

PII: S0017-9310(96)00050-6

Transfert de masse sur une plaque finie placée en regard d'une matrice de jets : influence des reprises et de la forme des orifices d'injection

F. AGLAT et M. MARTIN

LEMTA, URA CNRS 875, 2 avenue de la Forêt de Haye, 54516 Vandoeuvre, France

et

P. GARDIN

IRSID, Dept. THEMEF, Voie Romaine, BP 320, 57214 Maizières-lès-Metz, France

(Reçu 25 octobre 1995 et sous forme finale 19 janvier 1996)

Resume—On étudie sur une maquette hydraulique froide les coefficients de transfert de masse convectifs : local et global, à la surface d'une portion de plaque plane impactée par des jets axisymétriques circulaires issus d'une matrice d'injection placée en regard. L'injection s'effectue soit par des trous soit par des busettes disposés en lignes. Après impact sur la plaque, le fluide est extrait de l'espace semi-confiné compris entre la plaque et la matrice d'injection par des reprises dont on se propose d'étudier l'influence : nombre et position. On montre que les transferts sont accrus de 5% quand l'aspiration se fait sur quatre côtés et non sur un seul. Quant à la hauteur des reprises elle s'avère avoir un effet plus significatif puisque les gains de transferts local et global peuvent atteindre 15%, quand on les éloigne du plan d'injection. La comparaison des configurations à trous et à busettes tourne très nettement à l'avantage de la dernière dans la mesure où le gain de transfert mesuré est de l'ordre de 17%. Une étude dynamique fondée sur des mesures : du frottement pariétal local moyen et du sens de l'écoulement pariétal local donne une vision réaliste des structures d'écoulement permettant d'expliquer de façon satisfaisante les divers résultats obtenus sur les transferts. Copyright © 1996 Elsevier Science Ltd.

1. INTRODUCTION

Dans de nombreux secteurs industriels, les techniques d'intensification des échanges thermiques et massiques par impact de jets sont utilisées avec succès tant en chauffage qu'en refroidissement. C'est le cas notamment : en sidérurgie où elles peuvent être utilisées lors du traitement thermique des produits en préchauffage et en refroidissement contrôlés. On les retrouve également dans les industries : manufacturières (revêtement et peinture), textiles et papeteries (séchage, extraction d'une phase liquide d'un produit poreux, ...).

Les articles qui traitent des transferts par impact de jets sur une surface sont nombreux. Néanmoins, il s'avère que les résultats sont très dépendants de la géométrie considérée et notamment de la façon dont le fluide est repris dans une configuration qui peut être plus ou moins confinée. C'est ce dernier paramètre qui retiendra ici notre attention, car dans de nombreuses applications, il semble être un élément déterminant.

La bibliographie relatant bien les influences des autres paramètres dans des configurations académiques, nous nous proposons d'étudier la trans-

posabilité des résultats à des configurations plus réalistes.

La disposition la plus fréquemment rencontrée est constituée d'une plaque (fixe ou en lent mouvement de translation) de longueur L et de largeur $b < L$ impactée par des batteries de jets en matrice. Chaque batterie est en regard d'une portion de plaque $l < L$. Le fluide est repris longitudinalement entre deux matrices successives et (ou) latéralement par des fentes parallèle aux bords de la plaque. Ces diverses reprises peuvent être soit dans le plan de sortie des matrices de jets, soit en retrait de celles-ci.

Avant d'analyser plus en détail les mécanismes de transfert dans des géométries plus complexes, nous allons passer en revue les paramètres actifs caractérisant les interactions entre plusieurs jets et une paroi plane impactée perpendiculairement.

Les paramètres géométriques primaires sont donnés par la Fig. 1 :

- d le diamètre des orifices ;
- p_z la distance entre le plan de sortie des jets et la plaque ;
- p_x et p_y les entraxes dans les sens Ox et Oy ;

NOMENCLATURE

b	largeur de la plaque d'impact [m]	S	gradient pariétal de vitesse [s^{-1}]
b'	longueur en y de la boîte d'injection [m]	S_0	gradient pariétal de vitesse sous le jet central [s^{-1}]
C	concentration [$mol\ m^{-3}$]	U	tension électrique [V]
d	diamètre des orifices d'injection [m]	V	vitesse de l'écoulement [$m\ s^{-1}$]
d_0	diamètre des sondes de mesure circulaires [m]	x	coordonnée dite 'longitudinale'
\mathcal{D}	coefficient de diffusivité moléculaire [$m^2\ s^{-1}$]	y	coordonnée dite 'transversale'
f	rapport des surfaces d'injection et impactée	z	distance normale à la paroi d'injection.
\mathcal{F}	nombre de Faraday = 96 500 C	Lettres grecques	
I	Intensité électrique [A]	Φ	flux de masse [$mol\ s^{-1}$]
K	coefficient de transfert de masse [$m\ s^{-1}$]	γ	coefficient correcteur pour la sonde double
l	longueur de la plaque impactée par les jets [m]	μ	viscosité dynamique [$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$]
l'	longueur en x de la boîte d'injection [m]	ρ	masse volumique [$kg\ m^{-3}$].
l_0	largeur des sondes de mesure rectangulaires [m]	Nombres adimensionnels	
L	longueur totale de la plaque [m]	M^*	rapport traduisant l'effet d'accumulation
L_0	longueur des sondes de mesure rectangulaires [m]	Re	nombre de Reynolds = $\rho V d / \mu$
M	débit massique [$kg\ s^{-1}$]	Sc	nombre de Schmidt = v / \mathcal{D}
n	nombre d'électrons échangés dans la réaction (4) [ici $n = 1$]	Sh	nombre de Sherwood = $K d / \mathcal{D}$.
n_x	nombre d'orifices d'injection en x	Indices inférieurs	
n_y	nombre d'orifices d'injection en y	a	relatif à l'anode
p_x	entraxe des jets suivant Ox [m]	c	relatif à la cathode
p_y	entraxe des jets suivant Oy [m]	g	global
p_z	distance entre le plan de sortie des jets et la plaque d'impact [m]	i	relatif à l'écoulement à l'amont du $i^{\text{ème}}$ orifice
q_z	longueur de la zone primaire de développement de jets en ligne [m]	j, jet	relatif aux jets
		l	local
		0	relatif à la plaque d'impact
		∞	relatif à l'écoulement au loin de la plaque.

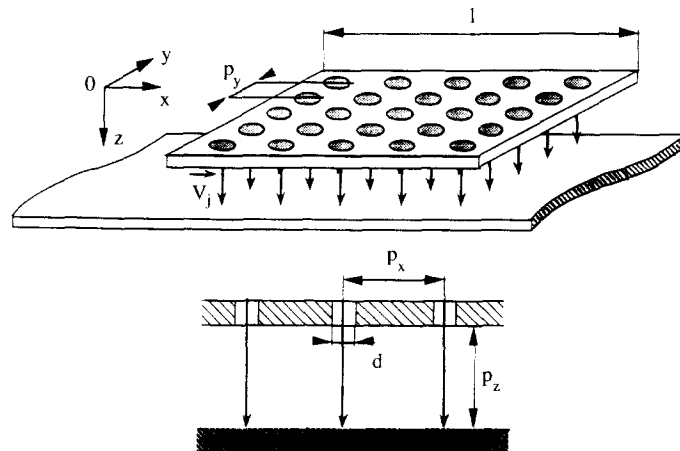


Fig. 1. Paramètres géométriques primaires définissant la configuration CT.

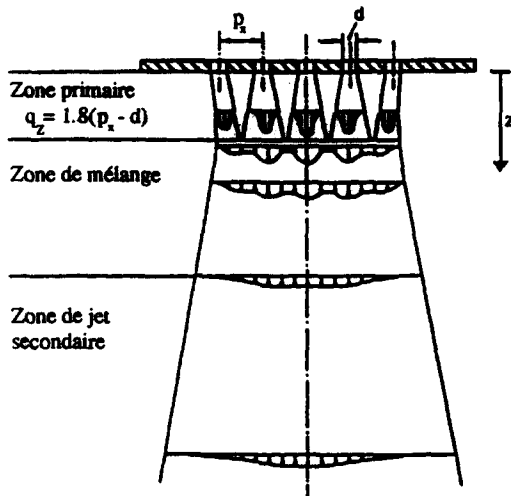


Fig. 2. Interaction de plusieurs jets.

- la disposition en ligne ou en quinconce ;
- f le rapport de la surface des orifices à la surface de la plaque d'impact concernée.

Considérons plusieurs jets de diamètre d , disposés en ligne, d'entraxe p_x interagissant en milieu infini (c'est-à-dire tels que $p_z \gg p_x$).

Huesmann [1] décrit le comportement dynamique suivant trois zones distinctes (Fig. 2) :

(1) Une zone primaire, de longueur $q_z \cong 1.8(p_x - d)$, dans laquelle les jets sont encore individualisés et gardent une évolution spatiale assez semblable à celle d'un jet libre. L'interaction des jets entre eux est supposée faible.

(2) Une zone de mélange, caractérisée par des profils de vitesse mettant en évidence une interaction forte et présentant des maxima relatifs de vitesse sur l'axe de chaque jet et une vitesse d'ensemble modulée.

(3) Une zone de jet secondaire dans laquelle on observe un profil de vitesse semblable à celui obtenu dans une 'configuration de jet seul'.

De la structure dynamique ainsi schématisée, il découle que la plage comprise entre la zone primaire et la zone de mélange est naturellement celle qui, sur le plan des transferts convecto-diffusifs par entraînement et par turbulence, présente l'efficacité d'échange optimale. Par exemple, si on retient une valeur de p_x/d voisine de 5, il s'en suit que $q_z/d \cong 7$.

2. PLAQUE PLANE IMPACTÉE PAR DES JETS EN MATRICE

La présence d'une plaque d'impact en regard des jets distante de p_z/d du plan d'injection ne modifie pas fondamentalement l'interaction des jets dans la zone $z/d \leq 7$ si $p_z/d > 10$; en revanche, la configuration dynamique au voisinage de la paroi fait apparaître des recirculations et des impacts de jets défléchis entre eux. Il s'en suit également un effet d'accumulation qui peut

être plus ou moins important suivant les valeurs relatives des paramètres répertoriés sur la Fig. 1.

Si dans un premier temps on met de côté cet effet d'accumulation, plusieurs études méritent d'être mentionnées. Notamment celles de Gardon et Cobonpue [2], Gardon et Akfirat [3] qui se sont intéressés à ce problème et ont effectué diverses expérimentations précises et soignées. Ils concluent que le maximum de transfert local au point d'arrêt des jets est obtenu pour une valeur de p_z/d comprise entre 6 et 7.

Leurs résultats sont globalement confirmés par ceux d'Hrycak [4] pour des valeurs élevées de nombre de Reynolds $Re = \rho V d / \mu \cong 50\,000$. Cet auteur fait toutefois remarquer que pour des valeurs de nombre de Reynolds inférieures, de l'ordre de 10^4 , la valeur optimale est plutôt voisine de $p_z/d \cong 6$.

En ce qui concerne les entraxes réduits p_x/d et p_y/d , les travaux de Florschuetz et Su [5], et Florschuetz *et al.* [6] nous incitent à prendre des valeurs comprises entre 4 et 6. La valeur de $p_x/d = 4$ correspond à celle déduite des travaux de Huesmann, lorsque $p_z/d = 5$. Toutefois, Potke et Jeschar [7] estiment que la meilleure valeur est telle que :

$$\frac{p_x}{d} = \frac{p_y}{d} = \frac{p_z}{d}$$

En outre, ils montrent comme Chance [8] l'importance du rapport f de la surface d'injection à la surface impactée, où :

$$f = \frac{\pi d^2 / 4}{p_x p_y} = \frac{\pi}{4} \frac{1}{(p_x/d)(p_y/d)} \quad (1)$$

Leurs résultats font apparaître clairement que le transfert moyen serait d'autant plus efficace que f est grand; toutefois les auteurs se limitent à $0.012 \leq f \leq 0.07$.

Coëuret a également étudié le transfert de masse sur une plaque impactée par des jets immergés à l'aide de la méthode électrochimique. Avec Nanzer *et al.* [9] et Nanzer et Coëuret [10], il a examiné l'influence du nombre de Reynolds Re , du nombre de jets N , de leur diamètre d , de leur entraxe $p_x = p_y$ et de la distance p_z . Plus récemment avec A. Bensmaili [11], il a effectué d'une part, une étude plus fine du paramètre f qu'il a fait varier de 0.015 à 0.64 et d'autre part une comparaison des transferts en fonction de la nature immergée et non immergée de la configuration. Il montre notamment, qu'il n'y a pas de différence très significative puisqu'elle n'atteint que 15 à 20% pour $9500 \leq Re < 12\,000$ et se réduit sensiblement pour des valeurs de nombre de Reynolds inférieures et des rapports f petits. Donc, dans ce cas, les mêmes corrélations peuvent être utilisées.

On note aussi que l'analyse de Coëuret ne permet pas de définir une valeur optimale précise de f , mais qu'en revanche celle montre que le transfert augmente avec f pour $f < 0.05$ et diminue pour $f > 0.50$.

Ces ordres de grandeur sont intéressants mais ils ne font pas clairement apparaître le mécanisme d'ac-

cumulation des débits qui fait que l'on passe, par accroissement de la vitesse moyenne débitante dans l'espace compris entre les orifices et la plaque, d'une configuration de jets pure à une configuration de jets perturbée par un écoulement entre plans.

Pour mieux comprendre le mécanisme d'accumulation et l'effet de reprise, reprenons la configuration carrée de la Fig. 1 et supposons que la reprise d'écoulement ne s'effectue que d'un seul côté suivant Ox . Ecrivons la conservation du débit dans une portion de section droite du canal comprise entre deux jets distants de p_i et située juste en amont du i ème orifice en x . Soit V_i la vitesse débitante de chaque jet et \bar{V}_i la vitesse moyenne dans la section considérée, le débit massique s'écrit :

$$\text{Pour } i > 1: M = \rho_i p_i p_z \bar{V}_i = \rho_i (i-1) \frac{\pi d^2}{4} V_i \quad (2)$$

Calculons, comme le préconise Goldstein et Behbahani [12], le rapport M^* qui traduit l'importance du phénomène d'accumulation.

$$M^* = \frac{\rho_i V_i}{\rho_z \bar{V}_z} = \frac{4}{\pi} (p_i/d)(p_z/d) \frac{1}{i-1} = \frac{p_z}{p_i} \frac{1}{(i-1) f}$$

Ces auteurs considèrent que l'effet d'accumulation doit absolument être pris en compte si $M^* < 5$, mais peut être négligé si $M^* > 9$. Cette hypothèse simplificatrice suppose donc que :

(1) p_z/d soit grand. Cependant l'étude de l'efficacité des jets libres ayant montré que sa valeur devrait être de l'ordre de $1.8[(p_z/d) - 1]$, valeur confirmée par Gardon et Hrycak, une valeur optimale est à rechercher.

(2) Le nombre de ligne (i suivant Ox) ne soit trop important. On va voir que l'effet d'accumulation peut être réduit soit par deux reprises suivant Ox mais situées à droite et à gauche d'une matrice de jets plus petite, soit par des reprises transversales aspirant le fluide suivant Oy .

(3) Le rapport f soit faible ce qui est en contradiction avec ce qui a été obtenu par Potke et Jeschar [7] et Chance [8].

Conscient de ce phénomène plus complexe d'interaction des deux types d'écoulement Chance [8] montre que l'optimum de transfert est obtenu pour une valeur de $f \cong 0.03$ et une distance d'impact $p_z/d = 4$.

Les travaux de Obot et Trabold [13], qui se consacrent plus spécifiquement à l'analyse de l'influence du nombre de reprises sur le transfert, confirment ces valeurs au nombre de Reynolds de 5500.

Enfin Sparrow *et al.* [14], qui étudient le coefficient d'échange de jets en interaction avec un écoulement transverse imposé et/ou d'accumulation, observent que si le débit accumulé est faible par rapport au débit des jets, l'optimum de distance réduite entre la sortie des jets et la plaque d'impact est de l'ordre de 5 à 6.

Dans une optique d'application à l'impact de gaz isotherme et/ou de combustion, Viskanta [15] propose une très vaste synthèse d'une centaine d'articles de

laquelle il ressort une dispersion importante. En face de ces résultats, nous avons opté pour une valeur moyenne de $p_z/d = 5$.

Sur la disposition optimale des jets en 'matrice carrée ou quinconce', Florschuetz et Su [5], et Florschuetz *et al.* [6] apportent une explication par analyse de la déflexion des jets qui doivent contourner ceux qui viennent de frapper la paroi. Les auteurs montrent que le flux combiné par interaction de deux rangées successives i et $i+1$ pénalise plus la configuration en quinconce que celle en ligne et en conséquence, ils en déduisent que le transfert est meilleur dans la cas d'une matrice carrée.

3. DISPOSITIONS ET PARAMETRES ANALYSES-SIMILITUDE CHOISIE

Comme nous l'avons déjà mentionné dans l'introduction, nous souhaitons étudier dans cet article, l'influence très spécifique de certains paramètres dont l'importance peut être grande quand la configuration de base est moins académique et se rapproche plus d'une situation industrielle.

Notamment, le cas d'une plaque d'impact finie, avec reprises libres : latérales, longitudinales ou les deux à la fois, nous a semblé d'un réel intérêt. De même, la nature des injecteurs : trous ou busettes et la position du plan de sortie des jets par rapport à la plaque sont des paramètres qui ont retenus notre attention.

Les valeurs des paramètres fixés résultent d'une part, de l'examen de la bibliographie et d'autre part, des contraintes propres à l'objectif d'application industriel visé.

On choisit :

Une valeur du nombre de Reynolds $Re = 5850$ correspondant à des jets de gaz chauds, à une température de référence de 800°C , sortant d'orifices de diamètre 10 mm à une vitesse de 80 m s^{-1} . Cette valeur du nombre de Reynolds est supposée correspondre à des conditions pratiques réalistes néanmoins il faut savoir qu'elle est, tous paramètres géométriques fixés, énormément fonction de la température moyenne à laquelle les propriétés physiques des gaz sont calculées.

$$\begin{aligned} p_z/d &= p_v/d = p_i/d = 5 \\ f &= 0.03. \end{aligned} \quad (3)$$

Une configuration en ligne telle que l'effet d'accumulation demeure toujours faible.

La configuration en ligne choisie (matrice carrée) peut paraître ici arbitraire mais elle l'a été en fonction de la bibliographie [5, 6]. Toutefois, des études récentes effectuées au laboratoire LEMTA permettent de conclure que les performances des dispositions en ligne et en quinconce sont comparables à 3 ou 4% près.

Dans de telles configurations, les corrélations mentionnées dans la bibliographie laissent supposer que les phénomènes relèvent plus d'une similitude de Rey-

nolds que d'une similitude fondée sur la conservation de la quantité de mouvement. De plus, il faut respecter les grandeurs géométriques réduites et le rapport f .

Il s'en suit que les conditions de fonctionnement indiquées plus haut peuvent être simulées sur une maquette hydraulique à température constante. La conservation de nombre de Reynolds Re impose, pour des orifices de diamètre $d = 5$ mm, une vitesse moyenne de sortie des jets immergés dans de l'eau à 20°C de $V_j = 1.16$ m s⁻¹. On prendra également sur la maquette :

$$p_x/d = p_y/d = p_z/d = 5.$$

$$f = 0.03.$$

Les paramètres étudiés en détail sont : le nombre de reprises et la hauteur de celles-ci ainsi que la nature des injecteurs : trous et busettes (Fig. 3).

Remarque—dans tous les cas, il s'agit de configurations totalement immergées; les jets sont immergés (eau dans de l'eau) et les reprises, en position basse et haute, sont également immergées dans l'eau.

4. DESCRIPTION DU MONTAGE

Le montage d'ensemble comprend l'élément principal qu'est la maquette, les circuits d'alimentation annexes, la pompe, l'échangeur thermique et le bac de récupération.

4.1. La maquette

Réalisée entièrement en polyméthacrylate de méthyle, la maquette a été dimensionnée en tenant compte, d'une part de la bibliographie et d'autre part d'objectifs propres à l'étude de l'influence des reprises et de la forme des orifices d'injection.

Les différents éléments ont été conçus sous forme de boîtes juxtaposables et empilables comme le montre le schéma éclaté en Fig. 4(a) sur lequel sont présentés les dispositifs d'injection et de reprise.

Sur cette vue, on remarque :

(1) Les deux boîtes d'injection i_1 et i_2 comportant chacune sur la face supérieure les 105 orifices d'injection (trous ou busettes) de diamètre $d = 5$ mm. Ces injecteurs sont disposés en ligne, sur $n_x = 7$ lignes dans le sens dit 'longitudinal', qui correspond à la longueur de la plaque d'impact, et sur $n_y = 15$ colonnes dans le sens dit 'transversal', qui correspond à la largeur de la plaque. La face inférieure perforée n constitue un nid d'abeille dont le but est de briser et de bien répartir l'écoulement sortant de la pompe qui est située en dessous de la maquette. Le choix du nombre et de la disposition des orifices par lesquels sortent les jets, a été fixé par l'étude bibliographique de façon à minimiser l'effet d'accumulation dans le sens 'longitudinal' et par la largeur de la plaque b dans le sens 'transversal'.

(2) les sept caissons de reprise : 3 longitudinaux r_1 à r_3 et 4 transversaux r_4 à r_7 . Quant ils sont en position,

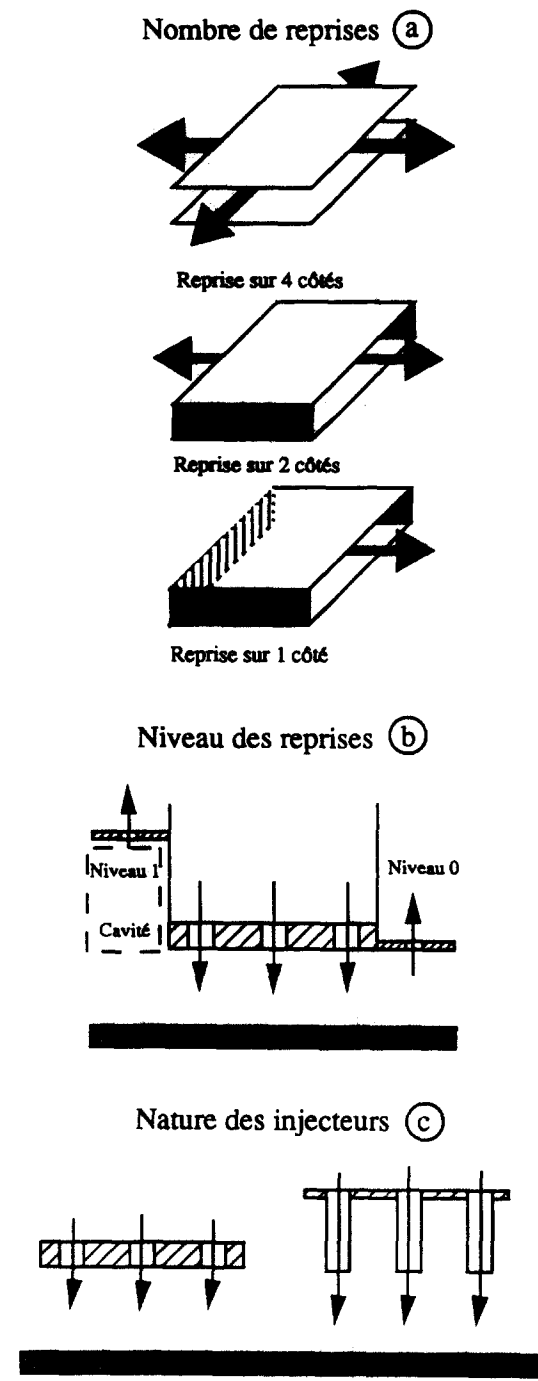


Fig. 3. Paramètres étudiés : nombre et niveau des reprises—nature des injecteurs.

ils permettent une reprise dans le plan d'injection des jets (niveau 0) à travers une fente de 10 mm de large. Quand on les retire, des plaques munies de fentes identiques sont disposées sur les barres de soutien q , la reprise est alors située au niveau 1. Ces reprises permettent au fluide de redescendre de la maquette dans le réservoir inférieur par 7 tubes verticaux.

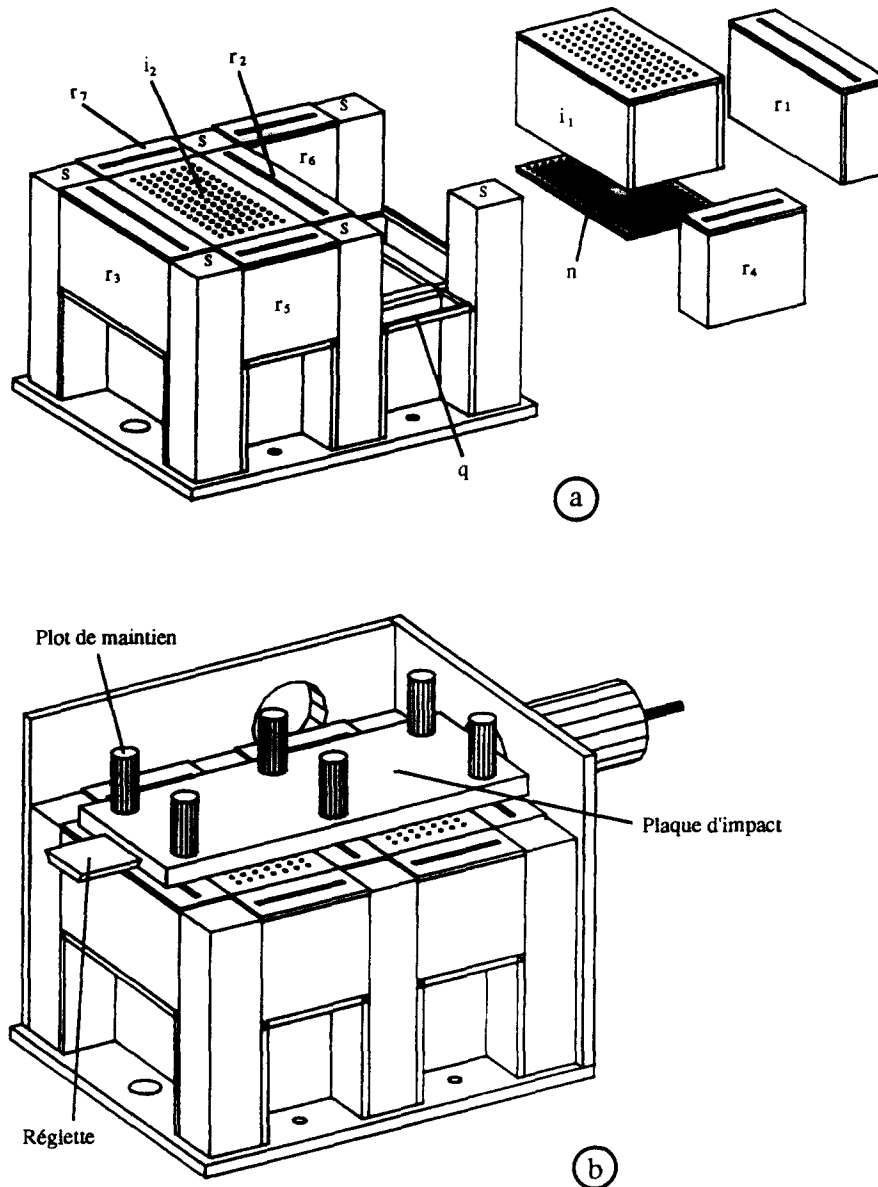


Fig. 4. Vue d'ensemble de la maquette : (a) éclatée et (b) avec plaque d'impact.

(3) les six blocs de séparation *s*, qui maintiennent les différentes boîtes en place.

La Fig. 4(b) représente la maquette reconstituée et montre le positionnement de la plaque d'impact en regard des boîtes d'injection.

Sur cette vue : le couvercle, la paroi avant ainsi que la paroi gauche ont été retirés pour permettre de voir l'intérieur de la maquette.

On distingue :

- (a) la plaque d'impact en regard des boîtes d'injection ;
- (b) la réglette qui se déplace grâce à un guidage linéaire en queue d'aronde ;

(c) les 6 plots qui maintiennent la plaque d'impact solidaire du couvercle.

Pour des raisons de facilité d'accès, la plaque d'impact est située au-dessus des jets qui sont donc dirigés vers le haut.

La plaque d'impact ne tient pas lieu de couvercle mais est suspendue à celui-ci par 6 plots. La surface libre de l'eau qui immerge toute la maquette et toute la boucle d'essai est maintenue à un niveau constant compris entre la partie supérieure de la plaque d'impact et le couvercle. Entre la surface libre et le couvercle, on maintient un matelas d'azote pour éviter le contact de la solution aqueuse avec l'oxygène.

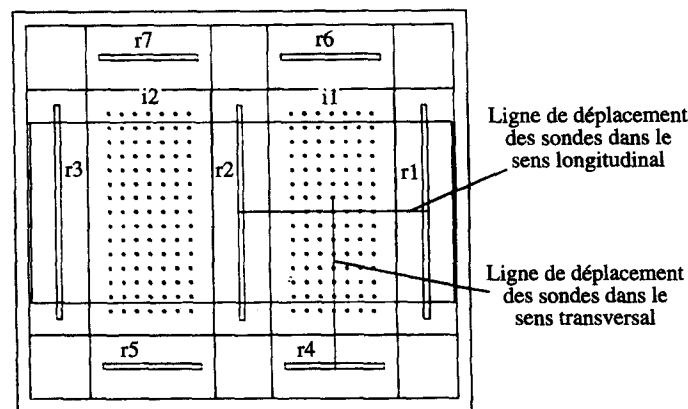
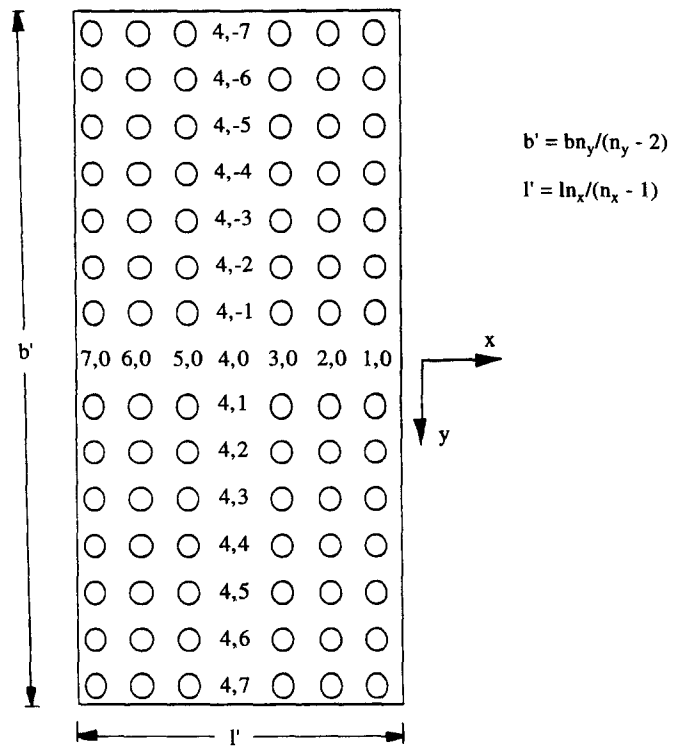


Fig. 5. Représentation de la position des injecteurs et des reprises.

La réglette qui supporte les sondes de mesure permet un déplacement longitudinal et un déplacement transversal suivant la plaque d'impact utilisée. Sur la Fig. 4(b), c'est la plaque d'impact no. 1 qui est représentée.

Afin de rendre possible des déplacements extrêmes de la réglette, des dégagements de forme cylindrique ont été ménagés sur les quatre côtés de la maquette. Ces manchons et hublots sont munis d'un système d'ouverture qui permet l'utilisation d'une réglette unique. Le déplacement de la réglette est assuré par un chariot de guidage.

La Fig. 5 donne une représentation graphique de la position des jets sortant de la boîte d'injection i_1 qui

est entourée de reprises longitudinales r_1 et r_2 , et transversales r_4 et r_6 .

Lorsque la réglette est longitudinale suivant Ox , les mesures sont effectuées depuis la reprise r_2 jusqu'à la reprise r_1 , en passant successivement sous les jets (7,0), (6,0), (5,0), (4,0), (3,0), (2,0), (1,0).

Lorsque la réglette est transversale suivant Oy , les mesures sont effectuées depuis le jet appelé (4,-1) jusqu'à la reprise r_4 , en passant successivement sous les jets (4,0), (4,1), (4,2), (4,3), (4,4), (4,5), (4,6), (4,7).

Pour des raisons de symétrie, on ne balaye que la moitié des jets transversaux. Les lignes de déplacement des sondes sont visualisées sur la Fig. 5.

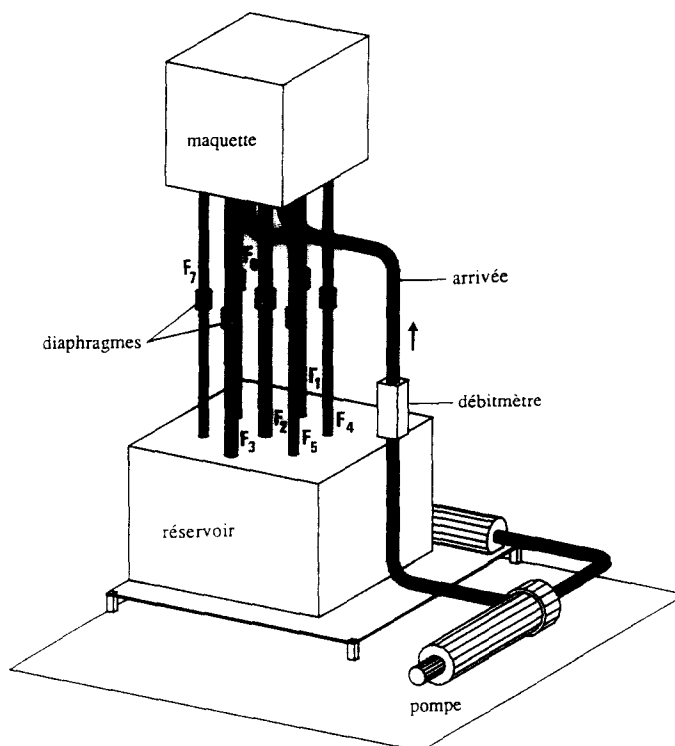


Fig. 6. Boucle d'essai.

4.2. La boucle d'essai

Elle est représentée schématiquement sur la Fig. 6.

Le fluide est mis en mouvement dans la maquette grâce à une pompe à débit variable. Les deux matrices de jets devant être alimentées de la même manière, l'arrivée est commune et se divise en deux de façon symétrique grâce à un Y. Le débit total entrant est mesuré à l'aide d'un débitmètre électromagnétique. Les sorties correspondantes aux 7 reprises ($F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7$) sont reliées au réservoir situé sous la maquette. Leurs débits sont mesurés à l'aide de débitmètres à diaphragmes. Le réservoir, d'une capacité en volume double de celle de la maquette, permet de travailler en circuit fermé avec toutefois un volume tampon suffisant. Sa capacité rend possible la vidange complète de la maquette lors des changements de configuration. Le liquide polarographique devant être maintenu à une température de 20°C, on dispose d'un échangeur thermique sur le circuit du fluide, placé en amont de la pompe. Le débit de fluide pouvant s'échapper par les différentes reprises, on règle manuellement les différents débits de fluide imposés dans chaque reprise en fonction de l'essai souhaité. Avant chaque essai et surtout après chaque changement de configuration, on chasse l'oxygène de la boucle en faisant barboter de l'azote.

4.3. Principe de la méthode polarographique et description des sondes de mesure

Le principe de la méthode [16, 17] repose sur la réduction électrochimique rapide d'un réactif en solu-

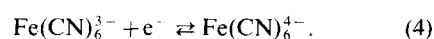
tion, en général ionique, dans des conditions particulières.

(1) Les sondes dites 'de mesure' sont insérées dans la paroi de la réglette en polyméthacrylate de méthyle et portées à un potentiel tel que la concentration du réactif C_0 soit nulle sur la surface de ces sondes servant d'électrodes ($C = C_0 = 0$) et égale à C_∞ loin de celles-ci. En effet, comme le montrent Kolthoff et Lingane dans leur ouvrage [18], lorsque la réaction électrochimique est très rapide par rapport au phénomène de diffusion, on peut supposer que la concentration au niveau des électrodes est pratiquement nulle à partir d'un certain potentiel appliqué à celles-ci.

(2) La contre électrode, de grande dimension par rapport à celle des sondes de mesure, assure la continuité du circuit électrique sans jamais affecter la vitesse de réaction à l'électrode de mesure.

(3) Un électrolyte support, qui ne peut réagir aux électrodes, neutralise le champ électrique au sein de la solution et rend négligeable la contribution de la migration au déplacement du réactif.

(4) Dans cette étude, le réactif est une solution aqueuse de ferricyanure et ferrocyanure de potassium à laquelle est ajouté un large excès de chlorure de potassium comme électrolyte support. La réaction mise en jeu est donc :



Lorsqu'on applique une tension électrique continue U entre les électrodes, on provoque l'apparition d'un

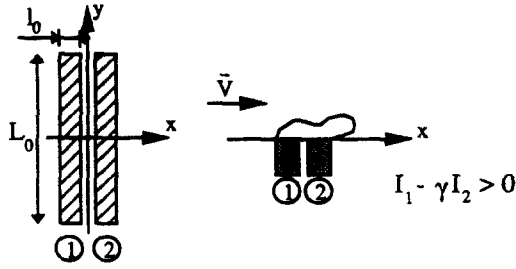


Fig. 7. Sondes rectangulaires pour la détermination du sens de l'écoulement.

courant d'électrolyse I lié au flux de matière à l'électrode $\Phi(I = n\mathcal{F}\Phi)$.

La méthode nécessite le tracé des polarogrammes $I = f(U_a - U_c)$ pour déterminer où se trouve le palier le plus marqué qui correspond au courant limite d'électrolyse atteint lorsque la concentration du réactif est nulle à la surface de la sonde considérée $C_0 = 0$. Dans nos conditions expérimentales, nous avons choisi de travailler du côté du palier ferricyanure car la réponse en fréquence est meilleure et le polarogramme relatif à la sonde de transfert global est plus satisfaisant [16].

4.3.1. *Application à la mesure du gradient pariétal de vitesse et au sens de l'écoulement pariétal.* Dans ce cas, les électrodes simples et doubles sont implantées dans la réglette en polyméthacrylate de méthyle sans dispositif de garde, c'est-à-dire que la surface avoisinante est inerte.

(1) On montre que, dans des conditions particulières et notamment un nombre de Schmidt $Sc > 1000$, le courant I donc le flux Φ et par suite le coefficient de transfert de masse K peut être relié au gradient pariétal de vitesse S par une relation de la forme :

$$\frac{Kl_0}{\mathcal{D}} = A \left(\frac{Sl_0^2}{\mathcal{D}} \right)^{1/3} \quad (5)$$

Où :

l_0 est une dimension caractéristique de la sonde simple : son diamètre d_0 si elle est circulaire ou sa largeur l_0 si elle est rectangulaire ($l_0 \ll L_0$), \mathcal{D} est la diffusivité massique, A est une constante qui, en l'absence d'étalonnage, peut être prise égale à la valeur théorique issue d'un calcul formel [17].

(2) Si on utilise une sonde double composée de 2 sondes rectangulaires très voisines, (Fig. 7) la différence des intensités pondérées $I_1 - \gamma I_2$ recueillies sur chaque sonde donne par effet de sillage le sens de l'écoulement pariétal. Le coefficient correcteur γ tient compte de l'éventuelle différence de surface active des deux sondes rectangulaires. Pour le déterminer, on mesure les valeurs du courant I relevées sur chacune d'entre elles lorsque l'autre est débranchée (suppression de l'effet de sillage).

$$\gamma = \frac{I_2 \text{ (en débranchant 1)}}{I_1 \text{ (en débranchant 2)}}$$

4.3.2. *Application à la mesure des transferts local et global.* On insère la sonde de mesure dans la paroi de la réglette qui participe à la réaction électrochimique dans des conditions identiques $C_0 = 0$, mais qui est électriquement isolée de celle-ci. L'intensité I recueillie donne alors directement accès aux transferts soit local soit global.

4.3.3. *Disposition des sondes sur la réglette (Fig. 8).* Il existe plusieurs sondes insérées sur la réglette :

- (a) la contre électrode de 80×150 mm,
- (b) une sonde double perpendiculaire à l'écoulement pour la mesure du sens de l'écoulement
- (c) une sonde circulaire de 1 mm de diamètre permettant la mesure du coefficient de transfert local,
- (d) une sonde double parallèle à l'écoulement pour vérifier la symétrie,
- (e) une sonde carrée de 50 mm de côté couvrant l'impact de 9 jets permettant la mesure du coefficient de transfert global. On dispose des anneaux de garde autour de cette sonde,
- (f) une sonde circulaire de diamètre 1 mm placée au centre de la sonde carrée mais isolée de celle-ci pour la mesure du coefficient de transfert local.

Il faut noter que la taille de la sonde de transfert global est limitée par la condition déjà évoquée qui implique que la surface soit la plus faible possible par rapport à celle de la contre électrode. Nous avons ainsi été conduit à ajouter une seconde contre-électrode non solidaire de la réglette dont la surface triple celle de la première.

4.4. Traitement des mesures

Le logiciel d'acquisition et de traitement que nous utilisons, 'VIEWDAC' [19], permet d'acquérir des valeurs à des fréquences comprises entre 1 et 10 kHz par voie, sur plusieurs voies (1 à 16). Une voie correspond, en général, à une sortie de sonde. Les fichiers de stockage ont un taille comprise entre 1 et 4 Mégaoctets.

4.4.1. *Les programmes.* Sur chaque sonde nous effectuons un traitement du signal à une fréquence d'acquisition de 250 Hz à partir de 10 240 points. Ces conditions ont été déterminées d'une part après examen des fréquences contenues dans le signal brut et d'autre part en respectant les conditions nécessaires à une analyse mathématique représentative mais la moins pénalisante possible sur le plan des temps de calcul.

La sonde de frottement—Comme développé au paragraphe précédent, on déduit des mesures sur cette sonde le gradient pariétal de vitesse S le long de la plaque d'impact. L'acquisition se fait sur une voie. Le traitement consiste à élever le signal à la puissance 3 puisque le frottement est proportionnel à l'intensité au cube.

La sonde double—Pour utiliser la sonde double, il faut travailler en valeur instantanée et donc faire l'opération $I_1 - \gamma I_2$ avant d'accéder au résultat. Pour cela, nous utilisons un tiroir différentiel qui fait les deux opérations (multiplication par γ et soustraction)

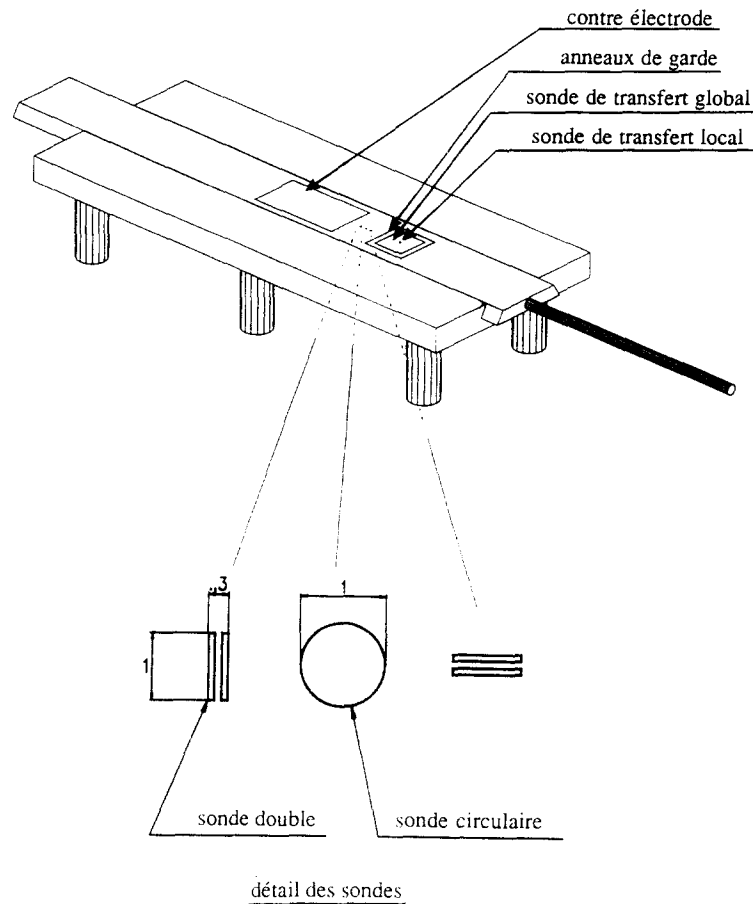


Fig. 8. Réglette de mesure portant les diverses sondes.

et nous obtenons directement une valeur correspondant au sens de l'écoulement.

Pour cette sonde double, nous effectuons donc une acquisition sur deux voies :

le signal brut d'où l'on tire les valeurs moyenne et fluctuante et donc le sens de l'écoulement ;

le signal modifié (recentré et amplifié) qui nous donne l'histogramme et le spectre.

Les sondes de transfert—Pour les deux sondes de transfert, nous relevons la valeur de l'intensité I , qui est proportionnelle au transfert. La valeur retenue est donc directement la moyenne du signal.

On distingue les mesures de transfert (exprimé en terme de nombre de Sherwood) :

local, effectué à l'aide de la sonde circulaire de 1 mm de diamètre ;

global, évalué sur la sonde carrée de dimensions 50×50 mm entourée d'anneaux de garde. Cette sonde peut être frappée par 1 jet, 4 demi-jets et 4 quarts de jet quand elle est centrée sur l'axe d'un jet central.

4.4.2. *Histogrammes.* Grâce aux résultats obtenus sur la sonde double, nous traçons les histogrammes correspondant à une distribution de S en amplitude.

La bande de tension comprise entre -5 et $+5$ V est décomposée en 1024 parties. On trace alors l'histogramme entre 0 et 1024, les points 0, 512 et 1024

correspondant respectivement à -5 , 0 et $+5$ V. L'histogramme traduit la probabilité d'obtenir un signal positif ou négatif en fonction de la position de la sonde sous le jet. En effet, malgré une valeur moyenne positive, il est possible que certains points soient négatifs. Cela veut dire que par moment, la sonde est balayée par un écoulement de sens opposé à celui le plus probable. Lorsque l'histogramme est complètement positif (ou négatif), on sait que l'écoulement pariétal est constamment installé dans le sens correspondant.

4.5. *Présentation des résultats*

La description des résultats, leur comparaison et l'interprétation que nous souhaitons en faire imposent une présentation concise et claire qui n'est pas toujours très aisée à trouver dans la mesure où, d'une part la géométrie n'est pas simple, et d'autre part, les explications nécessitent une confrontation de plusieurs courbes.

Dans le plan de la plaque d'impact, les mesures sont effectuées suivant deux directions :

(1) la direction dite 'longitudinale', $0x$, intersection du plan d'impact avec le plan contenant les axes des 7 jets médians, lesquels sont repérés par les couples—(1,0), (2,0), (3,0), (4,0), (5,0), (6,0), (7,0) ;

(2) la direction dite 'transversale', Oy , intersection du plan d'impact avec le plan contenant les axes des jets médians, lesquels sont repérés par les couples— $(4, -7)$, $(4, -6)$, $(4, -5)$, $(4, -4)$, $(4, -3)$, $(4, -2)$, $(4, -1)$, $(4, 0)$, $(4, 1)$, $(4, 2)$, $(4, 3)$, $(4, 4)$, $(4, 5)$, $(4, 6)$, $(4, 7)$.

Compte tenu de la symétrie du montage et notamment des reprises latérales qui induisent un débit identique par construction, les mesures transversales ne sont effectuées que sur les jets référencés $(4, -1)$ à $(4, 7)$.

Les configurations géométriques étudiées sont : soit à trous CT, soit à busettes CB ; elles sont référencées CTIJ et CBIJ où I indique le plan des reprises : 0 si reprise dans le plan d'injection, 1 si reprise en retrait du plan d'injection [Fig. 3(b)] et J indique le nombre de reprises : $4(r_1, r_2, r_3, r_4)$; $2(r_1, r_2)$; $1(r_1)$.

5. CONFIGURATION A TROUS : CT

5.1. Présentations des résultats de l'essai CT04 pour $Re = 5850$

Les interprétations des évolutions des transferts résultent en général des évolutions comparées : du gradient de vitesse, du sens de l'écoulement et de l'histogramme des sens. Nous avons donc essayé de regrouper sur une même page ces informations, au risque d'une certaine perte de précision dans la localisation des points singuliers (décollement, recollement, point d'arrêt). Cela justifie la présentation spécifique qui est faite entre deux jets pour expliquer la structure pariétale rencontrée dans les diverses configurations étudiées.

5.1.1. Etude dans le sens longitudinal sous les 7 jets médians. Sur la Fig. 9, nous présentons en quatre courbes les évolutions :

- (1) du 'gradient pariétal' réduit de vitesse : S/S_0 où S_0 est le 'gradient maximal' sous le jet central $(4, 0)$, [Fig. 9(a)] ;
- (2) du sens de l'écoulement $I_1 - \gamma I_2$ [Fig. 9(b)] ;
- (3) du transfert de masse local exprimé en nombre de Sherwood Sh_l [Fig. 9(c)] ;
- (4) du transfert de masse global exprimé en nombre de Sherwood Sh_g [Fig. 9(d)].

La courbe 9(a) conduit à formuler les remarques générales suivantes :

- (a) Le 'frottement' est maximum sous un jet et minimum entre deux jets.
- (b) Sous le jet, il existe un minimum relatif à l'aplomb de l'axe du jet. Les deux maxima, de part et d'autre de ce minimum, sont distants de 6 mm en moyenne, soit 1 mm de plus que le diamètre d'un jet.
- (c) Entre deux jets, la zone où le 'frottement' est minimum s'étend sur 3 à 6 mm suivant les jets considérés. Ces minima sont légèrement décalés vers la reprise la plus proche lorsque l'on s'approche de celle-ci.
- (d) le frottement évolue très vite entre son maximum et son minimum.

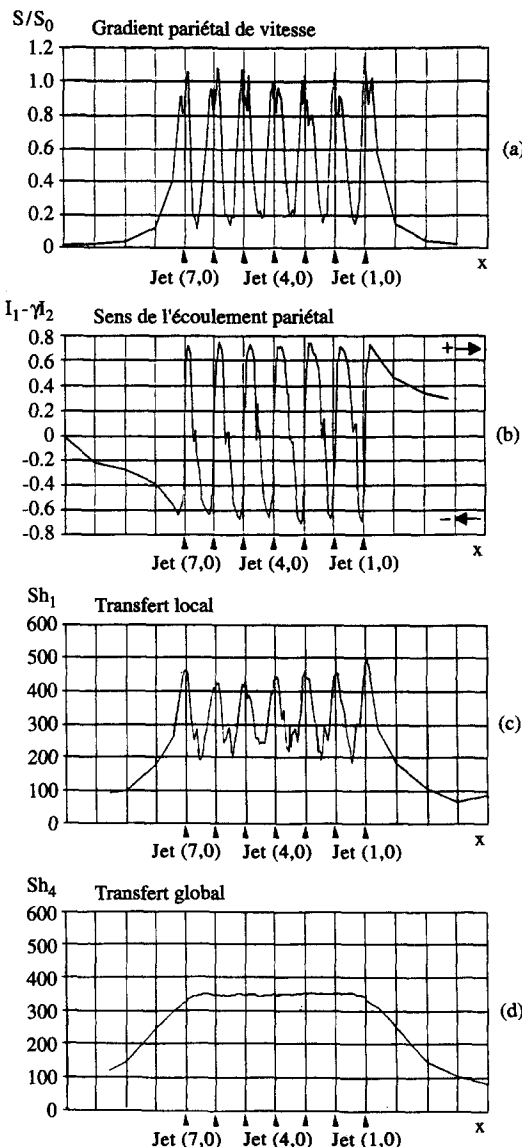


Fig. 9. Evolutions pour CT04: (a) du gradient de vitesse réduit, (b) du sens de l'écoulement, (c) des transferts local, et (d) global.

- (e) la valeur relative du frottement moyenné dans le temps varie de 1 sous les jets à 0.2 entre les jets.
 - (f) sur ces différents jets, les valeurs des maxima et des minima sont quasi constantes, ce qui traduit un effet d'accumulation négligeable à la paroi.
 - (g) la décroissance du frottement après le dernier jet est brutale et celui-ci atteint une valeur quasi nulle au niveau des reprises.
- La courbe 9(b) permet encore mieux d'appréhender une première image de la structure de l'écoulement pariétal.
- On remarque que :
- (1) L'écoulement change de sens, à peu près, sous les jets et entre deux jets.
 - (2) Entre deux jets, il y a en fait un triple changement de sens nettement décelable du fait de la

grande précision des sondes différentielles et de leur caractère plus local (0.25 mm au lieu de 1 mm pour les sondes de frottement). Ce changement de sens n'est pas toujours exactement entre deux jets, il est décalé vers la reprise la plus proche.

(3) Les pics sont d'autant plus larges qu'ils sont proches de la reprise (pics positifs pour les jets, 3, 2, 1 et négatifs pour les jets 5, 6, 7).

5.1.2. *Etude dans le sens transversal sous les 15 jets médians.* Cette étude a été systématiquement effectuée sur les évolutions du frottement, du sens de l'écoulement, des transferts local et global. Les observations que l'on peut faire sont semblables à celles mentionnées sur les résultats obtenus dans le sens longitudinal et elles confirment le très faible effet d'accumulation transversale quelle que soit la configuration étudiée.

5.1.3. *Schéma de principe de la structure entre deux jets.* Pour pallier le manque de définition dans une représentation d'ensemble des résultats sur tous les jets, nous nous sommes attachés à examiner avec plus de soin ce qui se passe entre les jets (6,0) et (5,0).

La Fig. 10(a) traduit la configuration géométrique pariétale déduite des courbes 10(b, c).

La courbe S/S_0 [Fig. 10(b)] représente les évolutions correspondantes du 'gradient pariétal' moyen mesuré avec des sondes circulaires de 1 mm de diamètre. La courbe $I_1 - \gamma I_2$ [courbe 10(c)] donne le sens de l'écoulement pariétal à un facteur multiplicatif près.

Les différents points sont donnés par leur distance en millimètres comptée à partir du jet (6,0) : A à +2.5 ; B à +8.5 ; C à +10.5 ; D à +12.5 ; E à +22.5 ; F à +25.

(1) Au point d'arrêt géométrique 0, on observe que l'écoulement change de sens d'une façon très brutale comme l'indique le passage de $I_1 - \gamma I_2$ de valeurs négatives à des valeurs positives avec une valeur nulle coïncidant avec le point d'arrêt géométrique [Fig. 10(c)]. En ce point, la technique de mesure du gradient pariétal moyen, déduit à l'aide de (5) d'une mesure de transfert d'une sonde circulaire, n'est pas directement applicable car les hypothèses faites : sur les diffusions en x (ou y) et en z sur la taille de la micro électrode par rapport à la sous couche visqueuse sont à reconsidérer. On ne détermine ni le frottement ni même 'le vrai transfert local' puisque la sonde utilisée ici est placée dans une surface inerte et non active comme dans le paragraphe 5.1.4. La valeur du frottement au point 0 est très fortement minorée.

(2) Dans toute la 'zone d'arrêt' comprise entre 0 et A, les remarques précédentes s'appliquent aussi, même si on peut éventuellement considérer qu'un écoulement pariétal 'type couche limite' commence à s'établir. On explique ainsi que l'utilisation abusive de la relation (5) conduise à une valeur croissante du 'frottement fictif' quand on déplace la sonde de 0 vers A. Ce n'est que lorsque le bord amont de la sonde de mesure atteint la frontière externe A' du cône d'épanouissement du jet extrapolé à la paroi que la méthode de mesure du frottement est applicable. On constate d'ailleurs que ce point A' correspond à un maximum

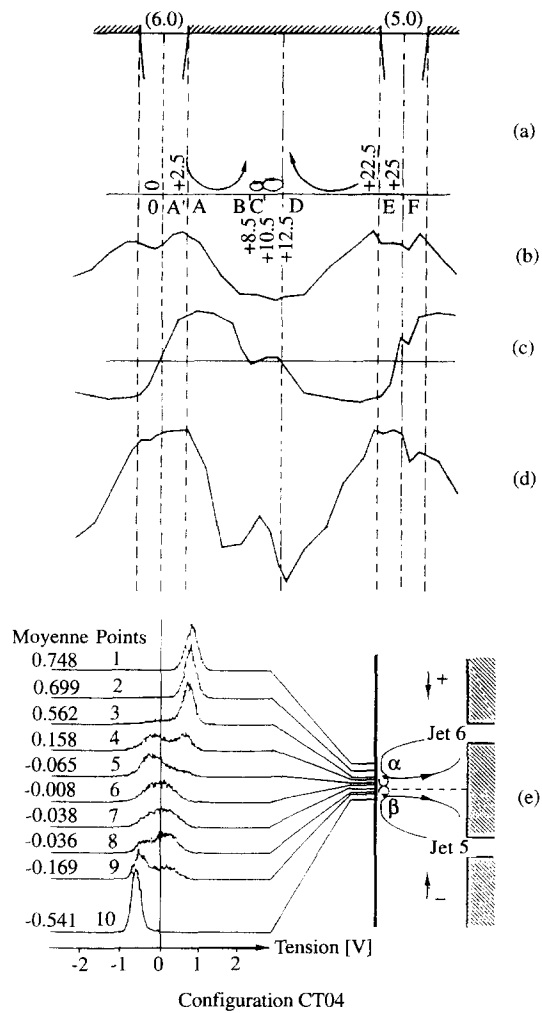


Fig. 10. Structure entre deux jets en configuration CT04 (a) et évolutions locales : (b) du gradient de vitesse, (c) du sens de l'écoulement, (d) du transfert local, (e) de l'histogramme des sens.

de S/S_0 sur les courbes 9(a) comme sur les courbes 10(b). Les deux pics situés de part et d'autre d'un jet sont distants d'environ 6 mm, c'est-à-dire d'un diamètre $d = 5$ mm accru de la mince épaisseur de la zone cisailée autour du jet. Entre les points 0 et A', les évolutions de S sont donc erronées mais la valeur obtenue en A' est exacte. Cela explique pourquoi les évolutions de S ont été rapportées à la vraie valeur du frottement S_0 en A'.

Compte tenu des résultats obtenus au LEMTA sur le frottement pariétal au voisinage d'un point d'arrêt amont d'un cylindre placé dans un écoulement [17], on peut penser que ce minimum relatif de frottement dans la zone d'arrêt n'existe pas et que le raccordement avec la valeur S_0 en A' se fait par un maximum absolu situé au point 0. A notre connaissance, la valeur de ce maximum n'est pas expérimentalement accessible.

(1) Du point A' au point B, le gradient de vitesse diminue fort logiquement et se stabilise à une valeur quasiment constante au point B.

(2) Le point *B* est caractérisé par le passage de la courbe de sens dans les valeurs négatives. Au point *C*, on note un nouveau passage dans les valeurs positives, suivi au point *D*, d'un retour définitif aux valeurs négatives. Ce comportement manifeste la présence à un instant donné de deux micro-tourbillons contrarotatifs, tels que représentés sur la Fig. 10(a).

(3) De *B* à *D*, et même un peu au delà, ces micro-tourbillons n'affectent plus le gradient pariétal de vitesse qui demeure très faible mais néanmoins minimum au point *D*.

(4) En se déplaçant vers le jet 5 à partir de *D*, on tombe dans la zone recirculée induite par celui-ci. Cette recirculation se traduit par un accroissement du gradient pariétal de vitesse comme observé dans la recirculation du jet 6.

(5) De nouveau au voisinage de *E*, on note un maximum de gradient suivi d'un minimum relatif au voisinage de *F* dont la présence s'explique par les remarques déjà faites entre 0 et *A*. On observe aussi qu'en *F* le changement de sens, traduisant la présence d'un point d'arrêt sur l'axe du jet, montre une discontinuité qui apparaît quelquefois sur d'autres courbes.

Pour conforter ces résultats, il est intéressant d'analyser le signal obtenu grâce à la sonde différentielle. On examine plus particulièrement la zone entre deux jets où nous avons localisé la présence de microstructures par le triple changement de sens de l'écoulement pariétal.

Chaque histogramme d'amplitude de la Fig. 10(e) est relié par un trait au point qui lui correspond sur la plaque d'impact. On note, sur la gauche du schéma, les valeurs moyennes calculées sur le signal.

On donne l'abscisse des différents points par rapport à leur distance à l'axe du jet 6 (en mm).

(a) Point 1 (+4)—tous les points de l'histogramme sont positifs, le point est situé en permanence sous la recirculation créée par le jet 6.

(b) Point 2 (+6) et 3 (+8)—la moyenne du signal est positive mais certains points de l'histogramme sont négatifs. Cela traduit, pendant de courts instants, une pénétration du micro-tourbillon α dans la recirculation.

(c) Point 4 (+9)—l'histogramme présente deux bosses nettement marquées avec une moyenne encore positive. Le point est balayé tantôt par le point de décollement entre la recirculation issue du jet 6 et la microstructure α tantôt par le point de recollement entre les deux microstructures. En moyenne, ce point est sous le micro-tourbillon α . On constate ici très nettement la superposition des deux structures d'écoulement.

(d) Point 5 (+10)—l'histogramme est déformé. Il présente encore deux bosses mais la seconde est toutefois beaucoup moins marquée. La moyenne est négative ainsi que la première bosse. On en conclut donc que ce point se trouve sous le micro-tourbillon α . Comme au point 4, il existe deux régimes d'écoulement mais le changement de sens entre la recirculation issue

du jet 6 et la microstructure α intervient moins souvent.

(e) Point 6 (+11)—l'histogramme indique que ce point est situé en moyenne entre les deux micro-tourbillons α et β . La probabilité de sa présence sous l'un ou l'autre des micro-tourbillons est égale. En ce point, un histogramme très étendu signifie un déplacement du point d'arrêt. Si ce dernier ne bougeait pas, on obtiendrait un histogramme sous la forme d'une droite verticale à l'abscisse 0. Néanmoins l'amplitude du déplacement demeure limitée car si ce point était balayé par—le point de décollement entre la recirculation issue du jet 6 et la microstructure α , le point de recollement entre les deux micro-tourbillons, ainsi que par le point de décollement entre le micro-tourbillon β et la recirculation issue du jet 5, l'histogramme présenterait 3 bosses.

Les divers histogrammes ont été refaits dans des conditions semblables ce qui nous a montré :

(1) d'une part la bonne reproductibilité d'ensemble du profil qui atteste de l'existence des structures décrites ici,

(2) d'autre part, l'influence très forte d'un équilibrage parfait entre les reprises sans lequel un glissement de la position des structures a été observé.

(f) Point 7 (+12)—la moyenne légèrement positive semble apporter la preuve que ce point est plus souvent situé sous le micro-tourbillon β .

(g) Point 8 (+13)—l'histogramme présente de nouveau deux bosses. Comme dans le cas du point 5, il y a superposition de deux structures d'écoulement, mais le changement de sens entre les deux micro-tourbillons intervient plus souvent que celui entre le micro-tourbillon β et la recirculation du jet 5.

(h) Point 9 (+14)—la moyenne du signal est nettement négative, mais l'histogramme présente deux bosses. Il existe les deux changements de sens comme ceux du point 8, mais sous ce point, c'est celui entre le micro-tourbillon β et la recirculation du jet 5 qui est le plus présent.

(i) Point 10 (+16)—tous les points de l'histogramme sont négatifs, le point 10 est donc en permanence situé sous la recirculation générée par le jet 5.

5.1.4. *Analyse des transferts de masse.* Le schéma de structure dynamique qui vient d'être présenté conforte les évolutions des transferts local et global.

La courbe 9(c) relative au transfert local montre que :

(1) le transfert est maximum sous le jet et minimum entre deux jets.

(2) les valeurs locales du nombre de Sherwood varient entre 200 et 500.

(3) le transfert devient faible lorsque l'on se rapproche des reprises, mais il n'atteint pas une valeur nulle.

(4) sous le jet, le transfert est maximum sur environ 5 mm.

(5) entre deux jets, il existe un maximum relatif qui est décalé vers la reprise la plus proche.

(6) deux minima entourent ce maximum relatif. Celui qui est le plus proche de la reprise voisine s'atténue peu à peu pour être quasi inexistant juste avant le dernier jet.

De même, entre les jets (5,0) et (6,0), on constate sur la courbe 10(d), que :

(a) le transfert est maximum à l'aplomb des jets et quasiment constant sur 5 mm. Cette valeur constante et maximale du transfert est en accord avec le comportement local du frottement qui néanmoins présentait sous le jet un minimum relatif dont la validité a déjà été discutée.

(b) le transfert comme le frottement décroît très vite sous la recirculation adjacente au jet considéré. On note là une analogie de comportement entre le transfert et le frottement.

(c) la zone située entre deux jets est assez perturbée. Du fait de la reprise proche, elle est décalée vers le jet (6,0). On observe très clairement deux minima localisés au voisinage des points de décollement des recirculations gauche et droite, c'est-à-dire aux changements de sens de l'écoulement, conséquence de l'existence des tourbillons contrarotatifs α et β . Le maximum relatif observé et induit par ces micro-tourbillons qui balaient la surface de la sonde. Il faut noter toutefois que ce maximum ne se retrouve pas systématiquement entre tous les jets.

Quant au transfert global [courbe 9(d)] son évolution présente un palier quasi-constant à une valeur du nombre de Sherwood de 350. Le transfert est constant sous les 5 jets centraux. En effet, lorsqu'on s'approche progressivement d'une reprise, la sonde carrée n'est plus impactée par 9 jets, mais seulement par 6 puis par 3 jets. Il y a donc une chute de transfert sous les jets les plus proches des reprises.

5.2. Influence du nombre de reprises pour $Re = 5850$

Lorsque la plaque disposée en regard de la batterie de jets est finie et que le fluide, après impact, est libre (c'est-à-dire non guidé vers les reprises par des parois qui le canalisent), l'influence du nombre de reprises est beaucoup plus faible que ne l'indique la bibliographie (milieu 'strictement confiné').

En effet, si la reprise longitudinale r_1 est la seule ouverte, le débit aspiré M sera la somme d'un débit M_x suivant $0x$ et d'un débit M_y suivant $0y$ où $M_y \ll M_x$. Les mesures pariétales n'étant effectuées que dans le plan médian $y = 0$, 'l'effet d'accumulation' suivant $0x$ et sensiblement réduit. Cette redistribution est encore bien plus marquée lorsque les reprises longitudinales et latérales sont toutes ouvertes.

Nous comparons les essais : CT04 avec reprises sur les 4 côtés (courbe 11a), CT02 avec les reprises longitudinales ouvertes [courbe 11(b)] et CT01 avec une seule reprise longitudinale ouverte [courbe 11(c)].

Sur le frottement local, aucune différence sensible n'apparaît ; en revanche, les évolutions comparées du sens de l'écoulement (Fig. 11) mettent en évidence des comportements légèrement différents surtout entre CT04 et CT01.

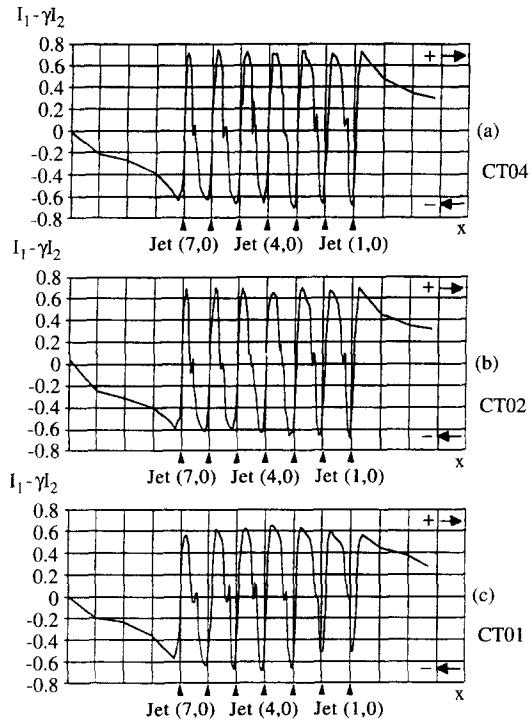


Fig. 11. Sens des écoulements (a) CT04, (b) CT02, (c) CT01.

- Les recirculations provenant de deux jets adjacents n'ont plus la même taille. Lorsque l'on se rapproche de la reprise ouverte, les recirculations provoquant un écoulement pariétal dans le sens inverse du flux aspiré par la reprise ouverte deviennent de plus en plus petites.
- Les microstructures pariétales, observables entre deux jets, et les instabilités qui en résultent disparaissent progressivement lorsque l'on se rapproche de la reprise ouverte.

Dans le sens transversal, nous n'observons aucune différence suivant le nombre de reprises. Ce résultat traduit une stabilisation de la structure pariétale, qui confirme les analyses des fluctuations du gradient pariétal de vitesse.

Quant au transfert local son évolution dans la configuration CT01 est quasiment semblable à celle de CT04 [Fig. 9(c)] à l'exception toutefois des valeurs maximales de transfert à l'aplomb des jets qui sont plus élevées de quelques 5%. Cette différence n'induit cependant pas d'écart sur les transferts globaux qui sont quasi-identiques pour les trois essais.

5.3. Influence de la hauteur des reprises pour $Re = 5850$

Ce paragraphe est destiné à l'étude de l'influence de la hauteur des reprises qui peuvent être positionnées soit dans le plan de sortie des jets (niveau 0), soit en retrait de celui-ci (niveau 1) ménageant ainsi des cavités immergées tout autour des matrices de jets [Fig. 3(b)].

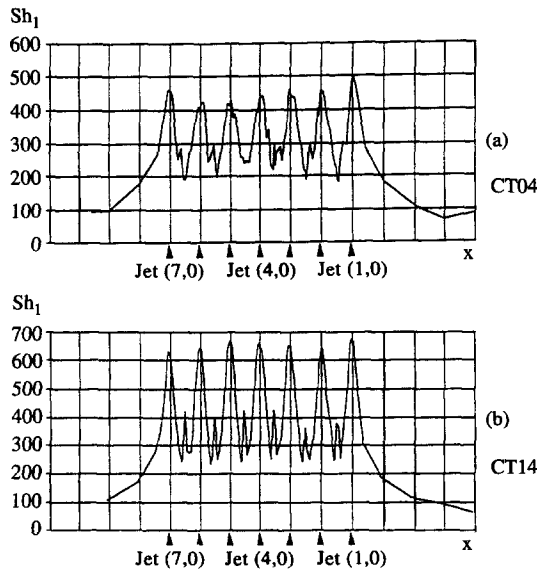


Fig. 12. Influence de la hauteur des reprises sur les transferts locaux : (a) CT04, (b) CT14.

Les évolutions comparées du sens de l'écoulement ne sont pas significatives, en revanche on note que le frottement local est sensiblement supérieur : +21% entre CT14 et CT04, +17% entre CT12 et CT02 et +5% entre CT11 et CT01.

L'éloignement des reprises placées au niveau 1 ($I = 1$) modifie la répartition des vitesses dans les sections droites de sortie par réduction de l'effet de blocage aval. En effet, dans le cas $I = 0$, le mélange en amont des reprises minimise l'effet de survitesse pariétale due aux jets déviés. Le recul des fentes de reprise retarde cette interaction qui ne se produit que dans la cavité où l'effet de blocage est beaucoup moins marqué. Il en résulte alors des vitesses pariétales plus élevées donc des valeurs absolues du gradient pariétal plus fortes.

Les courbes 12(a) et 12(b), qui traduisent les évolutions des nombres de Sherwood locaux sous les jets, montrent bien que dans une configuration à 4 reprises les transferts locaux sont plus importants lorsque les reprises sont plus éloignées. Cela se retrouve également sur le transfert global Sh_g comme on le constate sur le Tableau 1.

On observe même que cet effet est d'autant plus bénéfique que la reprise s'effectue sur plusieurs côtés.

Tableau 1

	$J = 4$	$J = 2$	$J = 1$
$I = 0$	344	344	342
$I = 1$	377	376	368
Gain relatif	+10%	+10%	+8%

5.4. Influence du nombre de Reynolds

Les résultats présentés jusqu'ici sont relatifs à $Re = 5850$, soit $V_j = 1.16 \text{ m s}^{-1}$. L'influence du nombre de Reynolds des jets n'a pas été étudiée de façon systématique; toutefois, pour certaines configurations, nous avons voulu observer si des modifications de la structure pariétale pouvaient apparaître. Deux autres valeurs du nombre de Reynolds ont été imposées: $Re = 4000$ ($V_j = 0.8 \text{ m s}^{-1}$) et $Re = 2000$ ($V_j = 0.4 \text{ m s}^{-1}$).

Les courbes de frottement ne présentent pas de différences significatives quant à leur forme, tandis que les valeurs mesurées décroissent rapidement quand la vitesse du jet diminue. En revanche, les courbes de sens de l'écoulement pariétal indiquent clairement que les triple changement de sens, existant entre deux jets, sont nettement plus marqués aux faibles vitesses de jets. Ces derniers étant moins incisifs au niveau de la paroi, les recirculations sont moins cohérentes et laissent alors se développer les microstructures.

Les évolutions des transferts locaux sont peu altérées par ce phénomène et les transferts globaux sont en Re à la puissance 0.567. Ce résultat et donné à titre indicatif dans la mesure où trois points ne suffisent pas pour formuler une corrélation.

6. CONFIGURATION A BUSETTES: CB

Dans cette configuration, on se place délibérément dans le cas de reprises en retrait (niveau 1) de façon à se situer dans les conditions donnant le meilleur transfert.

6.1. Présentation de l'essai CB14 pour $Re = 5850$

Les allures des courbes de gradient pariétal réduit de vitesse S/S_0 , de sens de l'écoulement, de transfert de masse local et global sont semblables à celles de la configuration CT04 représentée sur la Fig. 9.

On note toutefois des différences apparentes sur la Fig. 13 relative aux évolutions entre les jets 6 et 5.

Les deux maxima situés de part et d'autre du minimum (conséquence de la métrologie adoptée) sont distants de 9 mm. Dans le cas de la configuration CT04, les maxima sont séparés d'une distance de 6 mm. L'accroissement de la distance est dû à l'épaisseur de la paroi de la busette qui, par effet de sillage, rend les couches cisailées plus épaisses. Cet effet de sillage augmente la turbulence et permet au jet d'atteindre la paroi dans un état plus turbulent.

Entre deux jets, on remarque un maximum relatif de frottement dû à l'existence des microstructures. Cette zone, qui était instable dans la configuration à trous, est plus stable dans la configuration à busettes. On montre que les recirculations et les micro-tourbillons contrarotatifs entre deux jets, sont plus marqués et plus stables. Les recirculations qui peuvent s'étendre en hauteur dans les espaces situés entre les busettes sont ainsi stabilisées.

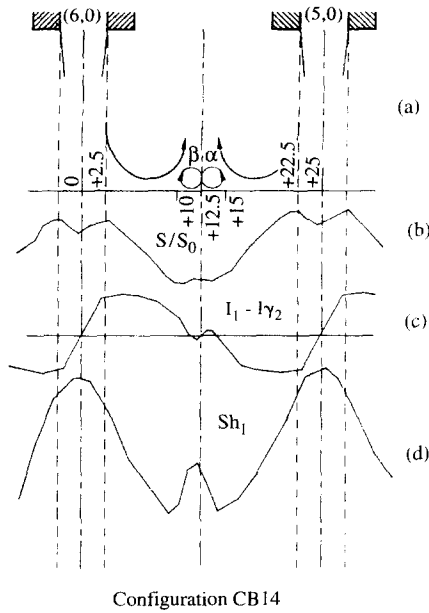


Fig. 13. Structure entre deux jets (a) et évolutions locales. (b, c, d) (configuration CB14).

Cette stabilisation des jets et des recirculations qui en découlent est confirmée par l'histogramme d'amplitude entre les jets 5 et 6. Les micro-tourbillons α et β sont quasi-symétriques.

Quant au transfert local, on constate, sur la Fig. 14(b), que :

- (1) le transfert est maximum sous les jets ;
- (2) les courbes présentent, entre les jets, un maximum relatif centré, flanqué de part et d'autre de deux minima très marqués et reproductibles quelle que soit la position des jets ;
- (3) le nombre de Sherwood varie entre 250 et 650 ;
- (4) tous les maxima absolus et relatifs et tous les minima, ont la même valeur sous toute la matrice de busettes ;
- (5) aucun effet d'accumulation n'apparaît. Cela peut facilement s'expliquer par le moindre confinement du dispositif avec matrice d'injection à busettes, car l'écoulement peut se redistribuer dans l'espace correspondant à la hauteur des busettes. L'espace entre le plan de base des busettes et la plaque est de 50 mm soit le double de celui de la configuration CT04. Il en résulte qu'aucun glissement du maximum relatif entre jets n'est observable lorsqu'on se approche des reprises.

La parfaite reproductibilité, jamais observée dans la configuration CT04, est la conséquence d'une bonne stabilisation des structures dynamiques déjà évoquée plus haut. Quant au transfert global, dont les évolutions sont représentées sur la courbe 14(c), il présente un plateau bien constant sur toute la zone impactée.

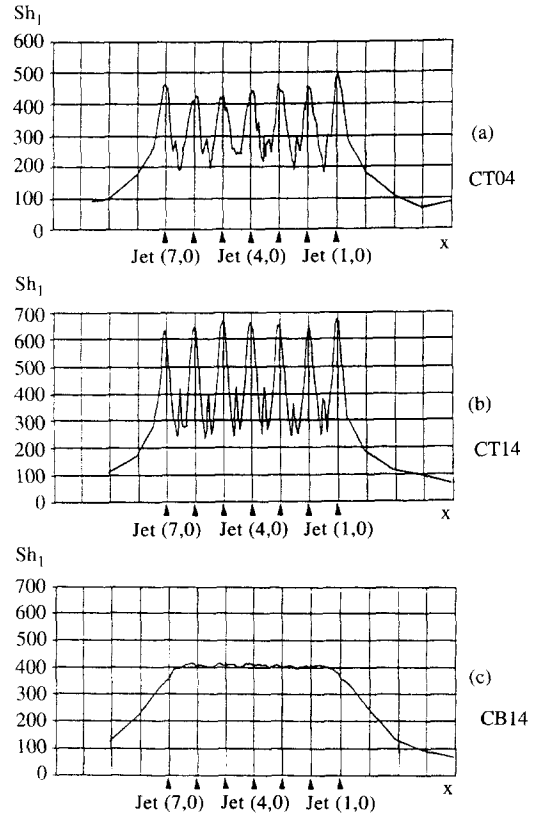


Fig. 14. Comparaison des transferts locaux : (a) CT04, (b) CB14 et (c) transfert global CB14.

6.2. Comparaisons globales des configurations CTIJ et CB1J pour $Re = 5850$

Le Tableau 2 ci-dessous compare les trois essais analysés en détail : CT0J, CT1J et CB1J, pour les 3 valeurs de J : 4, 2, 1.

En 'configuration busettes', on retrouve l'effet légèrement bénéfique du nombre de reprises. On observe que les gains sont seulement de l'ordre de 3% quand on passe de une à deux ou quatre reprises.

En revanche, on montre très clairement l'intérêt qu'il y a de combiner une injection par busette avec des reprises éloignées. Il en résulte, quel que soit le nombre de reprises, un gain de transfert global moyen d'environ 17%.

Le meilleur transfert obtenu avec les busettes est imputable à un moindre effet d'accumulation dans la mesure où le fluide amont qui a la possibilité de s'écouler entre les busettes ne gêne pas l'impact des jets aval. Dans ces conditions, il semblerait intéressant de

Tableau 2.

	$J = 4$	$J = 2$	$J = 1$
Sh_g (CT0J)	344	342	342
Sh_g (CT1J)	377	376	368
Sh_g (CB1J)	410	413	400

reprendre une configuration constituée par des busettes disposées en quinconce qui permettrait d'avoir une plus grande homogénéité des flux extraits.

7. CONCLUSION

Les articles qui traitent des transferts par impact de jets sur une surface sont nombreux. Néanmoins, il s'avère que les résultats sont très dépendants de la géométrie considérée et notamment de la façon dont le fluide est repris dans une configuration qui peut être plus ou moins confinée.

Pour apporter une contribution à ce problème dans le cadre d'un laboratoire disposant d'une métrologie originale et précise, nous avons conçu une maquette hydraulique froide permettant de faire varier le nombre et la position des reprises ainsi que la nature des injecteurs.

La méthode de mesure utilisée est la polarographie qui permet des mesures pariétales locales : des gradients de vitesse, du sens de l'écoulement et des transferts de masse local et global.

L'étude dynamique limitée à la proximité immédiate de la plaque d'impact a pour objet d'avoir une vision réaliste des structures d'écoulement après interaction jet-jet et jets-paroi, afin d'expliquer les comportements des transferts et de déceler les paramètres les plus influents dans l'optique d'une optimisation de ceux-ci.

Il ressort de l'analyse du sens de l'écoulement pariétal qu'entre les deux recirculations, induites par les jets à travers une zone cisailée, apparaissent deux petits tourbillons contrarotatifs qui sont plus ou moins stables en fonction de la nature des orifices.

Le nombre et la position des reprises influencent peu le frottement. Cependant, lorsqu'on reprend sur un seul côté, on remarque une légère déviation des deux derniers jets. L'influence du nombre de reprises sur la structure dynamique (frottement et sens de l'écoulement pariétal) se révèle beaucoup plus faible que ce qui est généralement noté dans la bibliographie. Cette différence s'explique par le moindre confinement de l'espace qui induit un effet d'accumulation beaucoup moins sensible mais qui cependant modifie la taille des recirculations comprises entre deux jets adjacents. Quant aux transferts de masse, ils sont légèrement plus élevés, de quelques 5%, quand on aspire par un plus grand nombre de reprises.

L'influence de la hauteur des reprises est plus significative. Les valeurs du frottement local et des transferts local et global croissent respectivement de 15 et 10% lorsqu'on éloigne les reprises du plan d'injection. La comparaison entre configurations à trous et à busettes permet de conclure d'une part que les frottements sont plus élevés dans le cas de la seconde et d'autre part que les structures inter-jets sont stabilisées.

L'étude de l'évolution du transfert de masse sur la plaque montre que le transfert local présente un maximum sous les jets et un minimum entre deux jets.

Cela est en bon accord avec le schéma de structure dynamique proposé.

Par intégration de la courbe du transfert local, on obtient un transfert moyen qui est très voisin de celui mesuré à l'aide de la sonde de transfert global. Dans le cas de la configuration à busettes, le transfert est augmenté de 17% par rapport à l'utilisation de matrices d'injection à trous.

REFERENCES

1. K. Huesmann, Eigenschaften turbulenter Strahlenbündel, *Chemie-Ing-Teck.* **38**, 293-297 (1966).
2. R. Gardon and J. Cobonpue, Heat transfer between a flat plate and jets of air impinging on it. International Developments in heat transfer, *Second International Heat Transfer Conference*, pp. 454-460. ASME, New York (1962).
3. R. Gardon and J. C. Akfirat, Heat Transfer characteristics of impinging two-dimensional air-jets, *J. Heat Transfer* **86**, 101-108 (1964).
4. P. Hrycak, Heat transfer from round impinging jets to a flat plane, *Int. J. Heat Mass Transfer* **26**, 1857-1865 (1983).
5. L. W. Florschuetz and C. C. Su, Effects of cross flow temperature on heat transfer within an array of impinging jets, *J. Heat Transfer* **109**, 74-82 (1987).
6. L. W. Florschuetz, R. A. Berry and M. E. Metzger, Periodic steamwise variation of heat coefficients for inline and staggered arrays of circular jets with cross flow of spent air, *J. Heat Transfer* **102**, 132-137 (1980).
7. W. Potke and R. Jeschar, Heat transfer for impinging jets from arrays of circular nozzles, *Clausthal, Eurotherm no. 1* (1987).
8. J. L. Chance, Experimental investigation of air impingement heat transfer under arrays of round jets, *Tappi* **57**, 108-112 (1974).
9. J. Nanzer, A. Donizeau and F. Coeuret, Overall mass transfer between electrodes and normal impinging submerged multijets of electrolyte, *J. Appl. Electrochem.* **14**, 51-62 (1984).
10. J. Nanzer and F. Coeuret, Distribution of local mass transfer coefficients over one electrode bombarded by submerged multijets of electrolyte, *J. Appl. Electrochem.* **14**, 627-638 (1984).
11. A. Bensmaili and F. Coeuret, Overall mass transfer between a solid surface and submerged or unsubmerged liquid multijets, *J. Electrochem. Soc.* **137**, 1744-1750 (1990).
12. R. J. Goldstein and A. I. Behbahani, Impingement of a circular jet with and without cross flow, *Int. J. Heat Mass Transfer* **25**, 1377-1382 (1982).
13. N. T. Obot and T. A. Trabold, Impingement heat transfer within arrays of circular jets: Part 1. Effect of minimum intermediate and complete cross flow for small and large spacings, *J. Heat Transfer* **109**, 872-879 (1987).
14. E. M. Sparrow, R. J. Goldstein and M. A. Rouff, Effect of nozzle-surface separation distance on impingement heat transfer for a jet in a cross flow, *J. Heat Transfer* **97**, 528-533 (1975).
15. R. Viskanta, Heat Transfer to impinging isothermal gas and flame jets, *Exp. Thermal Fluid Sci.* **9**, 111-134 (1993).
16. M. Lebouche and G. Cognet, La polarographie, moyen d'étude du mouvement des liquides, *Chim. Ind. Génie Chimique* **97**, 2002-2009 (1967).
17. M. Lebouche and M. Martin, Convection forcée autour du cylindre; sensibilité aux pulsations de l'écoulement externe, *Int. J. Heat Mass Transfer* **18**, 1161-1175 (1975).
18. Kolthoff and Lingane, *Polarography*, Volume I (2 volumes). Interscience, New York (1952).
19. *Viewdac*, Keithley Instruments Inc., Taunton, MA (1987).

MASS TRANSFER FROM A FLAT PLATE SEGMENT FACING IMPINGING JETS.
INFLUENCE OF EXHAUSTS NUMBER AND LOCATION AND OF NOZZLE
GEOMETRY

Abstract—Using a cold hydraulic facility, we determine the convective mass transfer coefficients : local and global, from the surface of a flat plate segment impinging by axisymmetrical circular jets coming through inline holes and pipe injectors from a plenum facing the plate. After the impact, the fluid is extracted from the confined space located between the plate and the plenum by means of exhausts whose influence we intend to examine : number and location. We show that transfers are increased by 5% when the extraction occurs by four exhausts and not by only one. As for the exhaust location (height), it clearly appears that the parameter is more significant since the local and global mass transfer increase can reach 15% when we move away the exhausts from the injection plane of the plenum. The comparison of the two configurations, with holes and pipe injectors, points out that the second one has an advantage over the first one which can be materialized by a mass transfer increase of 17%. A dynamic wall study, based on measurements of local friction and fluid direction gives a realistic view of flow structures and allows us to explain in a satisfying way the transfer evolution obtained. Copyright © 1996 Elsevier Science Ltd.