

# Contrôle passif des jets impactants : applications aux transferts de masse et de chaleur.

Brice MONTAGNÉ<sup>1</sup>, Denis BROUILLIOT<sup>2\*</sup>, David LO JACONO<sup>2</sup>, Sébastien CAZIN<sup>2</sup>, Kodjovi SODJAVI<sup>1</sup>, Amina MESLEM<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE), Pôle Sciences et Technologie - Avenue Michel Crépeau 17042 La Rochelle Cedex 1 - France

<sup>2</sup>Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), 2 Allée du Professeur Camille Soula – 31400 Toulouse

<sup>3</sup>Université Européenne de Bretagne, LGCGM, Equipe Matériaux et Thermo-Rhéologie, IUT de Rennes, 3 rue du Clos Courtel, BP 90422, 35704 Rennes Cedex 7, France

\* (auteur correspondant : [denis.brouilliot@imft.fr](mailto:denis.brouilliot@imft.fr))

**Résumé** – L'amélioration des transferts de masse et de chaleur reste un défi majeur que ce soit dans le domaine de l'industrie ou de la recherche. Il devient de plus en plus primordial d'économiser l'énergie. Cela passe par l'optimisation des transferts de chaleur et de masse dans les systèmes. Cette approche a pour but l'augmentation de leurs performances et la diminution de leurs consommations énergétiques. Ce travail s'inscrit dans une démarche visant ces objectifs au moyen de jets lobés impactants. Bien que les jets aient été étudiés depuis ces trente dernières années, l'application du contrôle passif aux transferts par impact de jet reste relativement récente. La conception de plusieurs buses lobées d'injection faisant varier le nombre et la forme des lobes nous a permis d'en évaluer l'influence. La distance d'impact a été fixée à  $H/D = 2$  pour un nombre de Reynolds égal à 2600. Les outils de mesures à notre disposition sont la thermographie infrarouge (IMFT) et la méthode électrodiffusionnelle (LaSIE). À partir des champs de température mesurés pour quatre flux thermiques, nous faisons un bilan d'énergie nous permettant d'obtenir quatre couples température/flux de convection forcée. Une régression linéaire de la loi de Newton aboutit ainsi aux calculs de nombres de Nusselt moyen. Cette méthode rend la comparaison entre les différentes configurations plus précises. Pour la méthode électrodiffusionnelle une solution aqueuse de ferri-ferrocyanure de potassium est utilisée. Lorsque le jet impacte la paroi cible (ou plus précisément les électrodes placées sur celle-ci) une réaction d'oxydo-réduction a lieu. En mesurant le courant électrique, on peut en déduire le transfert de masse à la paroi. La géométrie particulière des jets lobés entraîne la génération d'une paire de tourbillons contrarotatifs à l'extrémité de chaque lobe. La première conséquence est la présence d'un pic de transfert correspondant à la localisation spatiale des lobes. La seconde est la génération d'un puissant jet de paroi entre deux lobes consécutifs favorisant les transferts. Les mesures ont montré qu'un grand nombre de lobes diminue les performances du jet. À l'inverse, la modification de la forme de lobes en rendant les contours plus arrondis les améliorent. Finalement, l'amélioration des transferts thermiques ou massiques par jet lobé impactant nous amène à rechercher le meilleur compromis entre la forme et le nombre de lobes.

## Nomenclature

|      |   |                             |  |
|------|---|-----------------------------|--|
| $c$  | Concentration massique de l'espèce active, $g.L^{-1}$   | $S_{el}$                    | Surface active de l'électrode de travail, $m^2$    |
| $D$  | Diamètre du jet, $m$  | $T$                         | Température, $K$                                   |
| $d$  | Coefficient de diffusion de l'espèce active, $m^2.s^{-1}$   | $x$                         | Position verticale, $m$                            |
| $F$  | Constante de Faraday, $96485 mol^{-1}$  | $y$                         | Position horizontale, $m$                          |
| $H$  | Distance d'impact entre la sortie du jet et la plaque d'impact, $m$                               | <i>Symboles grecs</i>       |  |
| $hc$ | Coefficient de convection, $W.m^{-2}.K^{-1}$  | $\varepsilon$               | Emissivité   |
| $k$  | Coefficient de transfert de masse, $m.s^{-1}$   | $\lambda_{air}$             | Conductivité thermique de l'air, $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| $n$  | Nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction électrochimique au niveau de l'électrode de mesure | $\nu$                       | Viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$                |
| $Nu$ | Nombre de Nusselt   | $\rho$                      | Densité de la solution                             |
| $Pr$ | Nombre de Prandtl   | $\Phi_C$                    | Densité de flux de convection forcée, $W/m^2$      |
| $Re$ | Nombre de Reynolds  | <i>Indices et exposants</i> |  |
| $Sc$ | Nombre de Schimdt   | $0$                         | Position en sortie de buse                         |
| $Sh$ | Nombre de Sherwood  | $1$                         | Côté de la plaque impacté par le jet               |
|      |   | $2$                         | Côté de la plaque exposé à la caméra               |

## 1. Introduction

L'utilisation des jets impactants pour améliorer les transferts de chaleur et de masse a fait l'objet d'un grand nombre d'études au cours des trente dernières années. En effet, un certain nombre de dispositifs ont leurs performances améliorées par le contrôle de la température, par exemple dans les microprocesseurs ou bien dans le refroidissement des aubes de turboréacteur. Les jets impactants appliqués au transfert de chaleur ou de masse ont été étudiés pour une géométrie circulaire dans plusieurs travaux, comme par exemple dans [1], [2]. Une des solutions pour améliorer les transferts de chaleur est le contrôle passif de l'écoulement. Cela consiste à modifier les caractéristiques de l'écoulement par la modification de la buse d'injection. Le cisaillement de l'écoulement par un bord de fuite ondulé et/ou comprenant des singularités géométriques conduit à la génération de structures cohérentes asymétriques qui augmentent l'auto-induction du jet [3]. Les premières études ont été menées sur des jets libres rectangulaires [4]. Certaines études sur les jets elliptiques [5] ont montré un taux d'entraînement supérieur à celui des jets circulaires ou rectangulaires. Cela a permis la découverte de deux phénomènes particuliers. Le premier est l'inversion des axes majeur et mineur, désigné par « croisement d'axes ». Le croisement d'axes est dû aux distorsions azimutales des tourbillons elliptiques de Kelvin-Helmholtz. Le second est l'existence de tourbillons longitudinaux en contre-rotation à l'intérieur du jet. L'évolution du contrôle passif a donné lieu à des géométries de plus en plus complexes, par exemple, les mélangeurs de type chevrons introduits sur le bord de fuite de la buse [6] et les buses à bords de fuites ondulés, dit lobés [7], [8]. Si le contrôle passif par buses lobées est largement utilisé dans les jets libres, peu de travaux ont porté sur les jets lobés en impact [9]. De plus aucune étude n'a porté à ce jour, simultanément, sur les transferts de masse et de chaleur par jets lobés impactants. Les jets lobés sont des candidats prometteurs pour une possible amélioration des transferts de masse et de chaleur, la raison pour laquelle nous nous y intéressons ici. Notre volonté d'apporter des connaissances sur ce point particulier, nous a amenés à réaliser des mesures de transferts de masse et des mesures de transferts thermiques au sein de deux Laboratoires différents (respectivement LaSIE et IMFT). L'objectif principal étant d'établir une corrélation entre les transferts de masse et de chaleur pour des conditions d'injections constantes (même buse d'injection et même Reynolds). Nous voulons également vérifier la pertinence de l'utilisation d'un jet lobé par rapport à un jet circulaire de référence pour améliorer la performance des transferts.

## 2. Dispositifs expérimentaux

Le diamètre des buses (diamètre équivalent basé sur la section de soufflage) est  $D = 16\text{mm}$ . Le jet est généré par une conduite à section circulaire de diamètre intérieur  $D$  et de longueur  $56D$  (tube + buse). Cette longueur nous assure un écoulement pleinement développé. Le nombre de Reynolds basé sur  $D$  et sur la vitesse caractéristique délivrée par le débitmètre  $U$  est fixé tout au long de l'étude à 2600. La distance entre la buse et la plaque est fixée à  $H/D = 2$ . Nous avons étudié trois buses différentes. La première de référence est une buse circulaire à bord droit. Les deux autres sont des buses lobées inspirées de celles élaborées dans [10]. Elles sont nommées respectivement buse 8 lobes et buse trèfle (cf. Figure 1).

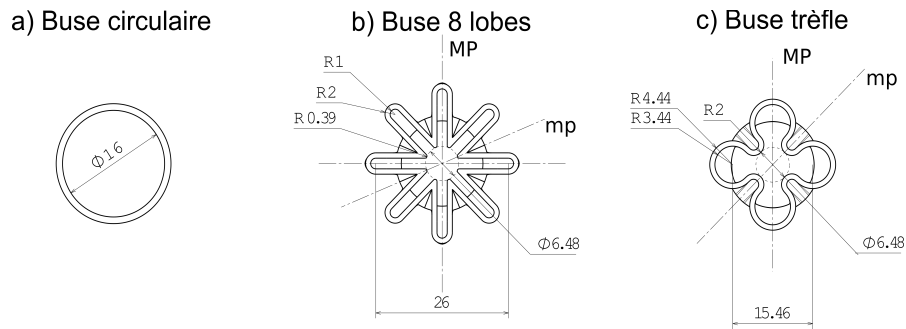


Figure 1 : Croquis des buses d'injection: (a) buse circulaire; (b) buse 8 lobes ; (c) buse trèfle. (MP : plan majeur et mp : plan mineur).

## 2.1 Les mesures thermiques

La Figure 2 présente un schéma global du dispositif expérimental et met en évidence les éléments clefs. Les expériences sont menées à l'aide d'un jet d'air impactant une plaque plane (22D x 22D). L'étude thermique est conduite sur une fine plaque plane en inox chauffée uniformément par effet Joule pour quatre flux électriques (35W, 65W, 100W et 145W). La plaque d'impact a une conductivité égale à 16.3 W/m/K et une épaisseur de 50  $\mu\text{m}$ . La température est contrôlée par un générateur de tension qui est connecté par deux contacteurs en cuivre aux arêtes opposées de la plaque. Les quatre flux électriques sont nécessaires lors de l'utilisation de la régression linéaire de la loi de Newton. Une caméra IR (Jade II MWIR) est placée à une distance de 1020mm de la zone impactée et donne ainsi une zone de mesures de 96mm x 96mm (6D x 6D). Une sonde de température (PT100) est insérée en amont du tube afin d'en mesurer la température. Le côté impacté par le jet est une surface lisse d'émissivité  $\epsilon_1 = 0.10$ . De l'autre côté, la face exposée à la caméra infrarouge est une surface noire d'émissivité  $\epsilon_2 = 0.941$ . Le nombre de Biot basé sur le coefficient de convection global vaut  $8.28 \times 10^{-5}$ . Notre étude respecte les conditions optimales de mesure du transfert de chaleur convectif local moyenné en temps entre une fine feuille métallique et un jet d'air impactant comme décrit par [11]. Un corps noir (HGH infrared system) est utilisé comme référence à chaque calibration de la caméra IR. Ce qui correspond à une correction de non uniformité en 2 points à chaque démarrage de la caméra. La gamme de température mesurée par la caméra est de 10°C à 60°C. Une correction de radiométrie est effectuée sur les champs de température brute. La fréquence d'acquisition de la caméra est fixée à 50Hz. Les séquences de mesures ont une durée de 200 secondes. Les quantités présentées ont fait l'objet d'une moyenne temporelle.

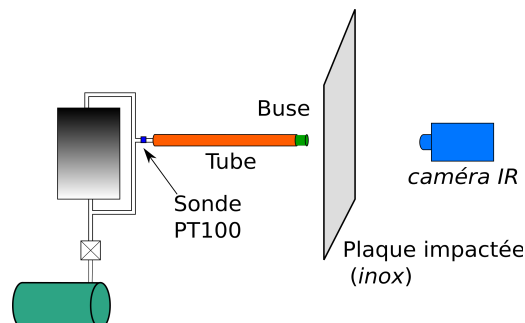


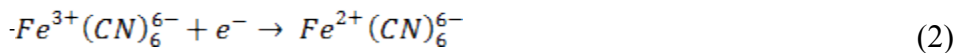
Figure 2 : Schéma du dispositif de thermique

## 2.2 La méthode électrodiffusionnelle

Dans ces expériences un jet de solution aqueuse immergé au sein d'une cuve, impacte une surface cible. Le nombre de Reynolds est égale 2600 comme précédemment. Un schéma de ces expériences est représenté sur la Figure 3. Une pompe à engrenages (3) aspire le liquide dans un réservoir (4) et le réinjecte via une buse sur la cible (disque de platine (1)). Sur celle-ci, six électrodes sont placées horizontalement permettant d'effectuer les mesures électrodiffusionnelles (Figure 3 (b)). La température du liquide est gardée constante grâce à un système de refroidissement (7) permettant de réguler la température à  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ . La buse est vissée sur un tube en métal de 200 mm de longueur (2), son diamètre intérieur est de 15 mm et son diamètre extérieur est de 20 mm. Un nid d'abeille a été inséré dans le tube. Cet ensemble est placé sur un système de déplacement (5, 6) permettant de régler la position du point de stagnation sur la cible. La méthode électrodiffusionnelle (ED) est basée sur la mesure d'un courant limite de diffusion ( $I$ ) mesuré sur l'électrode de travail. Ce courant est dû à la réaction des ions (espèces actives) qui sont transportées par convection et diffusion moléculaire jusqu'à l'électrode de travail. Le coefficient de transfert de masse  $k$  peut être déduit du courant limite de diffusion :

$$k = \frac{I}{S_{el} F c} \quad (1)$$

La réaction d'oxydo-réduction du ferri et du ferrocyanure de potassium se produit sur l'électrode de travail et l'oxydation se produit sur l'électrode auxiliaire :



Pour que le courant limite de diffusion ne soit contrôlé que par les phénomènes se produisant sur l'électrode de travail, l'électrode auxiliaire doit être bien plus grande que l'électrode de travail. Il est possible de diminuer les effets sur l'électrode de travail en augmentant la concentration du ferrocyanure (comparé au ferricyanure). Pour éliminer le transport des ions par migration électrique, la conduction électrique est renforcée en ajoutant un électrolyte de support ( $K_2SO_4$ ) qui ne réagit pas avec les électrodes. Le fluide d'essai est une solution aqueuse d'un mélange équimolaire de 20 mol/m<sup>3</sup> de ferri/ferrocyanure de potassium et de 86.2 mol/m<sup>3</sup> de  $K_2SO_4$ . La densité de cette solution est de  $1.007 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, sa viscosité cinématique est de  $1.065 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s et sa diffusivité est de  $7.5 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s à 20 °C. Le nombre de Schmidt (Sc) résultant vaut  $1.420 \times 10^3$ . Le nombre d'électrons mis en jeu dans cette réaction électrochimique est de  $n=1$ .

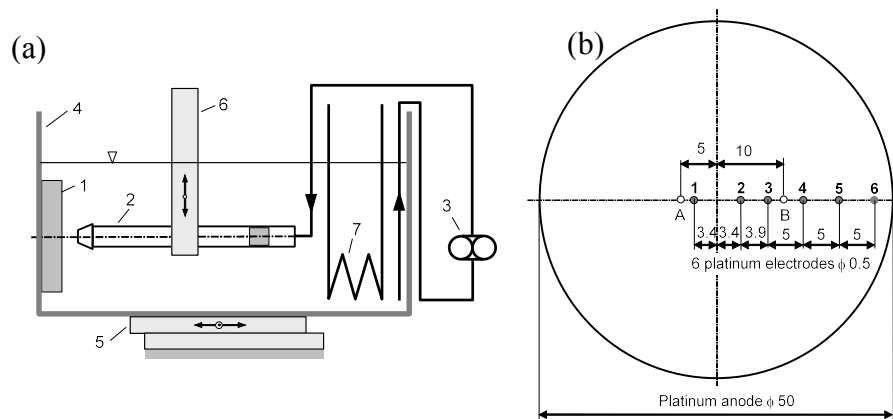


Figure 3 : (a) Schéma de l'appareil de mesure (b) disque cible où sont placées les électrodes

En ce qui concerne la mesure du nombre de Sherwood global, le disque de platine est utilisé comme électrode de travail et des plaques de nickel comme électrode auxiliaire (elles sont placées de telle sorte

qu'elles recouvrent entièrement le fond de la cuve). Ainsi, le disque de platine est maintenu au même potentiel que les électrodes et de ce fait le disque de platine est utilisé pour mesurer le transfert de masse global.

### 3. Méthode de mesure

#### 3.1 Mesure de transfert de chaleur

La mesure de la température de la plaque non chauffée impactée par le jet nous permet de calculer la conductivité thermique de l'air. Les données thermiques sont adimensionnées par l'introduction du nombre de Nusselt :

$$Nu = h_c \cdot D / \lambda$$

où  $\lambda$  est la conductivité thermique de l'air et  $h_c$  est le coefficient de convection thermique local. Le calcul du coefficient de convection local est basé sur la loi Newton et sur l'utilisation d'une méthode par régression linéaire [12], [13]). Cette méthode nécessite la connaissance du couple ( $T_w$ ,  $\Phi_c$ ), où  $T_w$  est le champ de température mesuré sur la plaque et  $\Phi_c$  est le flux de convection forcée associé. Ce flux est obtenu par un bilan d'énergie prenant en compte le rayonnement, la convection naturelle de l'autre côté de la plaque, la conduction et l'effet Joule [6]. Ainsi, quatre flux électriques nous donnent quatre couples, qui associés à la régression linéaire donnent la relation suivante :

$$h_c = \left[ \frac{n \sum (\Phi_c \times T_w) - \sum \Phi_c \times \sum T_w}{n \sum \Phi_c^2 - (\sum \Phi_c)^2} \right]^{-1} \quad (3)$$

Les termes de sommation de l'équation (3) se font sur  $n = 4$  flux électriques.

#### 3.2 Mesure de transfert de masse et du taux de cisaillement

On rappelle que la méthode électrodiffusionnelle (ED) est basée sur la mesure d'un courant limite de diffusion sur une électrode de travail. Le courant total  $I$  est mesuré via une électrode circulaire dans un écoulement visqueux stable où les lignes de courant sont parallèles et le taux de cisaillement  $\gamma$  est uniforme. Le courant limite de diffusion est déterminé par le transfert de l'espèce active sur l'électrode de travail. En faisant l'hypothèse que la résistance aux transferts sur l'électrode auxiliaire est négligeable comparée à celle sur l'électrode de travail, le coefficient de transfert de masse peut être calculé via la relation (1) où  $S_{el}$  est la surface active de l'électrode de travail,  $F$  est la constante de Faraday et  $c$  est la concentration massique de l'espèce active. Le nombre de Sherwood  $Sh$  est ensuite défini tel que :

$$Sh = \frac{k D}{d} \quad (4)$$

où  $D$  est le diamètre de la buse et  $d$  est le coefficient de diffusion de l'espèce active.

L'analogie de Chilton et Colburn par le facteur  $J$  est définie de la manière suivante :

$$Jd = \frac{Sh}{ReSc^{0.33}} = Jh \frac{Nu}{RePr^{0.33}} \quad (5)$$

On peut transformer l'équation (5) et obtenir :

$$\frac{Nu}{Sh} = \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^{0.33} \quad (6)$$

Le rapport de  $Pr$  sur  $Sc$  nous donne une valeur théorique égale à 0.081 pour un nombre de Prandtl ( $Pr$ ) égal à 0,7. Le rapport de  $Nu$  sur  $Sh$  sera déterminé expérimentalement. Dans la suite, nous avons fait le choix de comparer l'exposant lié au rapport entre le nombre de Prandtl et le nombre de Schmidt.

#### 4. Résultats

Les mesures thermiques permettent d'évaluer la répartition spatiale des champs de Nusselt ( $Nu$ ). Le cas de référence montre une répartition circulaire classique (cf. Fig. 4a). Pour chacune des buses, la partie centrale correspond au point de stagnation et ainsi à la zone d'impact du cône potentiel. Cette zone correspond à un maximum de  $Nu$ . Pour le cas circulaire, la géométrie de la buse génère un plus large cône potentiel. Il se produit l'inverse pour les cas lobés. De manière générale, la géométrie lobée génère une paire d'anneaux contrarotatifs à l'extrémité de chaque lobe. Il en découle une fragmentation des anneaux de Kelvin-Helmholtz. Ce phénomène a une influence directe sur les transferts thermiques à la paroi. La buse à 8 lobes a une évolution spatiale quasi-circulaire bien que l'on distingue une forme octogonale. La principale zone d'influence se limite à 1.5D du centre. Au-delà de cette limite, on peut observer les effets de cisaillements des jets de paroi. La buse trèfle présente cinq formes circulaires, une centrée sur le point de stagnation et les autres au niveau des lobes. Chacune d'entre elles présente un maximum de  $Nu$  local. Ces maxima sont issus d'écoulements secondaires générés au niveau des lobes. Bien que la répartition spatiale de la buse trèfle ne soit pas homogène, on observe une limite de l'influence spatiale semblable à celle du cas de référence.

Afin d'étudier plus précisément l'évolution radiale des nombres de Nusselt, nous avons défini différents plans pour les buses lobées. Ainsi les plans majeur (MP) et mineur (mp) correspondent respectivement à un plan au niveau des lobes et à un plan au niveau des creux (cf. Fig.1). Dans la Figure 5, les plans MP et mp de la buse à 8 lobes sont quasiment confondus. Pour la buse trèfle, l'évolution des deux plans est relativement différente. Les deux courbes sont identiques jusqu'à 0.7D ce qui met en évidence la présence du cône potentiel. Le plan mineur est quasiment confondu avec la buse à 8 lobes. La courbe du plan majeur possède un second pic de  $Nu$  local. Ce pic correspond à l'influence de l'écoulement secondaire. La buse trèfle avec sa répartition spatiale et ses deux pics de  $Nu$  semble améliorer les transferts de chaleur locaux.

La méthode de mesure électrodifusionnelle nous a permis d'évaluer le transfert de masse global pour chacune des buses. Le nombre de Sherwood global nous permet de comparer les buses entre elles. D'après le  $Sh$  global et le  $Nu$  global, la buse trèfle est la plus performante par rapport à la buse de référence et la buse 8 lobes est la moins performante des trois (voir Tableau 1).

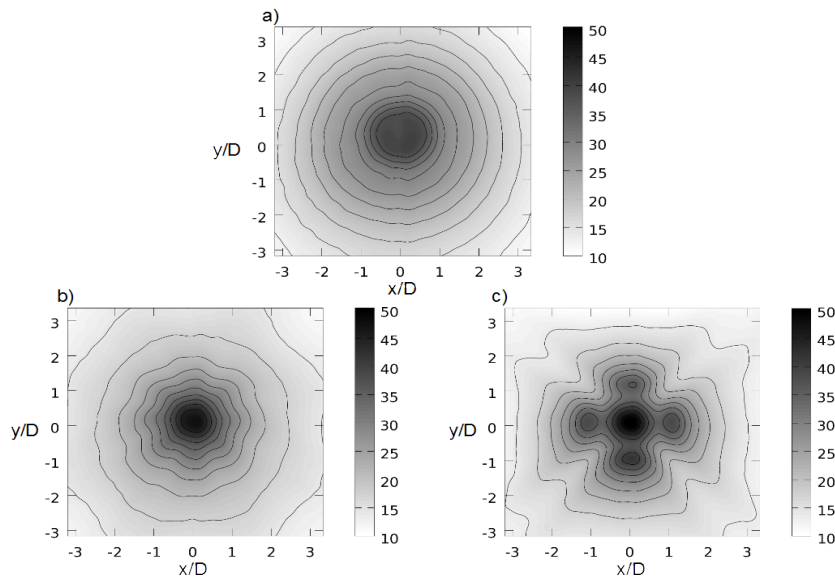


Figure 4 : Répartition spatiale de  $Nu$  pour les buses circulaire a), 8 lobes b) et trèfle c)

Afin de chercher un lien entre transferts de chaleur et transferts de masse, nous nous sommes intéressés au facteur  $J$  développé par Chilton et Colburn. A partir du Sherwood global et du Nusselt global, nous avons pu déterminer dans quelles mesures l'analogie peut s'appliquer à notre étude. L'équation (5) nous permet d'obtenir des valeurs du rapport entre  $Nu$  global et  $Sh$  global. Dans notre étude, nous avons pu déterminer que l'exposant lié au rapport entre  $Pr$  et  $Sc$  prend une valeur de 0.3. Ainsi, le pourcentage d'erreur entre la valeur expérimentale et la valeur théorique est de l'ordre de 9 % pour chacune des buses. Finalement, les buses lobées améliorent réellement les transferts de chaleurs. Les caractéristiques des deux buses mettent en évidence plusieurs aspects liés à ces améliorations. La buse à 8 lobes présente une répartition spatiale assez homogène mais sur une surface limitée. La buse trèfle se rapprocherait plus d'un multi-jet avec plusieurs maxima locaux. Elle possède aussi des nombres de Nusselt et Sherwood globaux assez importants pour une surface équivalente à celle de la buse de référence.

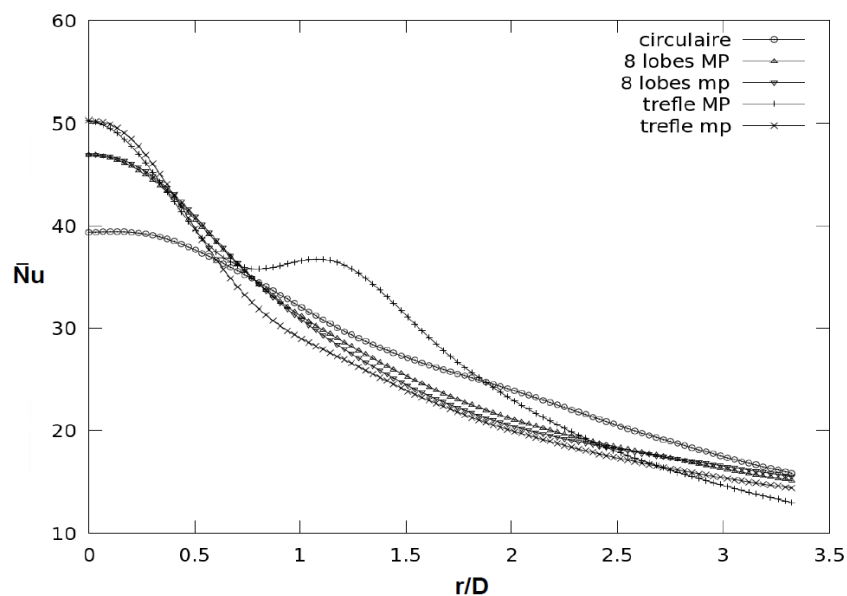


Figure 5 : Evolution radiale de nombre de Nusselt pour les buses circulaire, à 8 lobes et trèfle.



| Buse       | Sherwood global | Ecart relatif | Nusselt global | Ecart relatif |
|------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|
| Circulaire | 246             | -             | 27.236         | -             |
| Trèfle     | 272             | + 11 %        | 27.405         | +1 %          |
| 8 lobes    | 232             | - 6 %         | 26.726         | -2 %          |

Table 1 : Valeurs du Sherwood global, du Nusselt global et écarts relatifs

## 5. Conclusion

Les résultats expérimentaux de la présente étude ont montré différents aspects sur les transferts de masse et de chaleur par buses lobées. La répartition spatiale du nombre de Nusselt a mis en évidence l'homogénéisation de la buse 8 lobes et des maxima locaux pour la buse trèfle. La comparaison des Nusselt globaux et des Sherwood globaux a mis en lumière que la buse trèfle améliore les transferts de chaleur et que les résultats sur la buse 8 lobes restent discutables. L'analogie de Chilton et Colburn a montré que la relation entre Sherwood global et Nusselt global peut être vérifiée si on prend en compte certaines contraintes techniques. Finalement, les deux buses lobées considérées ont des caractéristiques géométriques très différentes, la raison pour laquelle leurs domaines d'application doivent tenir compte de leurs performances singulières.

## Références

- [1] Gardon, R. and Akfirat, J. C., "The role of turbulence on determining the heat transfer characteristics of impinging jets", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 8, pp. 1261-1272, (1965)
- [2] Martin, H., "Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces", *Advanced Heat Transfer*, 13, pp. 1-60, (1977).
- [3] Husain, H. S. and Hussain, A., "The elliptic whistler jet," *Journal of Fluid Mechanics* , 397, pp. 23-44, (1999).
- [4] Krothapalli, A. and Karamcheti, D. B. K., "On the mixing of a rectangular jet," *Journal of Fluid Mechanics* , 107, pp. 201-220, (1981).
- [5] Ho C. M. and Gutmark E., "Vortex induction and mass entrainment in a small aspect ratio elliptic jet", *Journal of Fluid Mechanics*, 179, pp. 383- 405, (1987)
- [6] Violato, D., Ianiro, A., Cardone, G., and Scarano, F., "Threedimensional vortex dynamics and convective heat transfer in circular and chevron impinging jets," *Heat and Fluid Flow* , 37, pp. 22-36, (2012).
- [7] Nastase, I. and Meslem, A., "Vortex dynamics and mass entrainment in turbulent lobed jets with and without lobe deflection angles," *Experiments in Fluids*, 48, pp. 693-714, (2010).
- [8] Kristiawan K., Meslem A., Nastase I. and Sobolik V., Wall shear rates and mass transfer in impinging jets: Comparison of circular convergent and cross-shaped orifice nozzles, *Int. J. Heat Mass Transfer* 55 (2012) 282-293.
- [9] Martin R. H. and Buchlin J. M., Jet impingement heat transfer from lobed nozzles, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 50, Issue 7, (2011) 1199-1206,
- [10] Yuan, Y. 2000 Jet fluid mixing control through manipulation of inviscid flow structures. Ph.D.Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [11] Carlomagno G. and Cardone G., "Infrared thermography for convective heat transfer measurements", *Experiments in fluids*, 49, pp.1187-1218, (2010)
- [12] Fénot, M., Etude du refroidissement par impact de jet. Application aux aubes de turbines, PhD thesis, Université de Poitiers, (2004)
- [13] Roux, S., Contribution expérimentale à l'aérothermique d'un jet en impact forcé acoustiquement, PhD thesis, Université de Poitiers, (2011).