



TRANSFERT DE MATIÈRE PAR DIFFUSION TURBULENTE DANS LES LITS FLUIDISÉS APPLICATIONS AUX OPÉRATIONS ÉLECTROCHIMIQUES

Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 21 novembre 1968

PAR F. CŒURET *, F. VERGNES **
ET P. LE GOFF ***

Introduction

Le phénomène de fluidisation est à l'heure actuelle très étudié en vue de ses applications au génie chimique. Le phénomène peut être présenté de la façon suivante :

Considérons un lit de grains disposé sur une plaque poreuse et traversé par un courant ascendant de fluide (gaz ou liquide).

1. Pour de très faibles débits du fluide, la couche de grains reste fixe et le fluide subit, à la traversée de cette couche, une perte de charge qui croît en fonction du débit, suivant les lois de Kozeny Karman en régime laminaire et d'Ergun si on atteint une turbulence suffisante. Si l'on augmente le débit, la perte de charge en arrive à être égale au poids du lit par unité d'aire de plaque poreuse et le lit commence à se soulever : c'est le seuil de fluidisation.

2. Pour de très grandes vitesses du fluide, les grains sont au contraire entraînés dans le sens du courant et s'échappent du récipient : il suffit que la vitesse du fluide soit supérieure à celle qu'atteindraient les grains s'ils tombaient en chute libre.

Entre ces deux domaines-limites, on peut imaginer un courant de fluide dont la vitesse reste en tous points inférieure à la vitesse terminale de

chute libre, mais est néanmoins suffisante pour conférer à ces particules une certaine énergie cinétique. Bien que la couche ne reste pas fixe comme dans le premier cas, les grains n'ont aucun mouvement d'ensemble et la valeur moyenne du vecteur-vitesse de chacun est nulle. Cette agitation désordonnée est comparable à l'agitation moléculaire, à une échelle différente. Bien entendu, le mouvement des grains n'est possible qu'après une dilatation de la couche solide, puisqu'initialement les particules sont jointives et ne sont donc susceptibles d'aucun mouvement.

La couche fluidisée (ou le lit fluidisé) ainsi réalisée s'apparente de très près à un fluide. Elle présente une surface libre bouillonnante comme un liquide à l'ébullition. On peut définir et mesurer une viscosité apparente du lit.

Nous pouvons évaluer l'importance du domaine de fluidisation par le rapport entre la vitesse maximale : limite du côté transport pneumatique et la minimale : limite du côté lit fixe.

Dans le cas particulier où le régime de chute libre des grains est laminaire et où tous les grains ont même dimension, un calcul simple montre que le rapport de ces deux vitesses est de l'ordre de 50 à 100.

On voit donc que la fourchette de vitesses correspondant à la fluidisation est très importante; on n'aura aucune difficulté à mettre le phénomène en évidence.

Quand on augmente le débit au-delà du seuil de fluidisation, la couche de grains peut présenter deux aspects assez différents :

— dans l'état que nous désignons par « *fluidisation homogène* », les grains sont uniformément dis-

* Ingénieur de Recherches.

** Maître-Assistant de Génie chimique à l'ENSIC-Nancy.

*** Professeur de Génie chimique à l'ENSIC-Nancy et Directeur du Centre de Cinétique physique et chimique du C.N.R.S.

persés dans tout l'espace. Le lit présente une surface libre quasi horizontale, ou viennent crever régulièrement des petites bulles nombreuses et uniformément réparties;

- dans la « fluidisation hétérogène », la répartition des grains est au contraire très irrégulière, aussi bien dans le temps que dans l'espace : certaines parties du lit sont violemment tourmentées par l'ascension de grosses bulles, au point qu'il n'est même plus possible de définir une « surface libre » du lit fluidisé. C'est le phénomène de *bullage* ou de *bouillonnage*;
- si les bulles grossissent et se réunissent au point d'occuper toute la section du fût, de véritables pistons solides sont entraînés et de temps en temps s'écroulent lourdement pour remplir les vides inférieurs. C'est le phénomène du *pistonage*;
- en général, la fluidisation est homogène quand le lit fluide utilisé est un liquide, elle est hétérogène dans le cas d'un gaz.

Aussi les études actuelles se poursuivent-elles en fluidisation gazeuse quand on s'intéresse à l'hétérogénéité des lits et en fluidisation liquide si on s'attache davantage aux propriétés de transfert des lits fluidisés.

Nous nous sommes particulièrement attachés à étudier le transfert de masse entre le fluide et un obstacle immobile immergé dans le lit fluidisé, aussi avons-nous utilisé la fluidisation par un liquide, ce qui présente un intérêt supplémentaire : en utilisant comme liquide un électrolyte judicieusement choisi, il est en effet possible de ramener une mesure de transfert de masse à une simple mesure de courant électrique.

On peut en effet écrire pour chaque espèce d'ion présent dans la solution l'égalité du flux transféré à une électrode et de la somme des flux dus à la migration sous l'influence du champ électrique, à la diffusion sous l'influence du gradient de concentration et à la convection sous l'influence des paramètres hydrodynamiques, ce dernier terme devenant négligeable dans la couche limite diffusionnelle qui entoure l'électrode.

Dans le cas où un seul ion se décharge à une électrode avec un rendement Faraday égal à 1 la mesure du courant électrique donne directement la valeur du flux de transfert de cet ion.

Si on considère en particulier le cas de la décharge à la cathode du cation d'un sel en faible concentration dans un électrolyte-support de concentration élevée, on montre en tenant compte de l'équation de neutralité électrique que tout se passe comme si le gradient de potentiel électrique n'intervenait plus et le courant mesuré ne dépend plus que du gradient de concentration de l'ion qui se décharge. Ce sont les conditions bien connues qui mènent à l'existence des paliers d'intensité constante à tension variable en polarographie.

Nous pourrions utiliser le modèle de Nernst et considérer que le gradient de concentration est constant dans la couche limite diffusionnelle et écrire :

$$\varphi = -D \frac{C - C_e}{\delta} = k(C - C_e)$$

- où :
- φ est le flux spécifique transféré (en moles/cm².s);
 - D le coefficient de diffusion (en cm²/s);
 - δ l'épaisseur de la couche limite diffusionnelle (en cm);
 - k le coefficient de transfert de matière (en cm²/s);
 - C la concentration au sein de la solution supposée bien homogénéisée par la turbulence de l'écoulement (moles/cm³).

L'épaisseur δ de la couche limite diffusionnelle est liée à l'épaisseur δ_0 de la couche limite hydrodynamique par la relation.

$$\delta = \frac{\delta_0}{(Sc)^{1/3}}$$

Etant donné que le critère de Schmidt Sc a une valeur de l'ordre de 1 000 pour les liquides, δ est environ dix fois plus petit que δ_0 mais lui reste proportionnel pour un état donné d'agitation du liquide.

Si, pour un régime hydrodynamique donné, on tente d'augmenter la densité de courant en augmentant le potentiel appliqué aux bornes de la cellule, on tendra vers une valeur limite du courant quand la concentration C_e à l'électrode tendra vers zéro, soit :

$$\varphi_{lim} = -\frac{DC}{\delta} = kC$$

Outre son application déjà évoquée en analyse chimique par polarographie, cette relation est particulièrement importante par son application en mécanique des fluides puisqu'elle permet de déterminer de façon très simple la valeur locale instantanée et absolue du coefficient de transfert de matière dans un appareil où s'écoule un fluide. Nous citerons ici uniquement les derniers travaux en date en particulier ceux de Lebouché et Cagnet [1, 2, 3].

Par ailleurs, il est possible de relier une grandeur fondamentale d'un lit de particules isolantes fluidisé par un liquide conducteur : la fraction de vide ϵ ou son complément à 1, la fraction Φ occupée par la phase solide, à la conductance électrique mesurée entre deux électrodes placées dans le lit. Il est évident que le rapport C/C_0 de la conductance mesurée en lit fluidisé à la conductance mesurée dans le liquide seul variera de 0 à 1 quand ϵ variera de 0 à 1, en suivant une courbe valable pour une suspension de particules sphériques [4]. L'agitation des grains du lit fluidisé se traduira par une fluctuation de la conductance C autour de sa valeur moyenne, fluctuation de conductance qui pourra être réduite à une variation de porosité dans le volume exploré par la sonde.

Notre méthode expérimentale déjà décrite par ailleurs [5, 6] consiste à mesurer localement et à l'aide de la même sonde les trois quantités suivantes : conductance du lit fluidisé, fluctuations de conductance, intensité du courant limite, d'où on déduit les grandeurs : porosité, fluctuations de porosité, coefficient de transfert de masse.

La mesure de conductance moyenne ne présente aucune difficulté, en revanche les mesures de fluctuation ressortent d'une technique un peu particulière transposée de celle que les aérodynamiciens utilisent avec les anémomètres à fil chaud.

Sans entrer dans les détails expérimentaux, nous allons néanmoins préciser la signification exacte que nous donnons au terme fluctuation de conductance : si C_i est la conductance à l'instant t , et C la valeur moyenne temporelle de cette conductance on a :

$$C = \frac{1}{T} \int_0^T C_i dt$$

où T est la durée d'intégration soit 5 mn dans nos expériences; à un instant donné la différence $C - C_i$ représente la fluctuation C' et on a :

$$\frac{1}{T} \int_0^T C' dt = 0$$

mais :

$$\frac{1}{T} \int_0^T C'^2 dt = \overline{C'^2} \neq 0$$

notre appareillage permet de mesurer directement une tension efficace proportionnelle à $\sqrt{\overline{C'^2}}$ écart type de la conductance considérée comme variable aléatoire du temps.

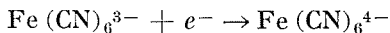
L'écart réduit $\sqrt{\overline{C'^2}}/C$ nous conduit à la valeur correspondante de l'intensité relative :

$$\frac{\sqrt{\overline{\Phi'^2}}}{\Phi} = \frac{\Delta\Phi}{\Phi}$$

des fluctuations de concentration en particules solides.

Cette quantité est une mesure des variations de la texture du lit fluidisé comme, dans l'étude des fluctuations de vitesse dans un écoulement turbulent, l'intensité de la turbulence caractérise la violence des fluctuations de vitesse par rapport à la vitesse moyenne de l'écoulement dans la même direction.

Les coefficients de transfert de matière sont mesurés par la méthode électrochimique en utilisant la réduction cathodique du ferricyanure de potassium :



système électrochimique utilisé de façon pratiquement universelle dans les études de mécanique des fluides.

La figure 1 représente un schéma de principe de l'appareillage expérimental.

Le tableau 1 donne les caractéristiques du fluide, des particules et des sondes utilisées.

Résultats

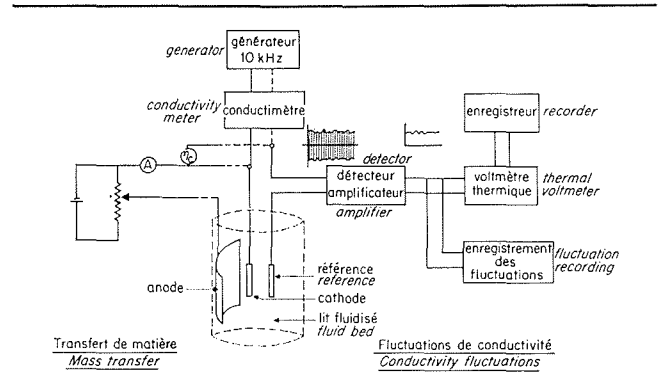
Nous avons étudié l'effet des paramètres suivants : diamètre des particules, vitesse du liquide, porosité du lit, géométrie et position de la sonde dans le lit.

Pour chaque cas nous avons tenté d'établir des corrélations entre les trois variables mesurées.

Effet de la vitesse du fluide.

Le coefficient de transfert de matière croît rapidement avec la vitesse débitante du fluide passe par un maximum et décroît continuellement dans le cas d'une sonde verticale.

La reproductibilité est médiocre dans la partie



1/ Schéma général de l'appareillage.
General experimental layout.

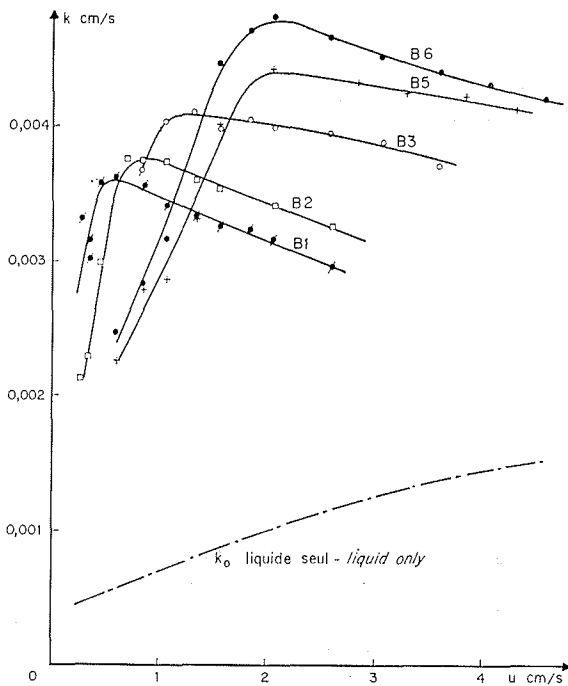
Tableau 1 / Table 1			
Caractéristique du liquide et des grains Liquid and particles characteristics			
$\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$		$t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	
$\mu = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ poise}$		$(\rho_s) = 2,73 \text{ g/cm}^3$	
$D = 7,95 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$			
10 ⁴ . dg cm	Désignation Identification	10 ⁴ . dg cm	Désignation Identification
350 ± 15	B 1	860 ± 38	B 4
470 ± 25	B 2	980 ± 27	B 5
690 ± 30	B 3	1 070 ± 34	B 6

croissante de la courbe proche du minimum de fluidisation.

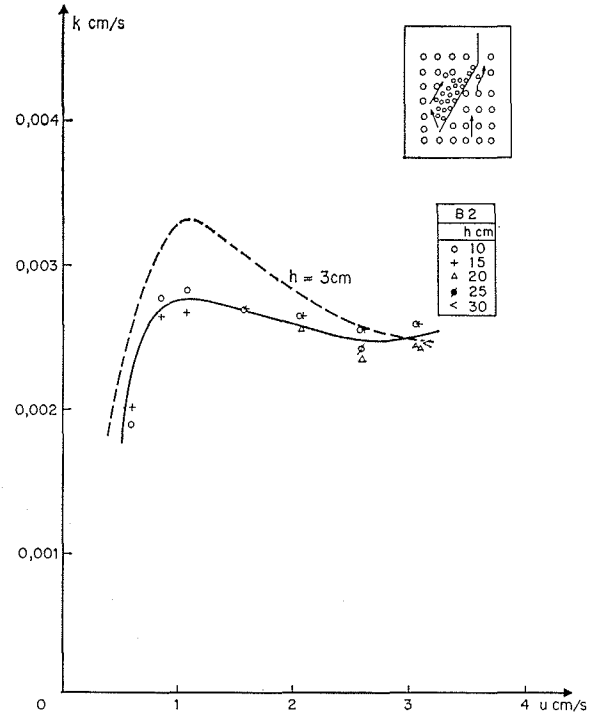
Quand on compare les résultats obtenus avec des particules de diamètres différents (fig. 2) les courbes conservent la même allure mais l'abscisse et l'ordonnée du maximum croissent avec la taille des particules; sur la figure 2 on a présenté également le coefficient k_0 correspondant au transfert dans le liquide seul.

Dans le cas d'une sonde horizontale la décroissance est beaucoup moins prononcée et il peut même apparaître un minimum (fig. 3).

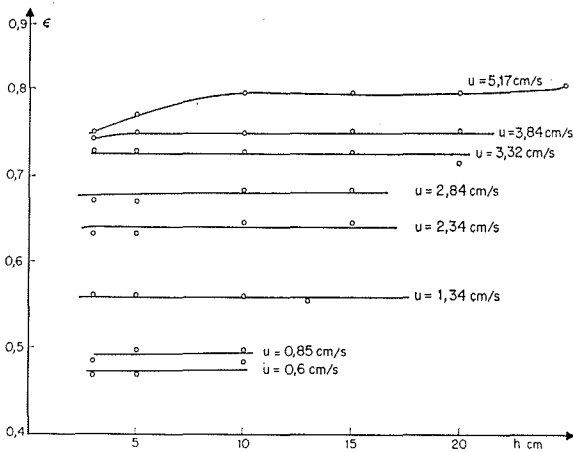
La présence de ce minimum peut être expliquée



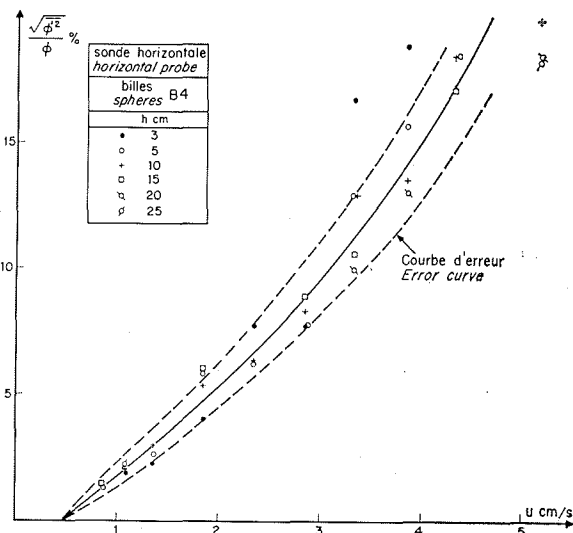
2/



3/

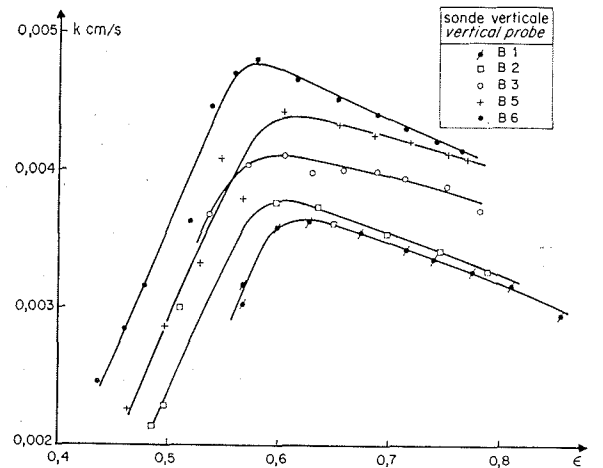


4/



5/

- 2/ Transfert de matière. Sonde verticale.
Mass transfer. Vertical probe.
- 3/ Transfert de matière. Sonde horizontale.
Mass transfer. Horizontal probe.
- 4/ Porosité le long de l'axe du lit. Sonde verticale.
Billes B 4.
Porosity along fluid bed centreline. Vertical probe. Spheres B 4.
- 5/ Fluctuations à différents niveaux dans le lit.
Fluctuations at various levels in the fluid bed.
- 6/ Influence de la porosité sur le transfert de matière.
Effect of porosity on mass transfer.



6/

de la façon suivante : Jottrand [7] a mesuré le coefficient de transfert de matière sur une électrode inclinée, il croît sur la face supérieure et décroît sur la face inférieure quand la vitesse du fluide augmente. Ces deux effets opposés se retrouvent dans le cas de la sonde horizontale et peuvent conduire à l'existence d'un minimum.

Effet de la position de la sonde le long de l'axe du lit.

La courbe établie en plaçant la sonde horizontale près de la grille est présentée en pointillé sur la figure 3. On voit qu'elle présente une allure assez différente de la courbe obtenue à partir d'expériences effectuées à des hauteurs supérieures dans le lit. Dans ces derniers cas le coefficient de transfert de masse ne varie pas appréciablement avec la hauteur de la sonde. Ce résultat diffère de ceux obtenus avec des lits de sable fluidisés [7] où la décroissance de k observée était interprétée par l'augmentation de la porosité avec la hauteur, mais en bon accord avec nos propres mesures de porosité locale qui ne varie pas avec la hauteur (fig. 4) pas plus d'ailleurs que les fluctuations de cette porosité (fig. 5). L'utilisation dans nos expériences de grains bien sphériques et soigneusement calibrés est vraisemblablement la raison de ce résultat.

Influence de la porosité et de la taille des particules sur le transfert.

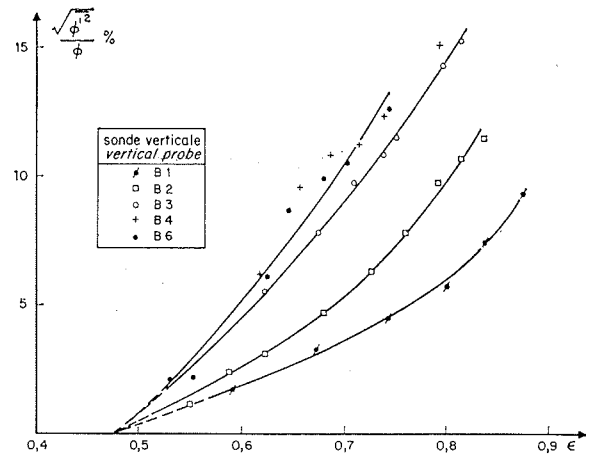
Les valeurs maximales du coefficient de transfert s'obtiennent pour des valeurs de la porosité voisines de 0,6 quel que soit le diamètre des particules utilisées, ainsi qu'on peut le voir sur la figure 6 où nous avons reporté les résultats des expériences de la figure 2 en remplaçant en abscisse la vitesse par la porosité. Jottrand [7] et Jagannadha Raju [8] obtiennent ce maximum pour des valeurs de la porosité respectivement égales à 0,58 et 0,7. L'augmentation du transfert avec le diamètre des particules est également en bon accord avec les résultats de ces auteurs.

Fluctuations de porosité dans le lit.

Pour une porosité donnée l'écart réduit $(\overline{\phi^2})^{1/2}/\phi$ croît avec la taille des particules : il part évidemment de zéro en lit fixe et croît à partir du minimum de fluidisation de façon quasi exponentielle (fig. 7).

Nous avons par ailleurs effectué des mesures de conductance et de fluctuation avec une sonde « cubique » (voir tableau 1) à quatre électrodes qui, prises deux à deux, nous donnent six possibilités de détermination de porosité et de fluctuation. Nous avons pu ainsi mettre en évidence l'absence de perturbation du lit par la sonde elle-même, l'isotropie de la porosité du lit et une faible anisotropie des fluctuations, celles-ci étant plus importantes dans le sens vertical que dans le sens horizontal. Cette anisotropie croît quand on rapproche la sonde de la grille ainsi que le montre la figure 8.

Nous avons, dans quelques cas, enregistré directement les fluctuations de conductance sur un enregistreur oscillographique rapide, et déposé manuellement cet enregistrement pour obtenir la courbe de répartition. Celle-ci correspond à une loi normale et les écarts types déterminés d'après la droite de Henry ne diffèrent en aucun cas de plus



7/ Ecart type relatif en fonction de la porosité locale. Relative standard deviation vs. porosity.

de 10 % de ceux déterminés au voltmètre thermique. Notre détermination expérimentale des deux paramètres : moyenne et écart type permet donc de définir entièrement la distribution. Tout récemment A.C. Trupp est parvenu à une conclusion analogue [9].

Discussion

Transfert de matière.

Jagannadha Raju a rassemblé des résultats correspondant à la partie décroissante des courbes $k = f(\epsilon)$ par la relation suivante :

$$j_D \epsilon = \frac{k}{u} \epsilon (Sc)^{2/3} = 0,43 (Re')^{-0,38}$$

où : Sc est le critère de Schmidt :

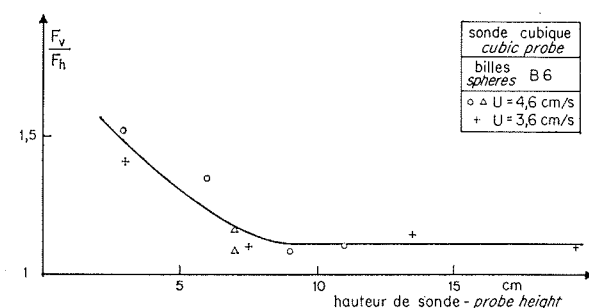
$$Sc = \frac{\mu}{\rho D}$$

Re' est un nombre de Reynolds modifié :

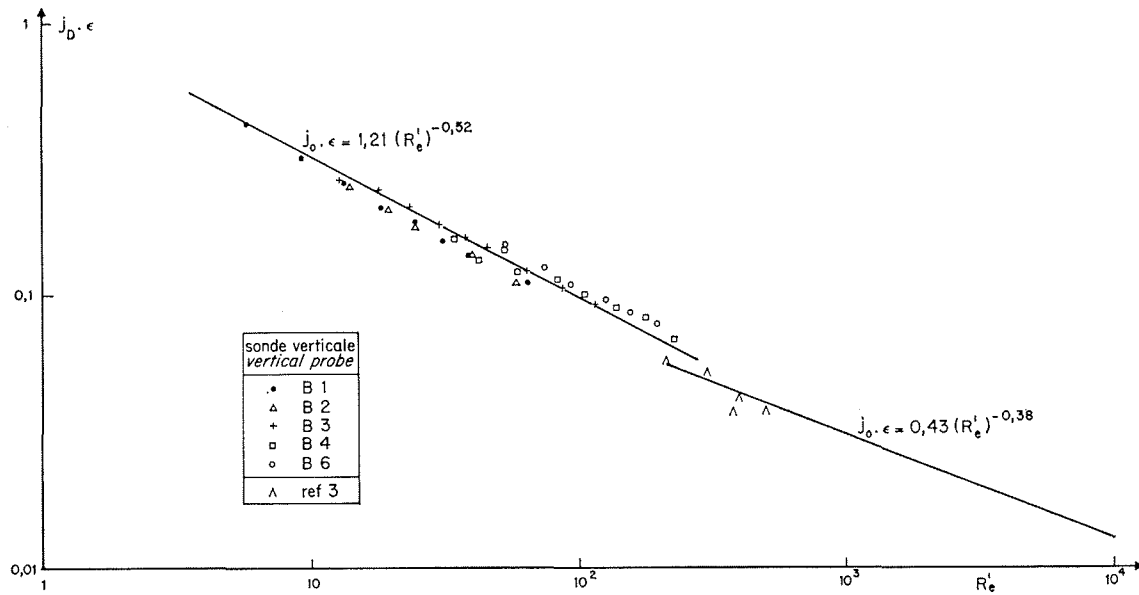
$$\frac{\rho u d_p}{\mu (1 - \epsilon)}$$

Nous avons utilisé la même relation pour nos résultats obtenus avec $6 < Re' < 200$ et nous proposons dans ce domaine la relation

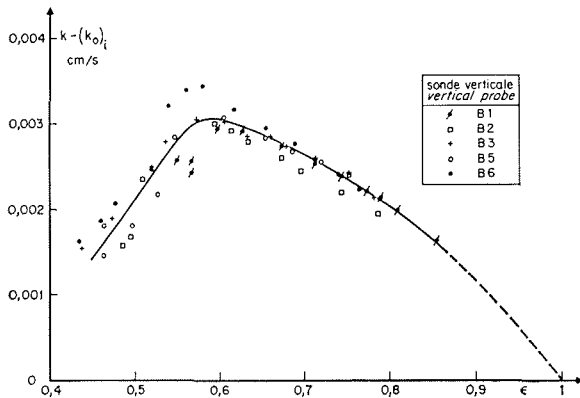
$$j_D \epsilon = 1,21 (Re')^{-0,52}$$



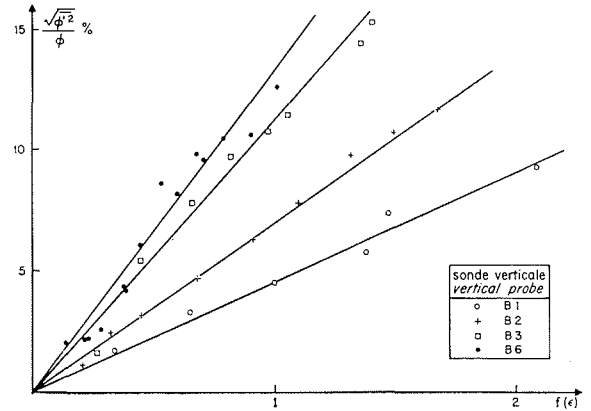
8/ Anisotrope des fluctuations. Anisotropic curve of fluctuations.



9/ Relation empirique de transfert de matière. Empirical mass transfer equation.



10/ Influence des particules sur le transfert de matière. Effect of particles on mass transfer.



11/ Fluctuations d'après notre relation. Fluctuations given by our relationship.

Ces résultats sont présentés sur la figure 9. Dans le liquide seul, nos résultats peuvent se mettre sous la forme :

$$Sh = 4,83 Re^{0,53}$$

où : Sh est le critère de Sherwood;

$$Sh = \frac{k_0 d_e}{D}$$

d_e est le diamètre de l'électrode;
Re le nombre de Reynolds relatif à l'électrode.

Cette relation est en bon accord avec d'autres relations déjà établies pour le transfert de matière vers les cylindres [10].

Effet des particules sur le transfert de matière.

Si $(k_0)_i$ est le coefficient de transfert de matière dans le liquide seul à une vitesse égale à la vitesse interstitielle dans le lit, la différence $k - (k_0)_i$ représentera l'effet dû au mouvement des particules. Sur la figure 10 nous avons porté $k - (k_0)_i$ en fonction

de la porosité locale ϵ . Nous observons que l'effet est maximal pour $\epsilon = 0,6$ et ne varie pas appréciablement avec la taille des particules.

Fluctuation de la concentration en solide.

Le rapport :

$$(\Phi^2)^{1/2} / \Phi = \frac{\Delta n}{n}$$

représente la fluctuation relative du nombre n de particules dans le volume V exploré par la sonde.

Si nous supposons que les mouvements de chaque particule sont complètement indépendants les uns des autres $\Delta n/n$ représentera les fluctuations d'un échantillonnage restreint dans une population de particules statistiquement indépendantes, c'est-à-dire [11] :

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}} \left(1 - \frac{b}{V} \right)$$

où b est le « covolume » de l'équation de Van der Waals.

Dans le cas d'un réseau cubique de sphères :

$$b = \frac{6 n v_g}{\pi}$$

en tenant compte que :

$$\frac{n}{V} = \frac{1 - \varepsilon}{v_g}$$

il vient :

$$\frac{\Delta n}{n} = \left(\frac{v_g}{V} \right)^{1/2} f(\varepsilon)$$

où :

$$f(\varepsilon) = \frac{1 - 6/\pi (1 - \varepsilon)}{(1 - \varepsilon)^{1/2}}$$

Nous avons observé que toutes les valeurs expérimentales de $\Delta n/n$ sont plus grandes que celles correspondant à cette valeur théorique. Nous avons donc supposé que les particules sont groupées en agglomérats qui se comportent comme des entités individuelles.

L'équation devient donc :

$$\frac{\Delta n}{n} = \left(\frac{a v_g}{V} \right)^{1/2} f(\varepsilon)$$

où a est le nombre de particules dans un agglomérat.

Nous avons testé la validité de cette équation (fig. 11). Les points correspondant aux mêmes particules s'alignent sensiblement sur des droites et les coefficients a déduits de leur pente sont les suivants :

$$\begin{aligned} a &= 1,06 \quad \text{pour} \quad d_g = 1\,070 \mu \\ a &= 3,6 \quad \text{pour} \quad d_g = 470 \mu \\ a &= 4,08 \quad \text{pour} \quad d_g = 350 \mu \end{aligned}$$

On notera que pour les particules les plus grosses a est égal à 1. Les fluctuations sont exactement celles prévues par la théorie et nous pourrions considérer le lit fluidisé comme un gaz de Van der Waals d'agglomérats de particules.

Notations

a	nombre de particules dans un agglomérat;
b	volume occupé par les particules dans la cellule (cm ³);
d_e	diamètre de l'électrode (cm);
d_g	taille des particules (cm);
D	coefficient de diffusion du ferri-cyanure (cm ² /s);
h	distance de la sonde au support du lit;
i	densité de courant (A/cm ²);
$j_D = \frac{k}{u}$	(Sc) ^{2/3} critère de Chilton et Colburn;
k	coefficient de transfert de masse dans le lit (cm/s);
k_0	coefficient de transfert de masse dans le liquide (cm/s);

$(k_0)_i$	coefficient de transfert de masse à la vitesse interstitielle (cm/s);
n	nombre de particules dans la cellule;
Δn	écart type des fluctuations de n ;
$Re = \frac{u \cdot d_e \cdot \rho}{\mu}$	nombre de Reynolds de l'électrode;
$Re' = \frac{u \cdot d_g}{\mu (1 - \varepsilon)}$	nombre de Reynolds du grain modifié;
$Sh = \frac{k_0 \cdot d_e}{D}$	nombre de Sherwood;
$Sc = \frac{\mu}{\rho \cdot D}$	nombre de Schmidt;
u	vitesse du fluide dans le tube vide (cm/s);
v_g	volume de la particule (cm ³);
V	volume exploré par la sonde (cm ³);
ε	porosité ou fraction de vide;
$\Phi = 1 - \varepsilon$	concentration en volume des particules;
Φ'	fluctuation de Φ ;
Φ'^2	variance de Φ ;
ρ	masse volumique du liquide (g/cm ³);
ρ_s	masse volumique du solide (g/cm ³);
μ	viscosité dynamique (poise);
B	désignation des billes de verre;
F_v	fluctuations entre les électrodes verticales de la sonde;
F_h	fluctuations entre les électrodes horizontales de la sonde;
φ	flux spécifique de matière (moles/cm ² .s);
δ	épaisseur de la couche limite diffusionnelle;
δ_0	épaisseur de la couche limite hydrodynamique;
C	concentration ionique (ion/cm ³).

Bibliographie

- [1] LÉBOUCHE et COGNET. — *Génie Chimique*, vol. 97, n° 12, 2 002.
- [2] COGNET. — Thèse, Nancy (1968).
- [3] LÉBOUCHE. — Thèse, Nancy (1968).
- [4] P. LE GOFF et C. PROST. — *Génie Chimique*, vol. 95, 1 (1966).
- [5] F. COEURET. — Thèse, Nancy (1967).
- [6] F. COEURET, P. LE GOFF et F. VERGNES. — Proceedings of the International Symposium on Fluidization (juin 1967), Eindhoven, Netherlands University Press Amsterdam, p. 537.
- [7] R. JOTTRAND et F. GRUNCHARD. — Third Congress of the European Federation of Chemical Engineering, London, B 74, 79 (1962).
- [8] JAGANNADHA RAJU et VENKATA RAO. — *Indian J. Techno.*, 3 (1965), 201.
- [9] TRUPP (A.C.). — Tripartite Chemical Engineering Conference, Montreal (25 septembre 1968).
- [10] GRASSMAN IBL TRUB. — *Chem. Inqnr. Techn.*, 8, (1961), 529.
- [11] ROCARD. — Thermodynamique, Masson & Cie, Paris.

M. le Président remercie M. VERGNES de sa communication qui est relative à des phénomènes particulièrement intéressants bien qu'il ne soit pas absolument certain qu'ils rentrent dans le cadre des mouvements turbulents au sens de la « Mécanique des fluides ». Il s'agit probablement d'un écoulement laminaire non stationnaire et aléatoire.

C'est absolument certain, dit M. VERGNES. Que la vitesse des grains soit prise égale à leur vitesse de chute libre ou que l'on suppose le grain immobile et que l'on adopte la vitesse interstitielle du fluide, il est toujours possible de calculer un nombre de Reynolds relatif au grain.

Au point de vue de l'interprétation, estime M. le Président, les phénomènes sont complètement différents. « Si vous avez un écoulement laminaire du type fluctuant entre les grains, il faut pour faire une théorie du phénomène, écrire les équations de Navier simplement et chercher des solutions avec des conditions aux frontières aléatoires — je ne sais pas si c'est possible — mais sans faire intervenir de corrélation telles que celles que nous faisons intervenir dans la définition de la diffusion turbulente; il y a là une différence de caractère ».

J'en suis bien d'accord, dit M. VERGNES.

M. LE GOFF pense qu'il y a une différence de langage entre les physico-chimistes et les mécaniciens.

Considérons par exemple, dit M. LE GOFF, un phénomène de transport de matière ou de chaleur dans un fluide en écoulement. Le physico-chimiste va chiffrer l'importance de ce phénomène par un coefficient de diffusion, une « diffusivité », mais il se contentera de cet aspect phénoménologique : il établira expérimentalement la loi de variation de cette diffusivité avec le débit et avec les autres paramètres et il la présentera par exemple sous la forme de la variation d'un critère de Péclet en fonction d'un critère de Reynolds. Mais il ne s'occupera pas de savoir si le phénomène de transport se fait à l'échelle moléculaire (régime laminaire) ou à l'échelle des tourbillons (régime turbulent).

Quand, ensuite, il constatera que la présence de grains en suspension dans le fluide augmente le flux de transport de matière et de chaleur vers une paroi, il dira que la présence des grains augmente la turbulence du fluide, ou crée de la turbulence s'il n'en existait pas, mais ceci n'est qu'une commodité de langage, car l'expérimentateur n'a aucune connaissance du mécanisme réel du transport, et il ne sait pas quelle est la part due à un phénomène moléculaire et celle due à la turbulence. A la vérité, on peut imaginer que ces fines particules en état d'agitation désordonnée viennent sans cesse déchirer la couche visqueuse laminaire qui avoisine une paroi et augmentent donc le coefficient de transfert vers cette paroi.

M. LE GOFF insiste, en outre, sur un autre aspect du problème qui intervient dans la théorie de la fluidisation et qui présente des analogies avec la turbulence des fluides : on peut, en effet, considérer l'ensemble des grains du lit fluidisé comme un *milieu continu équivalent*. L'agitation désordonnée des grains peut être assimilée à l'agitation thermique des molécules. On peut alors essayer de bâtir une théorie cinétique du lit fluidisé analogue à la théorie cinétique du gaz. On écrira dans ce milieu continu équivalent des équations classiques de la continuité et des bilans de quantité de mouvement. On définira une diffusivité des grains et même une « viscosité » de cet ensemble de grains. On sera alors normalement conduit à comparer ces propriétés de transport au sein de la phase « grains », aux propriétés de transport dans la phase fluide qui entoure les grains. Il est vraisemblable que « la turbulence » des grains et la « turbulence » du liquide qui entoure les grains sont des grandeurs liées.

Mais ces problèmes dépassent les compétences des physico-chimistes, ce n'est pas leur spécialité. Il serait souhaitable que les mécaniciens des fluides veuillent bien s'occuper de ces problèmes.

M. le Président observe que dans un écoulement turbulent le long d'une paroi lisse, il existe un film visqueux de type laminaire (lorsqu'on fait des moyennes), mais un film qui, en réalité, correspond à un champ de vitesse entièrement aléatoire et qui ressemble par ailleurs au champ de vitesse des écoulements turbulents.

Lorsqu'on veut traiter le problème de l'écoulement dans le film visqueux, si l'on veut déterminer des contraintes tangentielles par exemple, il faut appliquer simplement la loi :

$$\tau = k \frac{du}{dy}$$

Pour l'étude du phénomène qui nous intéresse, il est important d'adopter, pour l'écoulement entre les grains, une terminologie qui soit la terminologie des mécaniciens des fluides, sans cela aucune liaison entre les deux ne sera possible.

« Cela ne vous empêche pas de regarder l'ensemble de tout le milieu comme un milieu turbulent. A ce moment-là, vous pouvez faire intervenir des coefficients de diffusion turbulente analogues à ceux que nous avons introduits antérieurement. Seulement, je crois que si l'on veut essayer de remonter au mécanisme des phénomènes dans l'écoulement lui-même, il faut ne pas faire intervenir de véritable turbulence au sens où nous utilisons habituellement ce mot.

« D'autre part, la distance entre grains est tout de même grande par rapport aux dimensions des molécules, c'est-à-dire qu'entre grains on peut très bien appliquer des équations du type de l'équation de Navier pour décrire l'écoulement entre les grains.

« Il est important qu'on essaie d'adopter la même terminologie pour pouvoir se comprendre. »

M. DOLLFUS pose les deux questions suivantes :

« 1° A-t-on cherché à mesurer l'influence de la turbulence ou des fluctuations d'écoulement sur le transfert de matière entre le solide et le fluide ?

« 2° Le résultat trouvé pour le transfert de matière en fonction de la porosité (présentant un maximum, quel que soit la grosseur des grains) est-il comparable aux constatations faites en extraction liquide où on observe une efficacité maximale à un certain degré d'agitation, bien qu'une explication complète n'ait pas encore été trouvée ? »

MM. VERGNES et LE GOFF n'ont pas fait des expériences sur ce sujet, mais pensent que l'on pourrait trouver d'intéressants renseignements dans les nombreuses publications concernant la « fluidisation ».

M. THURRIOT demande :

« Peut-on utiliser le graphe universel $\frac{C}{C_0} = f(\epsilon)$ concernant la conductivité thermique d'un mélange ? »

M. VERGNES et M. LE GOFF ne le pensent pas car dans le cas d'un flux thermique, on n'est jamais en présence de grains parfaitement isolants répartis dans un milieu conducteur ainsi que cela se rencontre fréquemment dans le cas d'un flux électrique.

M. le Président lève la séance en soulignant l'intérêt des discussions et en renouvelant ses remerciements aux auteurs des mémoires qui les ont suscitées.