

TRANSFERTS DE MATIERE ENTRE UNE SPHERE SOUMISE A DES VIBRATIONS ET UN LIQUIDE EN MOUVEMENT

H. GIBERT et H. ANGELINO

I.N.P.T.—Institut du Génie Chimique, Chemin de la loge, 31 Toulouse, France

(Reçu le 6 Août 1973)

Résumé—Les auteurs ont étudié l'influence de vibrations sinusoïdales sur les transferts, en convection forcée, entre une sphère solide et un liquide. Comme pour la turbulence, les paramètres caractéristiques de la vibration sont au nombre de deux, l'intensité relative de vibration Re_v/Re et l'échelle relative de vibration $2a/D$.

Lorsqu'au cours d'un cycle de vibration il n'y a pas d'inversion du sens des écoulements par rapport à la sphère, l'influence de la vibration est traduite par un seul nombre adimensionnel.

$$V = \frac{Re_v}{Re} \left(\frac{D}{2a} \right)^{0,45}$$

Lorsque $V < 0,06$, les transferts obéissent aux lois du régime stationnaire et la vibration n'exerce pratiquement aucune influence.

Lorsque $V > 0,06$, les transferts sont accrus. L'intensité de transfert obéit à la relation empirique:

$$Sh_v \cdot Sc^{-1/3} = 0,477 Re^{0,538} (1 + 1,05(V - 0,06)^{1,26}),$$

avec, pour conditions d'application,

$$0,06 < V < 0,60$$

$$1250 < Re < 12\,000$$

$$0 < Re_v/Re < \frac{2}{\pi}$$

NOMENCLATURE

<p>a, amplitude de vibration [m];</p> <p>$2a/D$, échelle relative de vibration;</p> <p>A, coefficient numérique de l'équation (1);</p> <p>A_1, A_2, A_3, A_4, coefficients numériques dans l'équation (8);</p> <p>b, coefficient numérique dans l'équation (4);</p> <p>D, diamètre de la sphère [m];</p> <p>f, fréquence de vibration [s^{-1}];</p> <p>$I_{T,u}$, intensité de turbulence;</p> <p>m, exposant du nombre de Schmidt dans l'équation (1);</p> <p>n, exposant du nombre de Reynolds dans l'équation (1);</p> <p>Re, nombre de Reynolds de l'écoulement permanent, $\frac{DU}{\nu}$;</p> <p>Re_v, nombre de Reynolds vibrationnel, $Re_v = \frac{D4af}{\nu}$;</p> <p>Re_v/Re, intensité relative de vibration;</p> <p>Sh, nombre de Sherwood;</p>	<p>Sh_T, nombre de Sherwood d'un écoulement stationnaire;</p> <p>Sh_v, nombre de Sherwood moyen dans le temps en présence de vibrations;</p> <p>U, vitesse stationnaire du liquide [m/s];</p> <p>V, facteur de vibration, $V = \frac{Re_v}{Re} \left(\frac{2a}{D} \right)^{-0,45}$;</p> <p>$B$, coefficient numérique dans l'équation (4);</p> <p>ν, viscosité cinématique [m^2/s];</p> <p>ω, fréquence angulaire du mouvement vibratoire, $(\omega = 2\pi f)[s^{-1}]$.</p>
---	---

1. INTRODUCTION

POUR accroître les transferts par convection entre une paroi solide et un fluide, il importe d'augmenter dans toute la mesure du possible la turbulence du fluide au voisinage de la surface d'échange. Ainsi que l'expriment de récentes théories sur les transferts [1-4], l'idée directrice est de favoriser au maximum la pénétration de tourbillons frais, issus du coeur du fluide, au sein de la couche visqueuse adjacente à la paroi et d'en assurer le renouvellement.

Afin d'induire une certaine "turbulence" au fluide, de nombreux auteurs ont suggéré de soumettre la phase solide ou la phase fluide à diverses perturbations mécaniques, électriques ou acoustiques. Les études entreprises sur l'influence de la pulsation d'un liquide ou de la vibration d'une paroi d'échange procèdent de cette idée directrice.

En dépit de l'intérêt que présentent les milieux granulaires pour assurer des transferts efficaces, relativement peu d'études ont été consacrées au problème fondamental de transfert de matière entre la particule sphérique et un liquide en présence de vibrations [7-9]. En l'absence de corrélations précises, nous avons été conduits à examiner le cas du transfert à débit nul [10-11]. Nous aborderons ici le problème plus général où l'on soumet la sphère à des vibrations en présence d'un débit permanent.

2. ANALYSE DU PROBLEME

Lorsqu'on surimpose des vibrations sinusoïdales à un écoulement permanent, les phénomènes hydrodynamiques sont très différents de ceux rencontrés à débit nul. On conçoit en effet qu'avec des pulsations de faible fréquence le phénomène de transfert ressemble davantage à celui observé en écoulement permanent. La fluctuation de vitesse introduite par la pulsation n'intervient alors que comme une perturbation du courant principal et non plus comme paramètre directeur des transferts. D'autre part l'écoulement n'a plus lieu alternativement dans un sens puis dans un autre sur une demi période $T/2$, et la symétrie que l'on rencontre dans le problème à débit nul disparaît. Suivant l'importance de la fluctuation de vitesse par rapport à la vitesse moyenne, il existe ou non un écoulement en sens inverse pendant une durée $t < T/2$.

Pour comprendre l'évolution du phénomène, certains auteurs, Lemlich [5], puis Mori [8], ont supposé que les transferts obéissent à chaque instant aux lois du régime stationnaire. Admettant pour équation de transfert une relation puissance, du type (1),

$$Sh \cdot Sc^{-m} = AR^n \quad (1)$$

avec pour exposant, n , du nombre de Reynolds une valeur inférieure à l'unité, ils ont montré que le coefficient de transfert moyen, Sh_v , est abaissé lorsqu'un débit stationnaire se superpose un débit sinusoïdal pulsé tel qu'il n'y ait pas inversion du sens des écoulements. En valeur relative la diminution du transfert reste cependant faible et ne dépasse pas 10 pour cent dans le cas de la sphère où n est voisin de 0,50. Selon cette théorie, l'influence de la vibration ou de la pulsation n'est donc pas bénéfique sur le plan des transferts.

En fait, ainsi que nous avons pu le montrer à débit nul, [10-11], l'hypothèse de l'état quasi-stationnaire

n'est plus valable au delà d'une certaine fréquence ou intensité critique de vibration. Au delà de cette valeur critique il y a accroissement des transferts, phénomène qui est imputable à des modifications hydrodynamiques apparaissant au sein de la couche limite [12]. Dans ce cas, l'étude théorique du problème hydrodynamique, a fortiori celui du problème de transfert, est trop complexe pour que l'on puisse espérer en déduire une équation de transfert de matière. On a recours alors à l'expérimentation en essayant de choisir des paramètres caractéristiques. Nous avons retenu tout d'abord le rapport Re_v/Re composé, d'une part du nombre de Reynolds vibrationnel, Re_v , caractérisant la vibration [11], d'autre part du nombre de Reynolds, Re , de l'écoulement principal. Ce nombre mesure l'importance relative de la vibration par rapport à la composante stationnaire de la vitesse, U . Il est relié à l'amplitude, " a ", et à la fréquence " f " du mouvement par l'égalité

$$Re_v/Re = 4af/U. \quad (2)$$

Ainsi écrit, ce nombre ressemble à une "Intensité de turbulence" un peu particulière en ce sens que la fluctuation de vitesse imposée, est ici sinusoïdale et directionnelle et non aléatoire comme dans le cas d'un écoulement turbulent. Nous adopterons une terminologie identique et désignerons cette quantité par "Intensité relative de vibration".

Nous ferons également intervenir comme paramètre caractéristique l'échelle relative de vibration, $2a/D$, qui mesure l'importance de l'amplitude " a " par rapport au diamètre " D " de la sphère, et dont l'importance a déjà été soulignée lors de l'étude à débit nul [11].

En évaluant l'intensité du transfert par l'intermédiaire du critère de Sherwood, Sh_v , et en faisant référence à la valeur du critère obtenu en l'absence de vibration, Sh_T , la variation relative du transfert peut être traduite par une équation générale du type

$$\frac{Sh_v - Sh_T}{Sh_T} = f\left(\frac{Re_v}{Re}, \frac{2a}{D}\right). \quad (3)$$

3. METHODE EXPERIMENTALE

Pour suivre les transferts de matière nous avons utilisé une technique de mesure électrochimique dont le principe a été énoncé dans des publications antérieures [11, 13]. Nous avons choisi pour système oxydo-réducteur un mélange de ferricyanure et de ferrocyanure de potassium avec pour électrolyte indifférent une solution de soude de normalité $N/10$. La réduction du ferricyanure de potassium s'effectue au niveau d'une électrode sphérique en Nickel et le courant limite détecté est alors directement proportionnel au coefficient de transfert de matière. Cette technique de mesure est fiable et précise.

L'appareillage est schématiquement représenté sur la Fig. 1. Il se compose essentiellement d'une colonne de mesure de 94 mm de diamètre. La sphère, jouant le rôle de cathode, est placée au centre d'une contre électrode cylindrique en nickel et à une distance suffisante de la section d'homogénéisation assurant une distribution uniforme du liquide. Deux sphères ont été utilisées, l'une de diamètre 17,5 mm, l'autre de diamètre 24,5 mm.

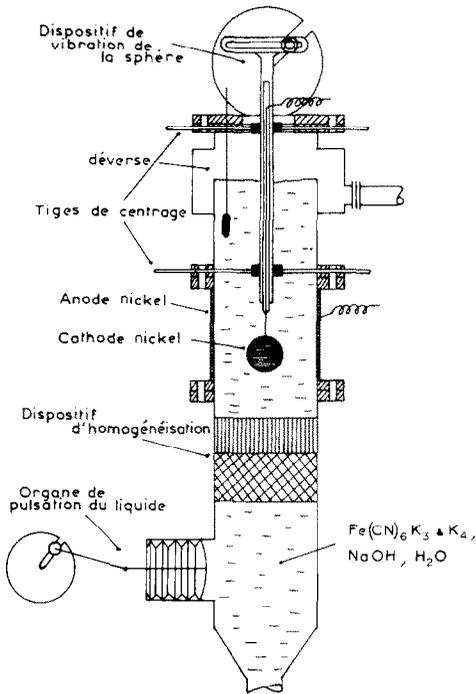


FIG. 1. Appareillage.

Pour communiquer des vibrations au système fluide-solide, deux solutions s'offraient à nous : (a) superposer au débit stationnaire un débit sinusoïdal pulsé en conservant fixe la sphère de mesure; (b) ou soumettre la sphère à des mouvements longitudinaux de vibration en conservant un débit liquide stationnaire.

Nous avons retenu la deuxième solution qui offre l'avantage de contrôler parfaitement l'amplitude et la fréquence du mouvement oscillatoire, sans altérer le débit stationnaire du liquide [11]. Les mouvements de vibration sont imprimés à la sphère et son support par l'intermédiaire d'un moteur à vitesse variable et d'un système bielle manivelle.

Les conditions opératoires utilisées sont indiquées dans le tableau 1 ainsi que le nombre ΣN , de mesures effectuées.

Tableau 1. Influence des vibrations sur les transferts en convection forcée conditions opératoires

	Bille $D = 17,50$ mm	Bille $D = 24,52$ mm
$\frac{2a}{D}$	$0,43 < \frac{2a}{D} < 1,66$	$0,41 < \frac{2a}{D} < 1,31$
f_{hz}	$0,76 < f < 3,64$	$0,76 < f < 3,64$
Re_v	$400 < Re_v < 3700$	$370 < Re_v < 5700$
Re	$2600 < Re < 9400$	$2600 < Re < 13000$
ΣN	340	396

4. RESULTATS

4.1. Influence de "l'intensité relative de vibration" Re_v/Re

Pour chaque sphère et pour diverses valeurs de l'amplitude relative, $2a/D$, du mouvement, nous avons suivi la variation de la quantité relative de matière transférée,

$$\frac{Sh_v - Sh_T}{Sh_T}$$

en fonction de l'intensité relative de vibration Re_v/Re . A titre d'exemple nous avons représenté l'évolution du phénomène sur les Figs. 2 et 3.

Chacune des courbes présentées correspond à une seule valeur de l'échelle relative de vibration, $2a/D$, mais à plusieurs nombres de Reynolds, Re . Les points expérimentaux sont régulièrement distribués autour d'une courbe moyenne. Ce fait illustre clairement que le nombre de Reynolds n'exerce aucune influence sur l'intensité relative du transfert, si ce n'est par l'intermédiaire de l'intensité relative de vibration Re_v/Re . Ce dernier paramètre s'avère donc bien choisi.

L'examen de ces résultats appelle deux autres remarques. En premier lieu, lorsque Re_v/Re est inférieur à une certaine "valeur critique", l'intensité de transfert est inchangée en présence de vibrations. Il a été même observé dans certains cas une légère diminution des transferts, de l'ordre de 2 à 3 pour cent, dont il n'a pas été tenu compte. La valeur "critique" du rapport Re_v/Re , fonction de l'échelle relative de vibration, augmente de 0,08 à 0,12 lorsque $2a/D$ croît de 1,14 à 1,49. En second lieu, au-delà de la valeur critique il y a accroissement des transferts qui peut atteindre 80 pour cent lorsque Re_v/Re est supérieur à l'unité. Il convient en outre de signaler un changement de concavité de la courbe tracée sur la Fig. 3, pour Re_v/Re compris entre 0,6 et 0,7. Cette observation est générale pour toutes les courbes présentées dans cette gamme de variation et ce changement correspond à une modification d'ordre hydrodynamique qui survient pour la

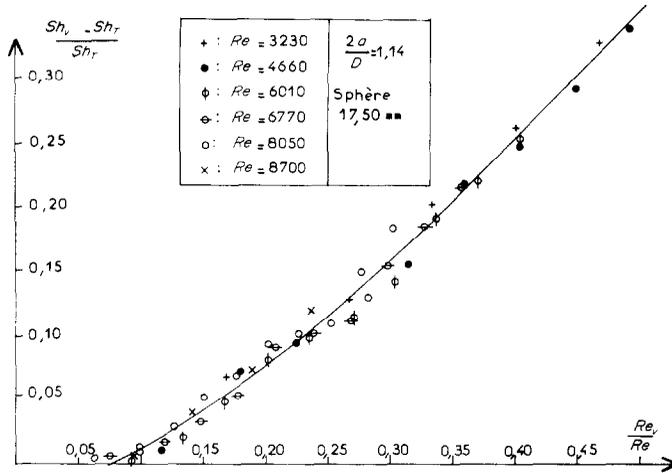


FIG. 2. Influence de l'intensité relative de vibration sur les transferts,

$$0 < \frac{Re_v}{Re} < 0,50.$$

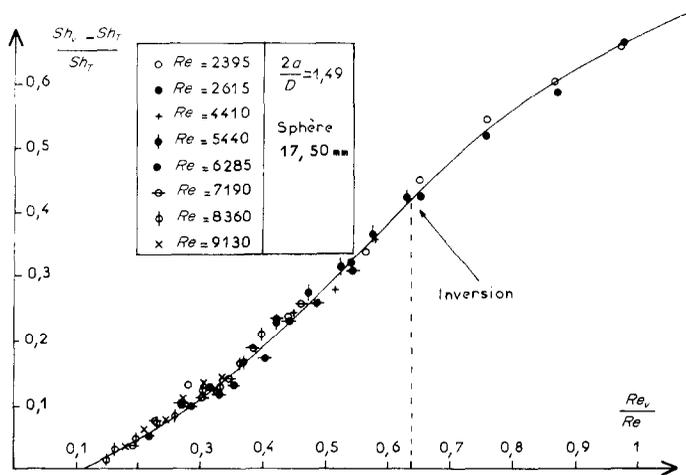


FIG. 3. Influence de l'intensité relative de vibration sur les transferts,

$$0 < \frac{Re_v}{Re} < 1.$$

valeur remarquable

$$\frac{Re_v}{Re} = \frac{4af}{a\omega} = \frac{2}{\pi}.$$

A partir de cette valeur il existe une phase d'inversion de la vitesse relative par rapport à la sphère qui a pour effet de modifier profondément les transferts.

4.2. Définition d'une grandeur caractéristique de la vibration

L'intensité relative de vibration Re_v/Re , ne suffit pas à caractériser l'influence de la vibration sur les transferts. En effet, les courbes obtenues à $2a/D$ constant

ne sont pas superposables ce qui signifie que l'accroissement de transfert dépend également de l'échelle relative de vibration. Pour préciser cette influence nous avons recherché, pour des accroissements donnés du transfert, 10, 20, 30 et 40 pour cent la relation qui lie $2a/D$ à Re_v/Re . Les résultats obtenus lorsque Re_v/Re est inférieur à $2/\pi$ sont consignés sur la Fig. 4. En coordonnées logarithmiques nous obtenons des droites. Pour un accroissement donné des transferts nous pouvons donc écrire

$$\log \frac{Re_v}{Re} = \beta \log \frac{2a}{D} + b. \tag{4}$$

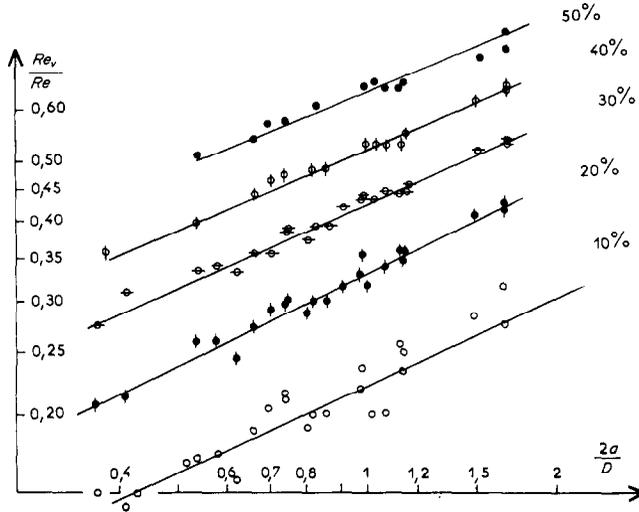


FIG. 4. Influence de l'échelle relative de vibration sur les transferts.

Pour l'ensemble de nos expériences le coefficient numérique peut être considéré comme constant avec pour valeur moyenne $\beta = 0,45$. En conséquence l'accroissement de transfert ne dépend que du paramètre V

$$V = e^{\beta} = \frac{Re_v}{Re} \left(\frac{2a}{D} \right)^{-0,45} \quad (5)$$

Ce facteur de vibration ainsi découvert, V , caractérise l'influence de la vibration sur les transferts lorsque l'intensité relative de vibration est inférieure à $2/\pi$.

4.3. Corrélation des résultats

Pour chaque expérience réalisée nous avons calculé l'accroissement de transfert et le facteur de vibration correspondant. Nous avons ensuite recherché la fonction qui relie ces deux grandeurs.

Il convient ici de distinguer deux cas suivant la valeur de l'intensité relative de vibration.

4.3.1. $Re_v/Re < 2/\pi$. Si l'on se réfère à un mouvement sinusoïdal de vibration, il ne peut y avoir, dans ce cas, inversion du sens des écoulements par rapport à la sphère. Les résultats correspondants sont traduits graphiquement sur la Fig. 5.

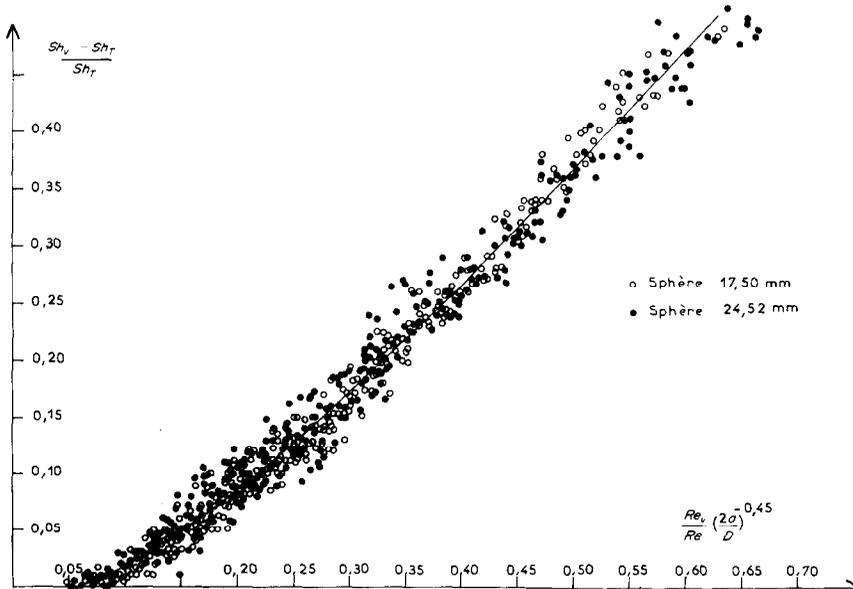


FIG. 5. Influence du facteur de vibration "V" sur les transferts.

Ce mode de corrélation s'avère dans l'ensemble satisfaisant avec une faible dispersion des points autour de la courbe moyenne.

Pour $V \leq 0,06$, il n'y a pas d'accroissement des transferts lorsqu'on surimpose des vibrations au débit stationnaire et le rapport $(Sh_V - Sh_T)/Sh_T$ conserve une valeur nulle.

Au-delà du seuil "critique" 0,06, les transferts augmentent avec V . L'accroissement est progressif et indépendant de la sphère considérée. En outre, contrairement à ce qui a été établi lors de l'étude effectuée à débit nul [11] cet accroissement est favorisé par une diminution de l'amplitude relative $2a/D$. Pour la valeur maximale de V obtenue soit 0,60, les transferts sont accrus de près de 50 pour cent.

Pour la gamme de variation, $0,06 < V < 0,60$, nous avons recherché une expression analytique susceptible de traduire l'évolution du phénomène. Cette fonction, dont la courbe représentative est tracée en trait continu sur la Fig. 5, s'écrit

$$\frac{Sh_V - Sh_T}{Sh_T} = 1,05 \left[\frac{Re_V}{Re} \left(\frac{2a}{D} \right)^{-0,45} - 0,06 \right]^{1,26} \quad (6)$$

Si nous faisons intervenir dans cette équation l'expression empirique de Sh_T , proposée lors d'une étude préalable (3) des transferts en régime stationnaire, nous obtenons finalement

$$Sh_V Sc^{-1/3} = 0,477 Re^{0,538} \times \left[1 + 1,05 \left[\frac{Re_V}{Re} \left(\frac{D}{2a} \right)^{0,45} - 0,06 \right]^{1,26} \right] \quad (7)$$

avec pour conditions d'application

$$\frac{Re_V}{Re} < \frac{2}{\pi}$$

et $1250 < Re < 12000$.

3.3.2. $Re_V/Re > 2/\pi$. Il y a dans ce cas, inversion du sens des écoulements par rapport à la sphère, durant une fraction du cycle de pulsation. L'accroissement relatif de transfert est alors une fonction non seulement du facteur de pulsation précédemment défini,

$$\frac{Re_V}{Re} \left(\frac{2a}{D} \right)^{-0,45},$$

mais encore de la valeur de Re_V/Re qui fixe la durée d'inversion; le mode de corrélation proposé pour $Re_V/Re < 2/\pi$ n'est donc plus valable.

Il conviendrait d'entreprendre une étude systématique de ce nouveau phénomène et de proposer un autre mode de corrélation. Ayant réalisé en fait peu de mesures pour $Re_V/Re > 2/\pi$ nous avons écarté ce cas qui ne présente, au demeurant, qu'un intérêt pratique limité puisqu'il correspond aux faibles valeurs, du nombre de Reynolds.

5. DISCUSSION DES RESULTATS

Le paramètre "Intensité relative de vibration", Re_V/Re , peut être rapproché de "l'intensité de turbulence" qui caractérise l'importance des composantes erratiques de la vitesse par rapport à la vitesse moyenne de l'écoulement. De façon similaire, "l'échelle relative de vibration" $2a/D$ mesure la dimension relative de la perturbation tout comme l'échelle de turbulence mesure la dimension des tourbillons au sein d'un écoulement turbulent.

Nous remarquerons donc que les critères que nous avons découverts pour traduire l'influence de la vibration, sont analogues à ceux utilisés pour mesurer la turbulence d'un écoulement. En composant ces deux grandeurs on peut définir un seul groupe adimensionnel, V , caractérisant l'influence des vibrations sur le transfert de matière. Il est intéressant de noter que ce facteur de vibration révèle une influence prépondérante de la fréquence de vibration devant celle de l'amplitude. Cette observation est opposée

$$V \propto a^{0,55} f$$

à celle précédemment faite à débit nul (11).

La valeur limite du facteur de vibration $V_l = 0,06$ correspond à l'intensité critique de vibration au-delà de laquelle il y a accroissement des transferts. En toute rigueur, ce nombre ne s'identifie pas exactement au critère limite de l'état quasi stationnaire qui doit avoir une valeur légèrement plus faible. En effet, il est probable que, conformément au résultat suggéré sur la base de l'hypothèse de l'état quasi stationnaire (8), les transferts sont légèrement diminués, lorsque $0 < V < 0,06$. En conséquence, si l'on se réfère à l'hypothèse de l'état quasi stationnaire, il y a donc déjà accroissement de transfert pour la valeur limite 0,06.

Nous remarquerons enfin que pour $V > 0,06$ l'accroissement des transferts est sensible, mais que les vibrations n'exercent aucune influence sur la valeur de l'exposant du nombre de Reynolds qui est le même que pour un écoulement permanent. Ce résultat doit être rapproché de celui de Galloway et Sage [14] qui ont proposé une équation de transfert faisant apparaître l'intensité de turbulence, $I_{T,u}$, ce paramètre n'intervenant que pour modifier les coefficients numériques de l'expression correspondante en l'absence de turbulence.

$$Sh_T = 2 + Re^{1/2} Sc^{1/3} \times [A_1 + (A_2 I_{T,u} (I_{T,u} + A_3) + A_4) Re^{1/2} Sc^{1/6}]. \quad (8)$$

Ce résultat suggère en outre que les mécanismes de transfert ne sont pas modifiés par la vibration, mais que la vibration favorise la pénétration du soluté au sein de la couche visqueuse proche de la paroi. Nous retrouvons ici une conclusion précédemment énoncée lors de l'étude à débit nul [11].

6. CONCLUSIONS

Au cours de cette étude, nous avons montré que l'influence de la vibration sur les transferts en convection forcée, entre une sphère et un liquide, se traduit en général par une augmentation des échanges. L'augmentation relative des transferts demeure cependant faible et en général inférieure à 50 pour cent.

Les paramètres directeurs des transferts que nous avons dégagés sont au nombre de deux: (a) le facteur, Re_v/Re , que nous avons appelé "Intensité relative de vibration", mesure l'importance de la fluctuation moyenne de vitesse par rapport à la vitesse moyenne de l'écoulement; (b) le facteur, $2a/D$, que nous avons appelé "Echelle relative de vibration", mesure la dimension relative de la vibration par rapport à l'élément d'échange.

Partant de ces nombres adimensionnels, nous avons défini une grandeur, V , appelée facteur de vibration, qui traduit le régime de vibration

$$V = \frac{Re_v}{Re} \left[\frac{D}{2a} \right]^{0.45} \quad (5)$$

(c) Si $V < 0,06$, on peut considérer que l'intensité des transferts n'est pas modifiée lorsqu'on imprime des vibrations au système. Les lois de transfert du régime stationnaire s'appliquent et on peut songer à employer la méthode électrochimique pour déterminer, avec une sonde sphérique de petite dimension, la vitesse instantanée d'un liquide.

(d) Si $V > 0,06$, les transferts sont accrus. Pour traduire l'évolution du phénomène, nous proposons une équation empirique établie à partir de plus de 700 points expérimentaux.

$$Sh_v Sc^{-1/3} = 0,477 Re^{0,538} [1 + 1,05(V - 0,06)^{1,26}] \quad (7)$$

MASS TRANSFER BETWEEN A VIBRATING SPHERE AND LIQUID FLOW

Abstract—The influence of sinusoidal vibrations on forced convection mass transfer between a solid sphere and a liquid has been studied. As for turbulence the vibrations are described by two characteristic parameters, the relative intensity of vibration Re_v/Re and the relative level of vibration $2a/D$.

If there is no inversion in the flow direction with respect to the sphere during a vibration cycle, the influence of the vibration is expressed by a single dimensionless number.

$$V = \frac{Re_v}{Re} \left(\frac{D}{2a} \right)^{0.45}$$

When $V < 0.06$ transfers follow the laws of the stationary regime and the vibration has practically no influence.

When $V > 0.06$ transfers are increased. The intensity of transfer obey to the following empirical relation

$$Sh_v Sc^{-1/3} = 0.477 Re^{0.538} (1 + 1.05(V - 0.06)^{1.26})$$

for

$$0.06 < V < 0.60$$

$$1250 < Re < 12000$$

$$0 < Re_v/Re < \frac{2}{\pi}$$

avec

$$0,06 \leq V \leq 0,60$$

$$1250 < Re < 12000$$

$$0 < Re_v/Re < 2/\pi$$

BIBLIOGRAPHIE

1. P. Harriot, A review of mass transfer to interfaces, *Can. J. Chem. Engng* **40**, 60–69 (1962).
2. P. Harriot, A random eddy modification of the penetration theory, *Chem. Engng Sci.* **17**, 149–154 (1962).
3. E. Ruckenstein, Heat or mass transfer to turbulent separated flow, *Chem. Engng Sci.* **25**, 819–824 (1970).
4. E. Ruckenstein, Mass or heat transfer from a solid boundary, *Int. J. Heat Mass Transfer* **13**, 1283–1291 (1970).
5. R. Lemlich, Vibration and pulsation boost heat transfer, *Chem. Engng* **68**, 171–176 (1961).
6. A. Clamen et W. H. Gauvin, Effects of turbulence on particulate heat and mass transfer, *Can. J. Chem. Engng* **46**, 223–228 (1968).
7. S. Bretsznajder, M. Jaszczak et W. Pasiuk, Increasing the rate of certain industrial chemical processes by the use of vibration, *Int. Chem. Engng* **3**, 496–502 (1963).
8. Y. Mori, M. Imbayashi, K. Hisikata et Y. Yosmida, Unsteady heat and mass transfer from spheres, *Int. J. Heat Mass Transfer* **12**, 571–576 (1969).
9. J. P. Couderc, Thèse Docteur ès Sciences, Toulouse (1971).
10. H. Gibert, Thèse Docteur ès Sciences, Toulouse (1972).
11. H. Gibert et H. Angelino, Influence des pulsations sur les transferts de matière entre une sphère et un liquide, *Can. J. Chem. Engng* **51**, 319 (1973).
12. R. M. Fand et E. M. Peebles, A comparison of the influence of mechanical and acoustical vibrations on free convection from a horizontal cylinder, *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs* **84**, 268 (1962).
13. H. Gibert, J. P. Couderc et H. Angelino, Etude des transferts de matière entre une sphère et un liquide en convection forcée, *Chem. Engng Sci.* **27**, 45–59 (1972).
14. T. R. Galloway et B. H. Sage, Thermal and material transport from spheres, *Int. J. Heat Mass Transfer* **10**, 1195 (1967).

STOFFÜBERGANG ZWISCHEN EINER OSZILLIERENDEN KUGEL UND EINER BEWEGTEN FLÜSSIGKEIT

Zusammenfassung—Der Einfluß sinusförmiger Schwingungen auf den Stoffübergang durch Zwangskonvektion zwischen einer festen Kugel und einer Flüssigkeit wurde untersucht. Wie bei Turbulenz werden die Schwingungen durch zwei charakteristische Parameter beschrieben: die relative Schwingungsintensität Re_v/Re und das relative Schwingungsniveau $2a/D$.

Wenn keine Strömungsumkehr bezüglich der Kugel bei einer Schwingungsperiode stattfindet, läßt sich der Einfluß der Schwingung durch einen einzigen dimensionslosen Parameter beschreiben.

$$V = \frac{Re_v}{Re} \left(\frac{D}{2a} \right)^{0,45}$$

Für $V < 0,06$ folgt der Stoffübergang den Gesetzen des stationären Falls, die Vibration hat praktisch keinen Einfluß.

Für $V > 0,06$ wird der Stoffübergang erhöht, die Intensität des Stoffüberganges gehorcht der folgenden empirischen Beziehung

$$Sh_v \cdot Sc^{-1/3} = 0,477 Re^{0,538} [1 + 1,05(V - 0,06)^{1,26}]$$

für

$$0,06 < V < 0,60$$

$$1250 < Re < 12\,000$$

$$0 < Re_v/Re < 2\pi.$$

МАССООБМЕН МЕЖДУ ВИБРИРУЮЩЕЙ СФЕРОЙ И ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

Аннотация—Исследовано влияние синусоидальных колебаний на скорость массопереноса у границы твердой сферы с жидкостью в условиях вынужденной конвекции.

В качестве характеристических параметров вибрационного движения были выбраны относительная скорость вибрации (Re_v/Re) и относительный масштаб колебания ($2a/D$).

Так как направление течения жидкости вдоль сферической поверхности не меняется в течении одного цикла, влияние вибрации учитывалось при помощи только одного критерия

$$V = \frac{Re_v}{Re} \left(\frac{D}{2a} \right)^{0,45}$$

В работе показано, что при $V < 0,06$ скорость переноса подчиняется законам стационарного режима течения и влияние вибрации практически отсутствует.

При $V > 0,06$ скорость переноса возрастает, что описывается эмпирическим уравнением

$$Sh_v \cdot Sc^{-1/3} = 0,477 Re^{0,538} (1 + 1,05(V - 0,06)^{1,26})$$

где

$$0,06 < V < 0,6$$

$$1250 < Re < 12\,000$$

$$0 < \frac{Re_v}{Re} < \frac{2}{\pi}.$$