СКОРОСТЬЮ И ТЕМПЕРАТУРОЙ ПРИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА В КАНАЛЕ

Аннотация — В первой части работы дается краткое описание оригинального метода, предложенного для измерения корреляций высоких порядков между скоростью и температурой в стационарном турбулентном поле. Метод основывается на использовании термоанемометрического зонда, состоящего из двух параллельных нитей, включенных в цепи анемометров постоянной температуры, и аппаратуры статистической обработки данных. Во второй части статьи приводятся некоторые результаты по моментам 2, 3 и 4 порядка, полученные в области термически установившегося двумерного течения в канале, которые иллюстрируют пригодность метода и возможность его использования при систематических измерениях корреляций между скоростью и температурой в турбулентном потоке.