

# STRUCTURE DYNAMIQUE ET TRANSFERT DE MATIERE LIQUIDE- PAROI DANS LE CAS DE L'ECOULEMENT LAMINAIRE TOURBILLONNAIRE DE COUETTE-POISEUILLE

J. LEGRAND, F. COEURET et M. BILLON

Ecole Nationale Supérieure de Chimie, Avenue du Général Leclerc, 35000 Rennes Beaulieu, France

(Reçu le 20 Décembre 1981 et sous forme révisée le 23 Novembre 1982)

**Résumé**—L'étude concerne l'obtention et l'analyse d'informations de caractère local au niveau du cylindre intérieur tournant d'un dispositif combinant l'écoulement axial forcé dans un espace annulaire cylindrique et la rotation du cylindre intérieur. Elle met en jeu des mesures de coefficient de transfert de matière liquide-paroi et se rapporte à un seul espace intercylindres, d'épaisseur 0,5 cm. On justifie l'existence de deux types d'écoulement dans le domaine du régime laminaire tourbillonnaire; ils diffèrent entre eux par la nature tourbillonnaire elle-même et permettent d'expliquer des distinctions apparues dans des études de transfert de matière global. On examine également l'évolution de la structure tourbillonnaire de l'écoulement en fonction des paramètres hydrodynamiques  $Re_a$  et  $Ta$  ( $30 < Re_a < 770$  et  $0 < Ta < 1500$ ).

## NOMENCLATURE

D.S.,	densité spectrale du signal;
$e$ ,	épaisseur de l'espace annulaire intercylindres, $R_2 - R_1$ ;
$f$ ,	fréquence;
$f_a$ ,	fréquence axiale;
$f_r$ ,	fréquence de la rotation du cylindre intérieur;
$f_c$ ,	fréquence centrale du signal;
$I_n$ ,	courant limite de diffusion instantané;
$\bar{I}$ ,	courant limite moyen temporel;
$J_{1-n}$ ,	intercorrélation entre la microélectrode no. 1 et la microélectrode $n$ ;
$P$ ,	période du signal;
$Q$ ,	débit axial d'électrolyte;
$R$ ,	retard dû au parcours d'une structure entre deux microélectrodes;
$R_1$ ,	rayon du cylindre intérieur tournant;
$R_2$ ,	rayon intérieur du cylindre extérieur fixe;
$Re_a$ ,	nombre de Reynolds axial, $2eu/v$ ;
$Ta$ ,	nombre de Taylor, $(R_1\omega e/v)(e/R_1)^{1/2}$ ;
$T$ ,	temps d'acquisition pour une expérience donnée;
$u$ ,	vitesse axiale moyenne dans l'espace annulaire;
$v_s$ ,	vitesse axiale de la structure tourbillonnaire;
$x(n), y(n)$ ,	fonctions représentant des courants instantanés;
$X(f), Y(f)$ ,	transformées de Fourier de $x(n)$ et $y(n)$ ;
$\Delta$ ,	longueur de la structure tourbillonnaire;
$\Delta f$ ,	largeur de bande du spectre du signal;
$\Delta I$ ,	écart-type du signal recueilli;
$\nu$ ,	viscosité cinématique;
$\omega$ ,	vitesse angulaire de rotation du cylindre intérieur.

## 1. INTRODUCTION

LES ÉTUDES locales de l'écoulement de Couette-Poiseuille combinant la rotation du cylindre intérieur et un débit axial dans un espace annulaire cylindrique ont surtout été entreprises dans le but de préciser les transitions entre les différents régimes hydrodynamiques, et en particulier la transition entre le régime laminaire pur et le régime laminaire avec tourbillons; les travaux correspondant mettent en oeuvre, soit l'anémométrie à fil chaud [1, 2], soit des thermocouples [3].

A notre connaissance, seuls Kataoka *et al.* [4, 13] ont entrepris des mesures locales pour étudier la structure de l'écoulement de Couette-Poiseuille. A l'aide de la méthode électrochimique, et en utilisant des microélectrodes disposées à la surface intérieure du cylindre fixe ou situées dans l'espace intercylindres lui-même, ils ont recherché l'évolution des structures tourbillonnaires avec les deux paramètres hydrodynamiques  $Re_a$  (nombre de Reynolds axial) et  $Ta$  (nombre de Taylor), dans le cas du régime laminaire avec tourbillons de Taylor. C'est ainsi qu'ils ont montré que la superposition d'un débit axial à l'écoulement de Couette ( $Re_a = 0$ ) a pour conséquence de déformer les tourbillons, de réduire la valeur moyenne temporelle des coefficients locaux de transfert de matière ainsi que les écarts à cette valeur moyenne [4]. L'étude de Kataoka *et al.* a été réalisée dans une cellule définie par un rapport de rayons des cylindres  $R_2/R_1 = 1,62$  ( $e = 1,8$  cm); un domaine assez étendu de variation de  $Ta$  a été exploré ( $35 < Ta < 9200$ ) tandis que  $Re_a$  a peu varié ( $0 < Re_a < 50$ ).

Des travaux antérieurs portant sur le transfert de matière global [5-7] ont mis en évidence, quelle que soit la valeur de la distance intercylindre parmi les trois utilisées, l'importance de la valeur  $Re_a = 300$  qui semble être une valeur frontière entre deux domaines: (1) Pour  $Re_a < 300$ , caractérisé par un transfert de matière d'autant moins important que  $Re_a$  augmente

depuis zéro jusqu'à 30–50 environ [4]. Au-delà de ces dernières valeurs, et jusqu'à  $Re_a = 300$ , l'influence de  $Re_a$  sur le transfert de matière n'est pas discernable expérimentalement. (2) Pour  $Re_a > 300$ , où le débit axial a une influence positive sur le transfert de matière.

La présente étude a pour objet de rechercher, par des mesures locales de coefficient de transfert de matière, si ces deux domaines se distinguent par la structure tourbillonnaire elle-même. Elle est centrée sur l'obtention du courant limite instantané de diffusion à des microélectrodes et sur l'analyse de ce courant: valeur moyenne, écart-type, densité spectrale, intercorrélation entre les signaux recueillis sur les microélectrodes. Dans cette analyse, l'idée sera d'admettre

que le régime est laminaire tourbillonnaire lorsque le courant prélevé sur les microélectrodes présente une décomposition en fréquence pauvre en harmoniques associés à une fréquence fondamentalement stable.

## 2. TECHNIQUE EXPERIMENTALE

### 2.1. Cellule, électrolyte, électrodes

La cellule utilisée est représentée à la Fig. 1. Elle est géométriquement identique à celle employée en [7] pour des déterminations de coefficients globaux de transfert de matière au cylindre intérieur tournant ( $R_2/R_1 = 1,29$ ; espace intercylindre  $e = 0,5$  cm) et, comme en [7], les paramètres  $Re_a$  et  $Ta$  peuvent varier

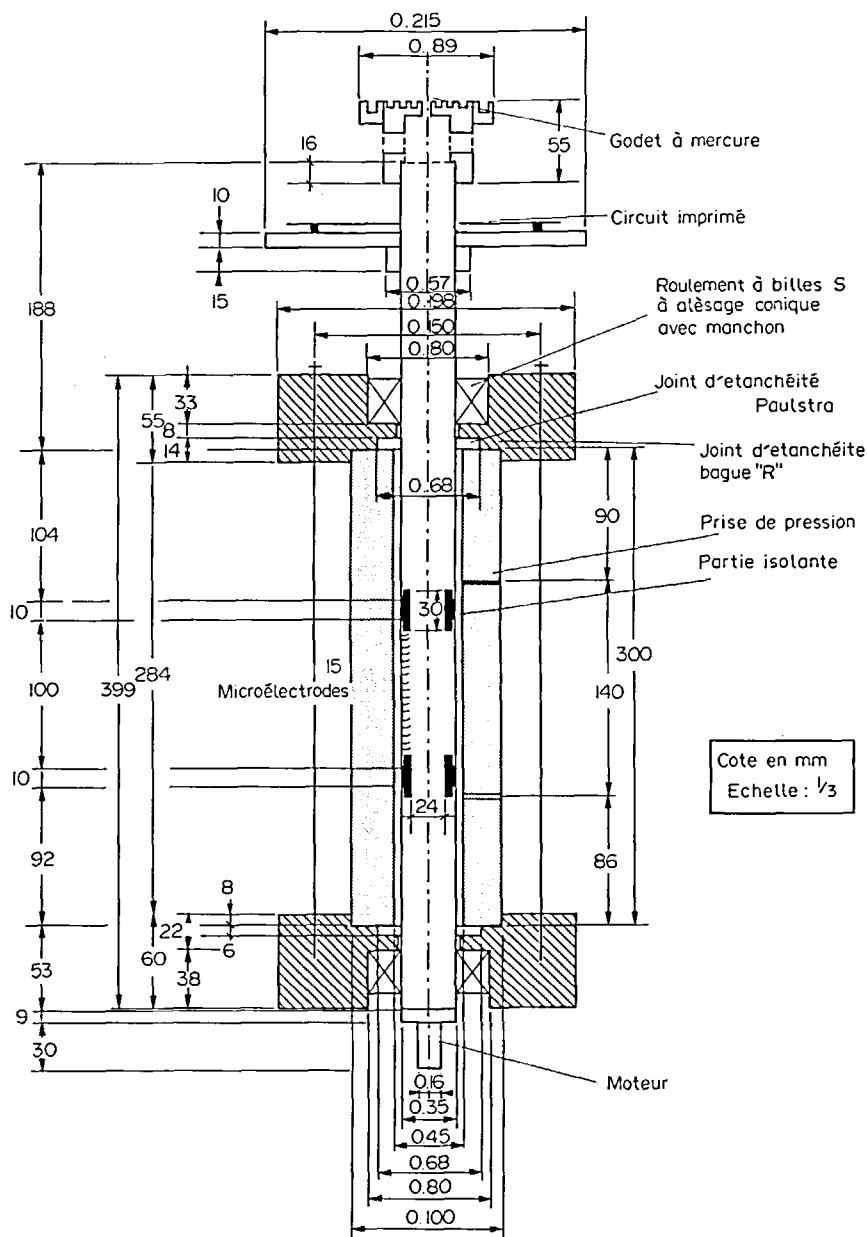


FIG. 1. Vue en coupe détaillée de la cellule de mesure.

dans les limites suivantes:  $Re_a$  de 30 à 770,  $Ta$  de zéro à 1500. Un seul espace intercylindre a été étudié ( $e = 0,5$  cm) et le circuit hydraulique est le même qu'en [5-7].

Une vue plus simplifiée de la cellule est donnée à la Fig. 2(a). La partie médiane du cylindre tournant joue, comme en [5], le rôle de surface de transfert (cathode) mais, dans le but de la présente étude, elle est porteuse de microélectrodes. Quinze microélectrodes, régulièrement espacées de 0,5 cm, sont réparties le long d'une génératrice du cylindre cathodique (voir Fig. 1). Chacune d'entre elles [Fig. 2(b)] est constituée par la section droite d'un fil de platine de 0,04 cm de diamètre; elle est isolée électriquement du reste du cylindre, dans la paroi duquel elle est insérée, par un film d'araldite de 0,01 cm d'épaisseur moyenne. La technique de réalisation des ces microélectrodes a déjà été mise en oeuvre et éprouvée dans des travaux antérieurs, en [8] par exemple. De telles microélectrodes incorporées à la surface d'une électrode autorisent deux types de mesures [8]: (1) Des mesures dites 'en paroi inerte': seule la microélectrode est connectée électriquement, le reste de la surface dans laquelle elle est insérée se comportant donc comme une surface inerte vis-à-vis du transfert.

Dans de telles conditions, l'on sait que le courant limite de diffusion à la microélectrode permet d'accéder à la valeur de la contrainte pariétale de frottement.

(2) Des mesures dites 'en paroi conductrice': la microélectrode considérée se trouve électriquement connectée au reste de la surface; le courant limite de

diffusion correspondant au seul transfert sur la microélectrode permet de connaître la valeur locale, à l'endroit de la microélectrode, du coefficient de transfert de matière.

Comme antérieurement en [5, 8] on met en oeuvre, pour atteindre le courant limite de diffusion, la méthode de réduction électrochimique de l'ion ferricyanure à partir d'une solution aqueuse de soude 0,5 N contenant du ferricyanure de potassium à la concentration 0,005 M. La température a été réglée à 30°C sauf pour les analyses en fréquence des signaux où les expériences ont été menées sans régulation (et donc à la température ambiante) avec une température comprise entre 22 et 28°C pour ce qui concerne l'électrolyte. Ce mode de travail sans régulation de température a dû être retenu afin d'éviter de perturber l'analyse en fréquence des signaux électriques par des fréquences parasites consécutives à la régulation de température.

De la même façon que pour l'étude du transfert de matière global [7], l'anode est constituée par les deux éléments de tube cylindrique en nickel situés de part et d'autre de la cathode [voir Fig. 2(a)].

## 2.2. Méthode d'obtention des informations locales

On conçoit qu'il n'est pas aisé de recueillir l'information électrique provenant de l'une ou de l'autre des microélectrodes incorporées à la surface du cylindre intérieur tournant. Ce dernier est mis en rotation par sa partie inférieure, laissant ainsi libre l'extrémité supérieure pour recevoir un disque circulaire en P.V.C. destiné à porter un circuit imprimé

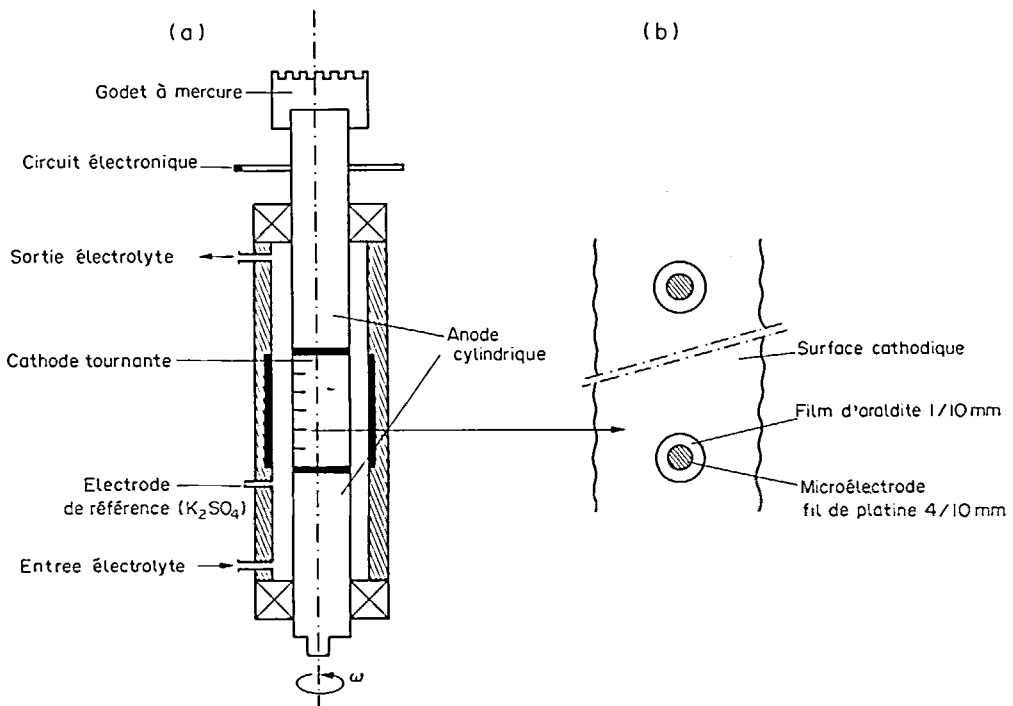


FIG. 2. Vues schématiques: (a) de l'ensemble de la cellule avec l'emplacement des électrodes, (b) des microélectrodes avec leur situation sur la cathode.

[voir Figs. 1 et 2(a)]. Ce circuit imprimé de multiplexage permet de recueillir, en vue de son analyse, le courant traversant la microélectrode sélectionnée; la sélection de la microélectrode a lieu par couplage optoélectronique, soit manuellement, soit par commande numérique.

La Fig. 3 schématise le principe de récupération de l'information. Toutes les microélectrodes sont connectées à la masse du circuit électronique tandis que la sortie unique du circuit est reliée à un contact tournant (godet à mercure) coiffant le cylindre intérieur tournant. Quant au fil relié au reste de la surface de transfert (microélectrodes exclues) il est mis, ou non, suivant les cas (mesure en paroi inerte ou en paroi conductrice) en contact électrique avec la masse du circuit électronique. Cette masse se trouve également connectée au potentiostat (électrode de travail) au travers d'un godet à mercure; elle se trouve portée à un potentiel d'électrode déterminé à l'avance et tel que l'électrode de travail considérée opère toujours dans des conditions de diffusion. En opérant ainsi, toutes les microélectrodes reliées à la masse électrique se trouvent toujours simultanément en fonctionnement dans des conditions de diffusion. Ceci est important au niveau de la collecte de l'information par passage d'une microélectrode à une autre quelconque: le temps nécessaire pour ce passage n'est pas limité par le temps d'établissement de la couche limite de diffusion et de la double couche électrochimique, puisque ces couches sont toujours établies.

L'étude fréquentielle et spatiale, qui exige un balayage rapide des microélectrodes, a ainsi été possible.

### 2.3. Modes opératoires utilisés pour le traitement de l'information

Suivant la catégorie d'informations à recueillir, deux techniques différentes ont été mises en oeuvre: la première (acquisition de données sur ordinateur) est utilisée pour obtenir les informations fréquentielles et spatiales tandis que la seconde (utilisation d'un volt-mètre numérique) permet d'analyser temporellement les courants limites locaux de diffusion.

**2.3.1. L'acquisition de données.** Le signal recueilli sur une microélectrode en paroi inerte est échantillonné à l'ordinateur à une fréquence déterminée et pendant un intervalle de temps déterminé; ces valeurs échantillonnées sont stockées sur disque. Huit microélectrodes ont été utilisées pour cette analyse. La prise de l'information peut être considérée comme étant instantanée; le passage d'une microélectrode à une autre est commandé par l'ordinateur par couplage optoélectronique (Fig. 3) et est en effet extrêmement rapide (fréquence de l'ordre de 1000 Hz) devant les quelques Hertz prévisibles d'après [4] pour les fréquences du phénomène étudié.

Le traitement ultérieur des données consiste à utiliser la transformée de Fourier rapide qui permet d'accéder à deux catégories d'informations: (i) La densité spectrale (D.S.) du signal recueilli à une microélectrode donnée, en fonction de la fréquence  $f$ . (ii) L'intercorrélation  $J_{1-n}$  entre la microélectrode no. 1 (première de la rangée dans le sens de l'écoulement) et la  $n$ ième microélectrode ( $n = 8$ ). Cette information, de caractère instantané (Fig. 4), conduit à la connaissance de la

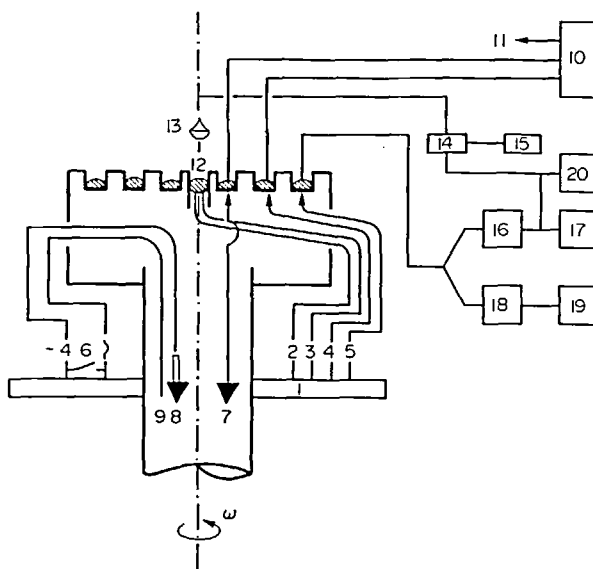


FIG. 3. Schéma du montage de traitement de l'information. Légende: 1. Circuit électronique. 2. Collecteur. 3. Emetteur. 4. Masse électrique du circuit. 5. Sortie du multiplexeur. 6. Interrupteur connectant la cathode. 7. Fil anodique. 8. Fils des 15 microélectrodes. 9. Fil cathodique. 10. Potentiostat PRT 20.2. 11. Electrode de référence. 12. Phototransistor. 13. Diode. 14. Commande de la diode. 15. Commande manuelle. 16. Amplificateur. 17. Oscilloscope. 18. Enregistreur. 19. Solartron 7055 Microprocesseur voltmètre. 20. Ordinateur MITRA 15.

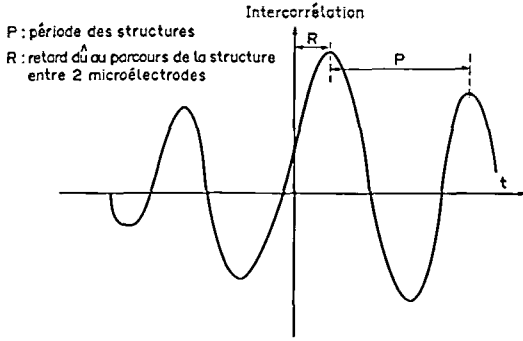


FIG. 4. Configuration schématique de l'intercorrélation.

vitesse des structures de l'écoulement entre deux microélectrodes, à la période de ces structures et donc à leur taille. Les maximums de l'intercorrélation se déplacent en fonction du retard d'analyse; ils qualifient la stabilité de l'organisation des structures et symbolisent en fait la structure tourbillonnaire la mieux corrélée, et donc la mieux définie.

**2.3.2. Analyse temporelle.** Elle utilise un voltmètre numérique Solartron 7055. Pour chaque microélectrode, elle conduit au courant limite moyen  $\bar{I}$  et à l'écart type  $\Delta I$  des fluctuations du courant instantané  $I_n$ , tel que

$$I = \left[ \sum_n (\bar{I} - I_n)^2 \right]^{1/2}. \quad (1)$$

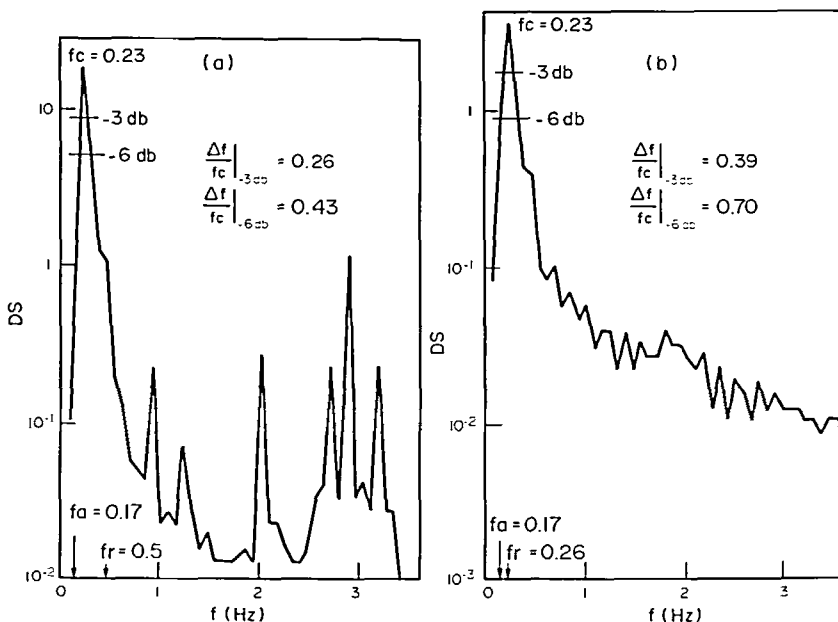
Les mesures sont faites, pour chaque couple  $(Re_a, Ta)$  en paroi inerte et en paroi conductrice.

### 3. RESULTATS DEDUITS DE L'ANALYSE DES COURANTS LOCAUX

#### 3.1. Analyse fréquentielle

L'expérience montre que les résultats de l'analyse en fréquence, caractérisés par la densité spectrale, peuvent être considérés comme indépendants de la position de la microélectrode dans la rangée des microélectrodes; ceci est une preuve de l'existence d'un régime établi bien défini fréquemment dans les conditions hydrodynamiques de l'étude. Les courbes obtenues pour la densité spectrale du courant traversant une microélectrode peuvent se ranger en deux catégories (voir Figs. 5-7) suivant la valeur du couple  $(Re_a, Ta)$ :

(1) Les deux courbes de densité spectrale données à la Fig. 5 sont caractéristiques d'écoulements possédant une fréquence dominante  $f_c$ , c'est-à-dire ayant une structure organisée. La fréquence  $f_c$  est une composante de la fréquence  $f_a$  associée au mouvement axial des structures tourbillonnaires. A débit axial constant ( $Re_a = 23$ ), on observe [Figs. 5(a) et 5(b)] que  $f_c$  est indépendant de la vitesse de rotation. Il est intéressant de remarquer à la Fig. 5(a) la présence de fréquences secondaires nettement déterminées, bien qu'elles soient d'un niveau énergétique moindre que celui de la fréquence  $f_c$ ; ces fréquences secondaires sont dues à l'existence des deux fréquences  $f_a$  (fréquence axiale) et  $f_r$  (fréquence de rotation du cylindre intérieur). A la Fig. 5(b) au contraire, ces fréquences secondaires sont absentes ou très peu définies, probablement parce que  $f_a$  et  $f_r$  sont très voisines. L'allure des courbes expérimentales de la Fig. 5 est à rapprocher de celle des courbes de densité spectrale obtenues par Kataoka *et al.* [13] dans l'étude du régime dit "à tourbillons agités"


 FIG. 5. Densité spectrale des fluctuations du courant de diffusion pour le cas du régime laminaire avec tourbillons. (a) Pour  $Re_a = 23$  et  $Ta = 580$ . (b) Pour  $Re_a = 23$  et  $Ta = 1130$ .

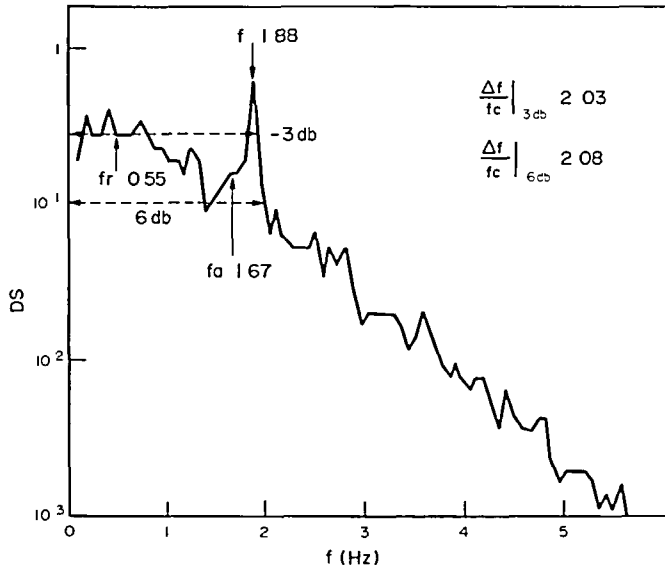


FIG 6 Densité spectrale des fluctuations du courant de diffusion pour le cas du régime multitourbillonnaire ( $Re_a = 380$  et  $Ta = 520$ )

de l'écoulement de Taylor-Couette, cependant la comparaison ne doit pas oublier que [13] ne fait pas intervenir de fréquence axiale  $f_a$ , c'est à dire que  $Re_a = 0$ . C'est ainsi que dans [13] les fréquences secondaires sont des harmoniques de la fréquence  $f_r$ , alors que celles visibles à la Fig 5(a) résultent d'une combinaison des fréquences  $f_r$  et  $f_a$ .

(2) Les courbes de densité spectrale données comme exemples aux Figs 6 et 7 présentent une bande de fréquence d'énergie comparable, mais pas de fréquence prépondérante, si l'on exclut la fréquence marquée qui

apparaît à la Fig 6 et qui est liée à la fréquence axiale  $f_a$ . Aux réserves près dues à l'existence de  $f_a$ , la courbe de la Fig 6 est similaire à la courbe de densité spectrale donnée par Kataoka [13] pour illustrer le cas du régime faiblement turbulent avec tourbillons dans l'écoulement de Couette-Taylor. La courbe de la Fig 7, où n'apparaît plus de fréquence caractéristique est quant à elle analogue à celle donnée en [13] pour le régime turbulent avec tourbillons.

Pour chercher à mettre en évidence l'évolution de la structure de l'écoulement, on a représenté (Figs 8 et 9)

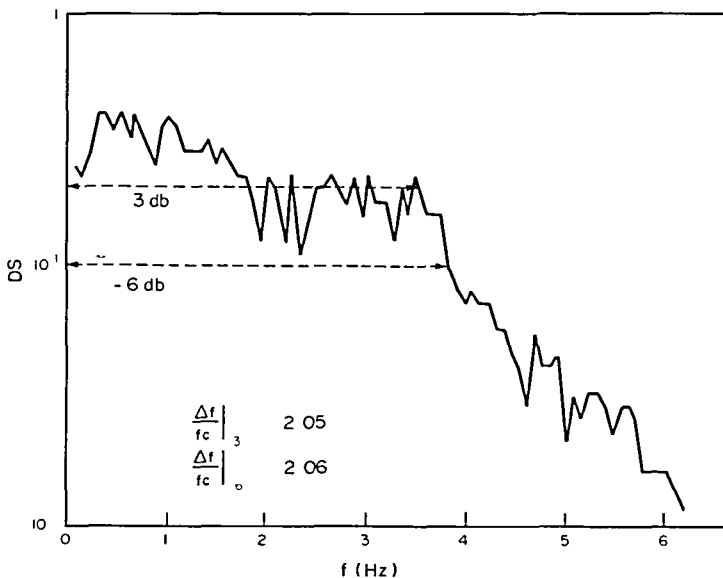


FIG 7 Densité spectrale des fluctuations du courant de diffusion pour le cas du régime multitourbillonnaire ( $Re_a = 380$  et  $Ta = 1070$ )

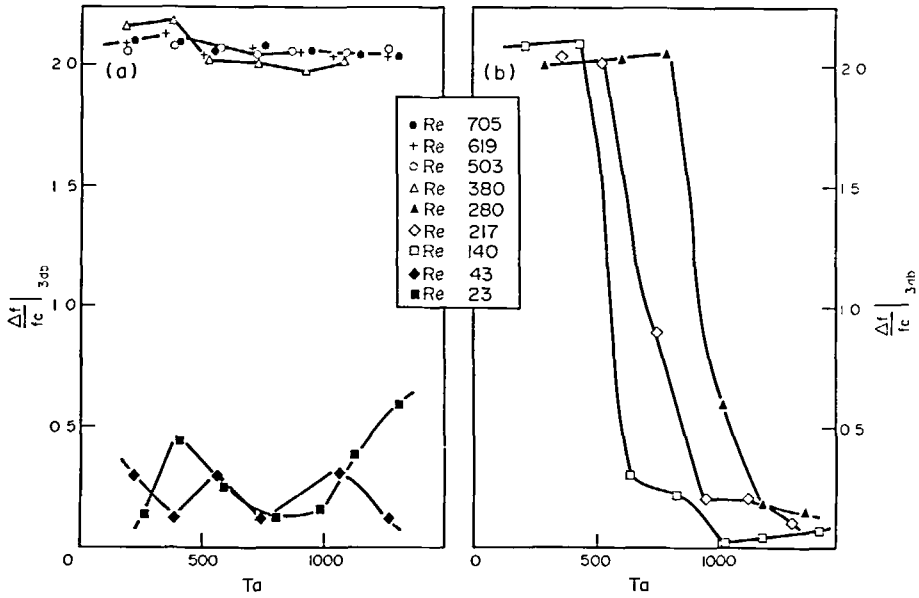


FIG 8 Variations de  $\Delta f/f_c|_{-3\text{dB}}$  deduites de l'analyse frequentielle avec les conditions hydrodynamiques  
(a)  $Re_a < 50$  et  $Re > 300$  (b)  $50 < Re_a < 300$

les variations experimentales du rapport  $\Delta f/f_c$  en fonction de  $Re_a$  et  $Ta$ . La frequence  $f_c$  est, soit la frequence dominante (cas de la Fig 5) soit la frequence moyenne de la largeur de bande  $\Delta f$  du spectre de frequence (cas des Figs 6 et 7). Le rapport  $\Delta f/f_c$  a ete calcule aux deux affaiblissements  $-3$  db et  $-6$  db de maniere a connaitre la purete de la frequence dominante.

La comparaison des Figs 8 et 9 entre elles montre que les ecart entre les valeurs de  $\Delta f/f_c|_{-3\text{dB}}$  et celles de  $\Delta f/f_c|_{-6\text{dB}}$  sont assez faibles quels que soient  $Re_a$  et  $Ta$ .

lorsqu'une frequence preponderante existe, elle est donc bien definie. Par ailleurs, ceci demontre aussi que pour les deux affaiblissements  $-3$  db et  $-6$  db l'analyse de resultats de  $\Delta f/f_c$  en fonction de  $Re_a$  et  $Ta$  conduirait aux memes conclusions.

A l'examen des Figs 8 et 9, on decle l'existence des deux etats structuraux definis precedemment.

(1) Pour  $Re_a < 50$  [Figs 8(a) et 9(a)], le rapport  $\Delta f/f_c$  reste compris entre 0.05 et 0.8 quelle que soit la valeur de  $Ta$ . A  $Re_a$  fixe,  $\Delta f/f_c$  evolue de maniere

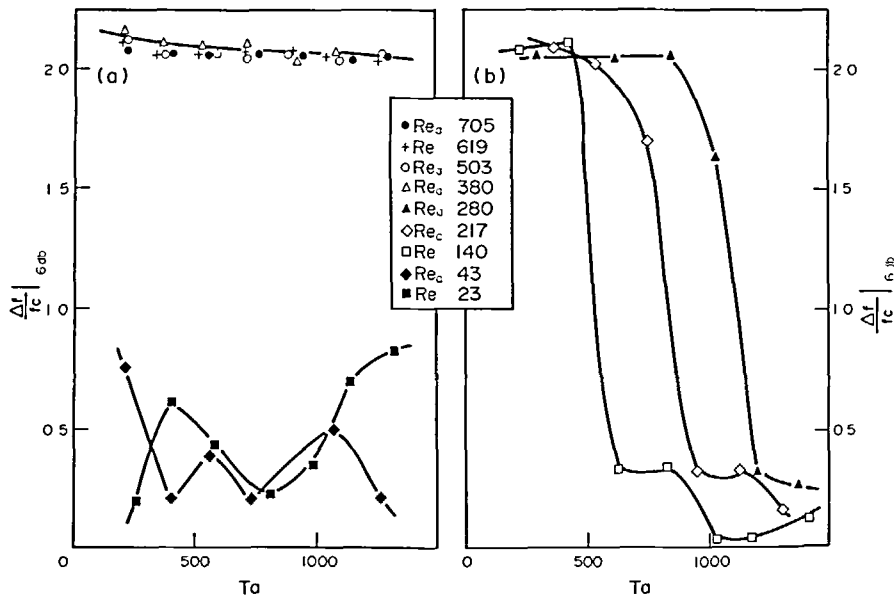


FIG 9 Variations de  $\Delta f/f_c|_{-6\text{dB}}$  deduites de l'analyse frequentielle avec les conditions hydrodynamiques  
(a)  $Re_a < 50$  et  $Re > 300$  (b)  $50 < Re_a < 300$

oscillante avec  $Ta$ , cette évolution devrait recevoir une explication dans la relation qui existe entre la fréquence prépondérante des structures tourbillonnaires, la vitesse de rotation du cylindre intérieur et le débit axial.

(2) Pour  $Re_a > 300$  [Figs 8(a) et 9(a)], le rapport  $\Delta f/f_c$  est sensiblement égal à 2 quelle que soit la valeur attribuée à  $Ta$ . Cette valeur 2 est la valeur maximale que peut recevoir  $\Delta f/f_c$  compte tenu de la définition de ce rapport.

(3) Pour  $50 < Re_a < 300$  [Figs 8(b) et 9(b)] le rapport  $\Delta f/f_c$  qui est voisin de 2 pour les faibles valeurs de  $Ta$  diminue brusquement lorsque  $Ta$  augmente, pour tendre vers des valeurs inférieures à 0,5. Cette chute brutale se produit à un  $Ta$  d'autant plus grand que  $Re_a$  est grand, ce qui semble logique puisque l'augmentation de la vitesse de rotation produit une restructuration des tourbillons.

On sait qu'à débit axial nul, la structure de l'écoulement tourbillonnaire est bien définie mais évolue avec le nombre de Taylor [9, 10]. La superposition d'un débit axial provoque le déplacement axial des tourbillons sans destruction de ceux-ci lorsque  $Re_a$  est faible [4], et l'écoulement résultant a une fréquence caractéristique. L'augmentation ultérieure de  $Re_a$  jusqu'à  $Re_a = 50$  environ provoquerait, en accord avec [4], un étirement des tourbillons dans la direction de l'écoulement mais il subsisterait une fréquence dominante au sein de cet écoulement. Les résultats obtenus pour  $Re_a > 300$  peuvent s'expliquer par l'existence au sein de l'écoulement de tourbillons de tailles différentes qui sont créés soit par cassure des tourbillons de grande taille sous l'action du débit axial soit par la naissance de tourbillons secondaires par séparation de la couche limite sur l'un ou l'autre cylindre [4]. L'existence, sur les Figs 6 et 7, d'oscillations faibles et irrégulières est d'ailleurs indicatrice de la turbulence. Les valeurs de  $Re_a$  comprises entre 50 et 300 définiraient un domaine de transition où il y aurait passage d'une structure à tourbillons de même taille à celle à tourbillons de différentes tailles, mais seule une analyse hydrodynamique fine, reposant en particulier sur une visualisation de l'écoulement, permettrait de caractériser le (ou les) régime(s) constituant cette transition.

Finalement, en résumé, l'analyse fréquentielle réalisée précise l'existence de deux domaines bien distincts, délimités par  $Re_a \approx 300$ , et mis en évidence préalablement dans les études de transfert de matière global [5-7].

(1) Pour  $Re_a < 300$  l'écoulement est laminaire avec tourbillons de taille uniforme et est bien défini du point de vue fréquentiel [Fig 10(a)]. Les tourbillons montent axialement dans l'espace annulaire sous l'action du débit d'électrolyte.

(2) Pour  $Re_a > 300$ , l'écoulement possède une structure tourbillonnaire plus complexe avec une distribution de la taille des tourbillons [Fig 10(b)] et peut donner lieu à une bande de fréquences (0-5 Hz) d'énergie comparable.

Dans les études de transfert de matière global [5-7] la valeur  $Re_a = 300$  apparaissait empiriquement comme une valeur séparant deux domaines distincts, l'analyse fréquentielle fait ressortir que cette valeur correspond au passage d'un type d'écoulement à un autre.

### 3.2 Analyse des structures tourbillonnaires

L'intercorrélation permet d'obtenir la vitesse d'une structure tourbillonnaire bien définie entre la position de la microélectrode no 1 et la microélectrode distante de  $l$  de cette microélectrode no 1. Cette vitesse est déduite du temps mis par la structure pour parcourir  $l$  et représente par le retard  $R$  du maximum de l'intercorrélation par rapport à l'origine des temps (Fig 4).

$$v_s = l/R \quad (2)$$

Cette vitesse  $v_s$  représente la vitesse de la structure la mieux définie et donc la mieux corrélée, elle serait égale à la vitesse axiale si toutes les particules fluides étaient corrélées, c'est-à-dire avaient la même vitesse, le régime étant alors considéré comme piston [11]. La période  $P$  de ces structures (Fig 4) permet de déduire leur longueur  $\Delta = v_s \times P$ .

Sur la Fig 11, les valeurs du rapport  $\Delta/e$  ont été portées en fonction de  $Ta$  pour quelques valeurs de  $Re_a$  inférieures à 300 (pour  $Re_a > 300$ , le régime est multifréquentiel et les tourbillons sont moins stables de telle sorte que le rapport  $\Delta/e$  n'a pas alors de signification). On peut constater sur cette Fig 11 que l'évolution de  $\Delta/e$  en fonction de  $Re_a$  et  $Ta$  est relativement complexe. Pour  $Re_a$  faible,  $\Delta/e$  croît avec  $Ta$  ce qui confirme les résultats obtenus par Kataoka *et al* [4] aux valeurs plus élevées de  $Re_a$ ,  $\Delta/e$  est de l'ordre de 4 aux faibles nombres de Taylor, il diminue lorsque  $Ta$  augmente pour atteindre des valeurs comprises entre 2,5 et 3.

Les valeurs trouvées ici pour  $\Delta/e$  sont du même ordre de grandeur que celles obtenues dans [4]. L'étirement des tourbillons à partir de  $\Delta/e \approx 2$  (valeur correspondant à l'écoulement laminaire tourbillonnaire sans débit axial) jusqu'à  $\Delta/e \approx 4$  semble donc être une donnée acquise. On peut néanmoins noter qu'aux faibles  $Re_a$  la restructuration des tourbillons par l'intermédiaire de l'augmentation de la vitesse de rotation du cylindre intérieur se fait dans le sens d'un allongement. Le contraire semble se produire aux valeurs plus élevées de  $Re_a$ . Il est à noter que les valeurs de  $\Delta/e$  de l'ordre de 4 sont obtenues pour des conditions hydrodynamiques ( $Re_a$ ,  $Ta$ ) qui conduisent à  $\Delta f/f_c$  voisin de 2.

L'interprétation des courbes d'intercorrélation suppose que la corrélation maximale est obtenue sur une même génératrice du cylindre lors du déplacement axial de la structure tourbillonnaire, mais ceci n'est vrai que lorsque les tourbillons ne possèdent pas d'ondes circonferentielles. Par contre, lorsque ces ondes existent et se déplacent à une certaine vitesse angulaire la corrélation maximale devrait se faire dans la direction définie par la composition de la vitesse axiale et de la



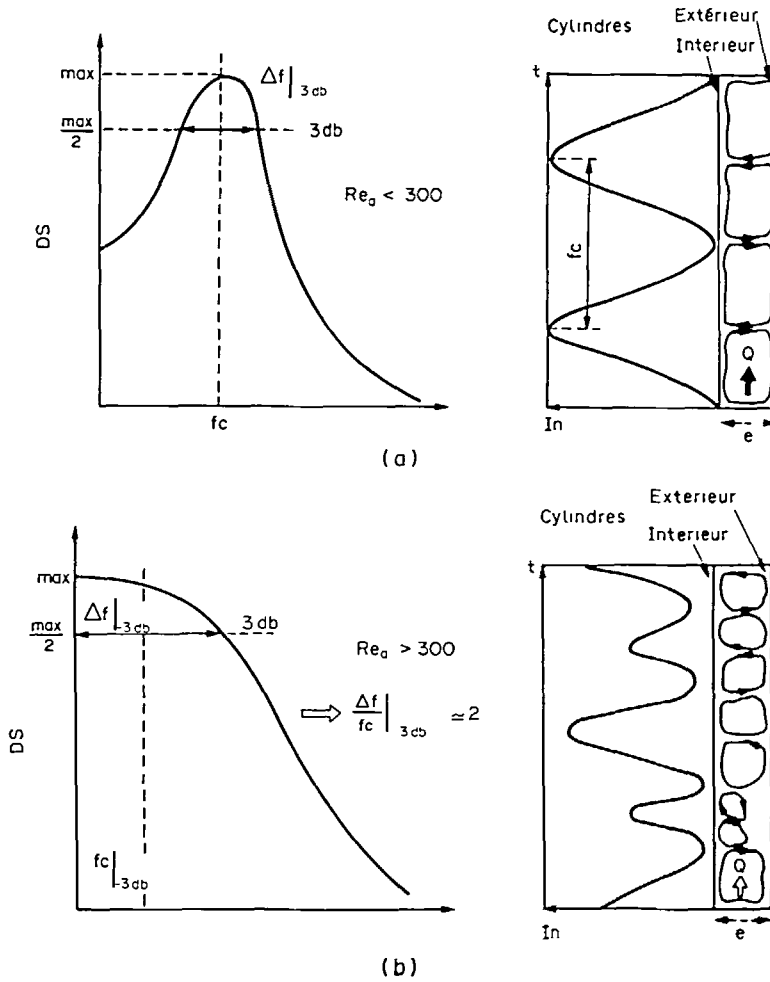


FIG 10 Schematisation des écoulements et des courbes de densité spectrale correspondantes (a) écoulement laminaire avec tourbillons (b) écoulement multitourbillonnaire

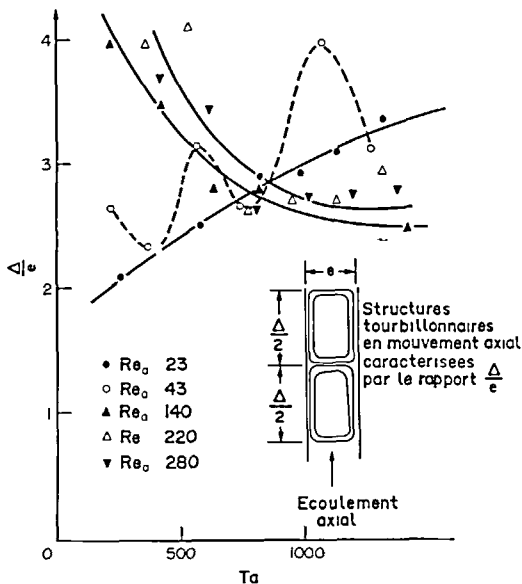


FIG 11 Evolution de la taille des tourbillons avec  $Re_a$  et  $Ta$

vitesse circonférentielle Ceci peut expliquer la difficulté rencontrée dans l'analyse de l'évolution de  $\Delta/e$  en fonction de  $Re_a$  et  $Ta$

### 3.3 Analyse temporelle

La Fig 12 rapporte les résultats auxquels a conduit l'analyse du signal électrique représentant les valeurs instantanées du courant limite local de diffusion à la fois en paroi inerte et en paroi conductrice les résultats sont donnés sous la forme des variations de l'écart réduit  $\Delta I/I$  des fluctuations du courant limite  $I_n$  avec  $Ta$ , pour différentes valeurs de  $Re_a$ . Ils sont pratiquement indépendants de la position de la microélectrode

En premier lieu, on remarque que l'écart réduit  $\Delta I/I$  est environ trois fois plus grand lorsqu'il s'agit de mesures en paroi conductrice que pour des mesures en paroi inerte. Ceci provient du fait que, dans des conditions hydrodynamiques fixées, les couches limites diffusionnelles ne sont que naissantes sur les microélectrodes en paroi inerte, et sont donc moins perturbées par l'écoulement que les couches limites

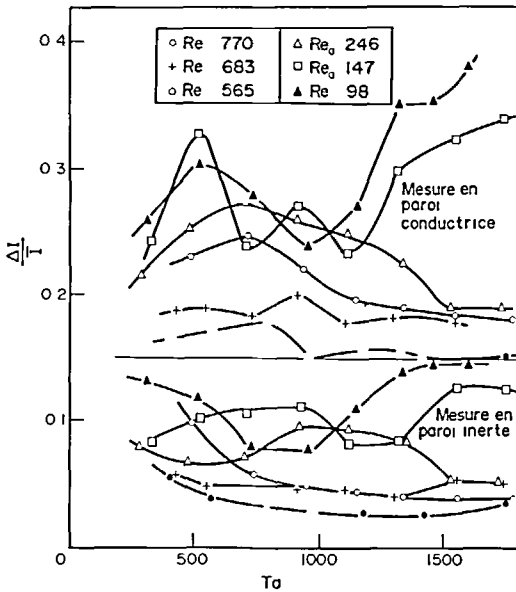


FIG 12 Variations de l'écart réduit  $\Delta I/\bar{I}$  déterminé en paroi inerte et en paroi conductrice avec les paramètres hydrodynamiques

développés qui existent sur les microélectrodes en paroi conductrice

L'influence qualitative respective de  $Re_a$  et de  $Ta$  est aussi quasiment indépendante du type de mesures. À  $Ta$  fixe, il apparaît que l'écart réduit diminue lorsque  $Re_a$  augmente, ceci rejoint des constatations de [4] qui soulignaient que le débit axial avait un effet amortisseur sur les fluctuations du courant limite de diffusion.

L'influence de  $Ta$  sur  $\Delta I/\bar{I}$  n'est pas clairement établie et la dispersion des résultats est importante. Cette dispersion peut être en partie due à la présence d'ondes circonférentielles qui affecte la valeur de  $\Delta I$  et donc celle du rapport  $\Delta I/\bar{I}$ . Il faut également remarquer que, contrairement à l'analyse fréquentielle, l'analyse temporelle ne souligne pas l'existence des deux régimes hydrodynamiques. La seule deduction qu'il est possible de faire concerne la nature tourbillonnaire de l'écoulement : l'expérience montre en effet que lorsque  $Ta = 0$  (écoulement de Poiseuille) et donc en l'absence de tourbillons, l'on a

$$\Delta I/\bar{I}_{\text{paroi conductrice}} < 0,05,$$

$$\Delta I/\bar{I}_{\text{paroi inerte}} < 0,02$$

Ces deux valeurs sont beaucoup plus faibles que celles obtenues lorsque  $Ta$  est différent de zéro (voir Fig 9) ce qui confirme la nature tourbillonnaire de l'écoulement réalisé dans les expériences du présent travail.

#### 4 CONCLUSIONS

Cette étude au moyen de mesures locales, de l'écoulement de Couette-Poiseuille, a deux aspects : l'un concerne l'évolution de la structure tourbillonnaire avec  $Re_a$  et  $Ta$  ; l'autre se rapporte à l'interprétation des

résultats obtenus par ailleurs [5-7] pour le transfert de matière global. L'étude fréquentielle a permis de retrouver l'existence des deux régimes d'écoulement qui avaient été décelés dans [5-7], tous deux apparaissent ici comme étant des régimes avec tourbillons, l'un ( $Re_a < 300$ ) étant laminaire, l'autre présentant des signes de turbulence.

Pour le domaine délimité supérieurement par  $Re_a = 300$ , l'analyse fréquentielle a montré qu'il s'agissait d'un écoulement tourbillonnaire pur, c'est-à-dire mono-mode. L'analyse des structures tourbillonnaires montre par ailleurs que l'apport d'un débit axial se traduit par un allongement des tourbillons ( $2 < \Delta/e < 4$ ) par rapport à l'écoulement de Couette ( $\Delta/e = 2$  à 2,5 d'après [4]). Cet allongement peut justifier le fait que le transfert de matière global diminue lorsque  $Re_a$  augmente à partir de zéro, en effet, dans l'hypothèse du développement de couches limites laminares à l'échelle des tourbillons sur la surface de transfert, des couches limites plus longues correspondent à un transfert global moyen plus faible. Pour les valeurs de  $Re_a$  utilisées, il avait été constaté que  $Re_a$  n'avait pas d'influence mesurable sur le transfert de matière global [5-7], ceci pourrait s'expliquer par le fait que la déformation des tourbillons n'est pas évolutive et qu'à  $Re_a$  fixe on passe d'une structure tourbillonnaire à une autre suivant les valeurs du nombre de Taylor.

Pour les valeurs de  $Re_a$  supérieures à 300, le régime d'écoulement est dit 'multitourbillonnaire' et il s'agit d'un régime de transition entre l'écoulement laminaire avec tourbillons et l'écoulement turbulent avec tourbillons. Selon Kreith [12], il s'agirait essentiellement d'un régime laminaire avec tourbillons, ce qui démontre que le problème de la transition entre régime laminaire avec tourbillons et régime turbulent avec tourbillons est complexe et nécessiterait une étude réellement spécifique. Les tourbillons dont la taille n'est pas uniforme dans ce domaine de transition, sont transportés par le débit axial et influencent le transfert de matière global comme si  $Ta$  était nul (écoulement de Poiseuille).

**Remerciements**—Les auteurs remercient la DGRST (Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique) pour l'aide financière qui a permis la réalisation de ce travail. Les expériences ont été effectuées au cours de la période 1979/1980 dans les locaux du Laboratoire d'Études Aérodynamiques et Thermiques à Poitiers, France.

#### REFERENCES

- 1 J. Kaye et E. C. Elgar, Modes of adiabatic and diabatic fluid flow in an annulus with an inner rotating cylinder, *J Heat Transfer* 80, 753 (1950).
- 2 K. N. Astill, Studies of the developing flow between concentric cylinders with the inner cylinder rotating, *Trans Am Soc Mech Engrs Series C J Heat Transfer* 86, 383 (1964).
- 3 K. M. Becker et J. Kaye, Measurements of diabatic flow in an annulus with an inner rotating cylinder, *J Heat Transfer* 84, 97 (1962).

- 4 K Kataoka H Doi et T Komai Heat/mass transfer in Taylor vortex flow with constant axial flow rates *Int J Heat Mass Transfer* 20, 57 (1977)
- 5 J Legrand et F Coeuret Transfert de matiere global liquide paroi pour des ecoulements tourbillons de Taylor et circulation axiale forcee *Int J Heat Mass Transfer* 25, 345 (1982)
- 6 F Coeuret et J Legrand Mass transfer at the electrodes of concentric cylindrical reactors combining axial flow and rotation of the inner cylinder *Electrochimica Acta* 26, 865 (1981)
- 7 J Legrand P Dumargue et F Coeuret Overall mass transfer to the rotating inner electrode of a concentric cylindrical reactor with axial flow *Electrochimica Acta* 25, 669 (1980)
- 8 A Storck et F Coeuret Mass and momentum transfer at a wall in the presence of turbulence promoters *Electrochimica Acta* 22, 1115 (1977)
- 9 D Coles Transition in circular Couette flow *J Fluid Mech* 21, 385 (1965)
- 10 C Cognet Utilisation de la polarographie pour l'etude de l'ecoulement de Couette *J Mec* 10 65 (1971)
- 11 K Kataoka H Doi T Hongo et M Futagawa Ideal plug flow properties of Taylor vortex flow *J Chem Engng Japan* 8, 472 (1975)
- 12 F Kreith Convection heat transfer in rotating systems *Adv Heat Transfer* 5, 129 (1968)
- 13 K Kataoka Y Bitou K Hashioka T Komai et H Doi Mass transfer in the annulus between two coaxial rotating cylinders The 14th ICHMT Symposium on Heat and Mass Transfer on Rotating Machinery Dubrovnik Yugoslavia 30,08-3/09 (1982)

## DYNAMIC STRUCTURE AND WALL TO LIQUID MASS TRANSFER IN THE LAMINAR VORTEX REGIME OF A COUETTE-POISEUILLE FLOW

**Abstract**—The study deals with the determination and the analysis of local instantaneous data obtained from mass transfer measurements at the surface of the inner rotating cylinder when a laminar vortex flow of liquid exists between two coaxial cylinders. Only one intercylinder gap (0.5 cm) is studied. Two classes of flow are distinguished through the eddy structure itself: they allow an explanation of previous overall mass transfer results to be made. Also, the evolution of the eddy structure of the flow with the hydrodynamical parameters  $Re_a$  (varied from 30 to 770) and  $Ta$  (varied between zero and 1500) is examined.

HMT 519

## DIE DYNAMISCHE STRUKTUR UND DER STOFFTRANSPORT VON DER WAND ZUR FLÜSSIGKEIT IM LAMINAREN WIRBEL EINER COUETTE-POISEUILLE STRÖMUNG

**Zusammenfassung**—Die Studie behandelt die Bestimmung und die Analyse örtlicher Momentanwerte des Stoffübergangs an der Oberfläche des inneren rotierenden Zylinders von zwei coaxialen Zylindern zwischen denen eine laminare Wirbelströmung existiert. Untersucht wurde eine Spaltweite von 0.5 cm. Zwei Strömungsklassen werden durch die Wirbelstrukturen unterschieden. Sie gestatten eine Erklärung früherer Stoffübergangsmessungen. Weiterhin wurde die Entwicklung der Wirbelstruktur der Strömung in Abhängigkeit von den hydrodynamischen Parametern  $Re_a$  (im Bereich von 30 bis 770) und  $Ta$  (im Bereich von 0 bis 1500) untersucht.

HMT 519

## ДИНАМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ПЕРЕНОС МАССЫ ОТ СТЕНКИ К ЖИДКОСТИ ПРИ ЛАМИНАРНОМ ВИХРЕВОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА-ПУАЗЕЙЛЯ

**Аннотация**—Дано определение и проведен анализ локальных мгновенных экспериментальных значений потока массы на поверхности внутреннего вращающегося цилиндра при ламинарном вихревом течении жидкости между двумя coaxialными цилиндрами. Опыты проводились при одной и той же величине зазора между цилиндрами (0.5 см). Выявлены два класса течения в самой вихревой структуре, что позволяет объяснить ранее полученные результаты по суммарному переносу массы. Также исследовано развитие вихревой структуры потока с параметрами гидродинамическим  $Re_a$  (в диапазоне от 30 до 770) и  $Ta$  (в диапазоне от 0 до 1500).