

## Le Refroidissement par Jets Fluides: Bilan des Recherches et Applications Récentes

P. Marty

Equipe LEGI-GRETh, CEA-Grenoble, 17 Av. des Martyrs, 38054 Grenoble cedex 9, France

### 1. INTRODUCTION

Le refroidissement par jets est une solution privilégiée dans les applications industrielles lorsque l'on cherche à extraire, ou bien à apporter un flux de chaleur intense sur une surface. Dans le domaine de l'aéronautique par exemple, le refroidissement par jets est utilisé pour refroidir les aubes de turbines ou bien les chambres de combustion des moteurs de nouvelles générations. Ce type d'applications a mis en évidence la nécessité de recherches complémentaires sur le comportement d'un faisceau de jets et de leur interaction mutuelle. Dans le domaine de l'électronique, l'augmentation perpétuelle de la puissance dissipée par les composants modernes, ainsi que le souci permanent de compacité ont conduit au besoin de trouver des solutions efficaces au problème de l'extraction de chaleur en milieu confiné. Cette fonction est souvent assurée par des échangeurs compacts dont les parois sont refroidies par des jets impactants. Dans le cas des super-calculateurs, un jet de fluide diélectrique peut être utilisé en projection directe sur les éléments semi-conducteurs.

Les deux exemples ci-dessus concernent des industries de haute technologie, mais l'utilisation des jets se rencontre dans des secteurs beaucoup plus traditionnels tels que la fabrication du verre où un rideau d'air est utilisé pour refroidir la nappe de verre en fusion. Cette même technique se retrouve dans l'industrie papetière pour évaporer l'eau de la pâte à papier. Dans l'industrie métallurgique, des jets d'eau froide permettent le refroidissement de produits métalliques plats en acier. Une application très différente concerne l'utilisation de jets fluides en tant qu'isolant thermique dans des chambres froides : dans ce cas, le rideau d'air généré sert à limiter l'entrée d'air chaud externe lors des périodes d'ouverture de la chambre. Les accident survenus récemment dans de grands tunnels routiers tels que celui du Mont-Blanc reposent la question de la possibilité d'utiliser un rideau d'air comme barrière immatérielle destinée à cloisonner les différentes parties du tunnel en cas d'incendie et ainsi à limiter la propagation des fumées.

Ces exemples illustrent la grande variété d'applications et l'exposé qui sera présenté tentera de les illustrer. On s'attachera d'abord à rappeler les résultats classiques obtenus sur le comportement hydrodynamique et thermique des jets. Puis on présentera quelques exemples de travaux visant à améliorer la qualité des échanges de chaleur. On citera ensuite quelques exemples marquants de méthodes de mesures modernes développées dans le cadre de la recherche faite sur les jets. Enfin on donnera quelques exemples de modélisation numériques réalisées pour traiter ce type de problèmes.

### 2. RAPPEL DES RESULTATS ACQUIS DE LONGUE DATE

Les jets non confinés sont étudiés depuis fort longtemps de sorte que leurs principales caractéristiques peuvent être ainsi énoncées :

- sur une distance comprise entre 0 et 6-8 D, où D désigne la dimension caractéristique de l'injecteur, le jet est constitué d'un cœur dit potentiel caractérisé par une vitesse sur l'axe quasiment constante.
- de part et d'autre de ce cœur potentiel, des couches cisailées se développent sous l'effet d'instabilités de Kelvin-Helmholtz et génèrent de grosses structures cohérentes périodiques en espace qui sont advectées par l'écoulement moyen.
- au delà de l'extrémité du cœur potentiel, le jet devient alors pleinement turbulent (pour une valeur suffisante du nombre de Reynolds  $Re = \frac{U_0 D}{\nu}$ ) et l'épanouissement du jet devient alors linéaire.

Les travaux réalisés sur les jets au siècle dernier sont recensés dans des études bibliographiques, telles que celle de Martin (1977) ou de Webb et Ma (1995). Ces travaux proposent une classification des jets selon la nature du fluide environnant. On parle ainsi de *jet immergé* lorsque le fluide éjecté de la buse est identique à celui constituant l'atmosphère externe, tandis que l'on parle de *jet libre* lorsque le fluide éjecté est liquide et qu'il débouche dans une atmosphère gazeuse (Fig. 1). Dans ce dernier cas, les phénomènes de tension superficielle à l'interface liquide-gaz sont primordiaux dans la forme et la stabilité hydrodynamique du jet. Bien que les jets libres soient couramment employés, comme nous l'avons dit au paragraphe précédent, nous nous limiterons dans cet exposé aux jets submergés.

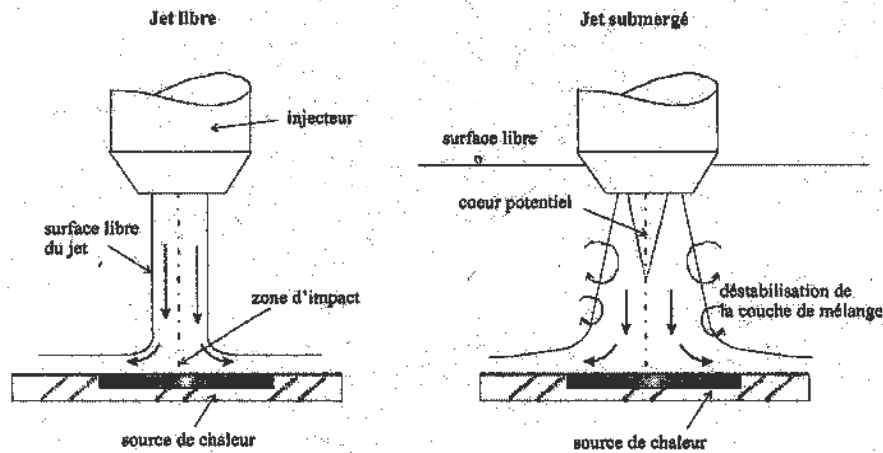


Fig. 1: Définition d'un jet libre (a) et d'un jet submergé (b)

La géométrie de l'injecteur est également de nature à séparer les jets en deux classes : pour un orifice circulaire, on parlera de jet rond, circulaire ou encore axisymétrique, tandis qu'un orifice rectangulaire donnera naissance à un jet dit plan ou encore bidimensionnel.

Dans le cas d'un jet rond impactant sur une paroi située à une distance  $H$  de l'injecteur, les transferts de chaleur à la paroi peuvent être exprimés par l'introduction du nombre de Nusselt  $Nu = \frac{\varphi}{\lambda \frac{T_p - T_{jet}}{D}}$  où  $\varphi$

désigne le flux pariétal et  $\lambda$  la conductivité thermique du fluide.  $T_p$  et  $T_{jet}$  désignent la température de paroi et celle du jet, respectivement. Ce type de mesure est couramment effectué sur une installation telle que celle de la figure 2 qui comporte (Vejrazka et al., 2001) :

- un injecteur par lequel le flux gazeux s'écoule après traversée d'un nid d'abeille,
- une paroi chauffée par un film métallique parcouru par un courant électrique,
- un système de mesure de température en paroi pouvant être des thermocouples, une mesure par caméra infrarouge ou encore une mesure par cristaux liquides déposés en peinture sur la plaque ou sous forme de microcapsules contenues dans une fine feuille de polyester.

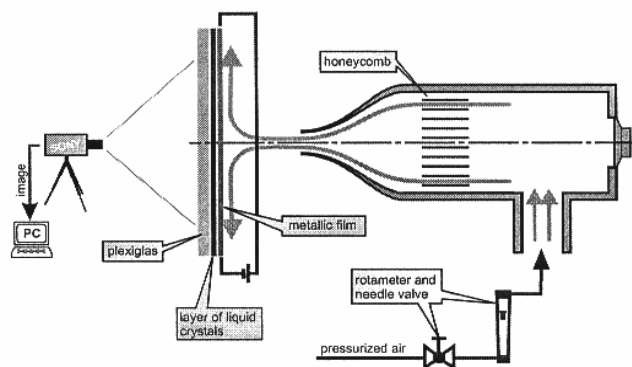


Fig. 2: Installation typique de mesure de transfert de chaleur entre un jet et une paroi (Vejrazka et al., 2001)

La distribution radiale du nombre de Nusselt est illustrée sur la figure 3. Alors que cette courbe est entièrement décroissante pour des rapports d'éloignement  $H/D > 6$  environ, on constate, pour des valeurs de  $H/D$  plus faibles (ici égale à 2) l'existence d'un premier maximum en  $r/D = 0.5$ , puis d'un maximum secondaire en  $r/D = 1.5$ . L'existence du premier maximum est due à l'impact des tourbillons de Kelvin-Helmholtz générés par le cisaillement en bord d'injecteur (Fig. 4). Cette hypothèse, qui a été formulée depuis longtemps, est bien visible sur les visualisations récentes de Lee et Lee (2000a) (Fig. 5) où l'on voit, en  $r/D = 0.5$ , l'existence d'un vortex issu du bord de l'injecteur et venant frapper la paroi et donc intensifier les échanges de chaleur. Plus loin, en  $r/D = 1.5$ , on note l'existence d'un second vortex issu de la destruction de la couche limite situé en amont entre  $r/D = 0$  et  $1.5$  : ce second vortex semble bien responsable du second maximum de transfert de chaleur que l'on note sur la figure 3.

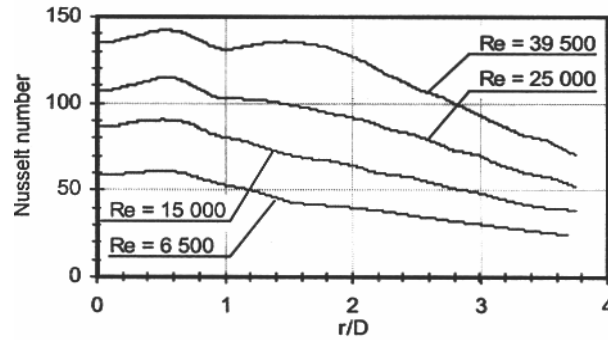


Fig. 3: Distribution radiale du nombre de Nusselt dans un jet rond immergé pour  $H/D = 2$  et divers nombres de  $Re$  (Vejrazka et al., 2001)

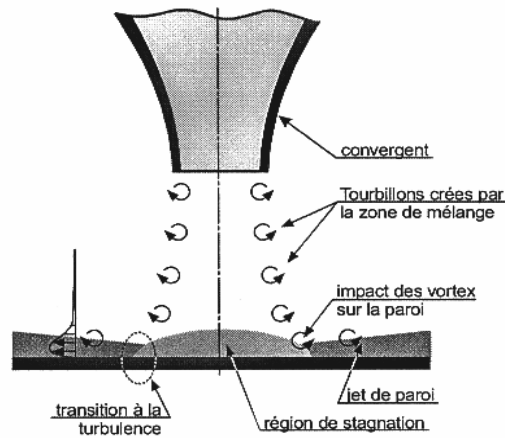


Fig. 4: Schéma de l'écoulement généré par un jet impactant

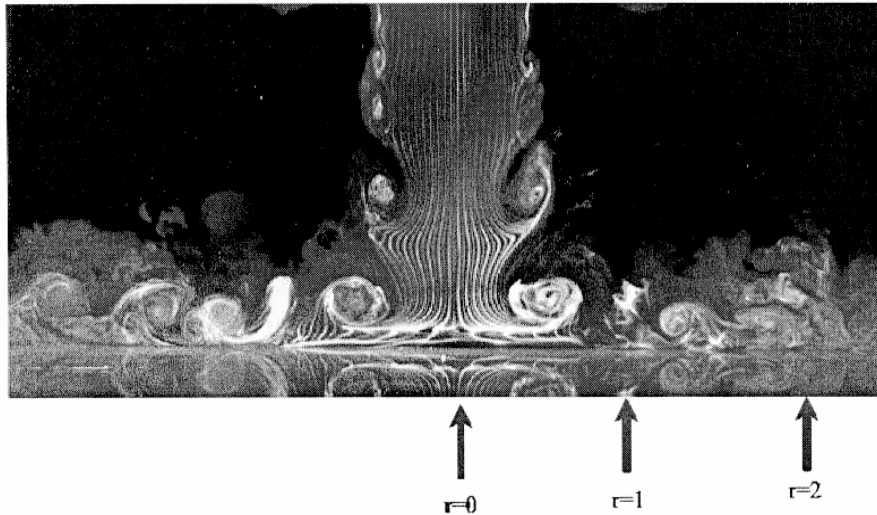


Fig. 5: Visualisation par fumée d'un jet rond impactant pour  $Re = 10000$  et  $H/D = 2$  (Extrait de Lee et Lee, 2000a)

L'effet de l'éloignement  $H/D$  est représenté sur la figure 6 extraite de Webb et Ma (1995) et établie pour un jet d'eau immergé. Pour un nombre de Reynolds donné, on constate un maximum d'échange thermique sur l'axe  $r = 0$  lorsque la plaque est située à l'extrémité du cœur potentiel, c'est-à-dire vers  $H/D = 6$ . Par ailleurs, une augmentation du nombre de Reynolds se traduit, de façon peu surprenante, par une augmentation du nombre de Nusselt.

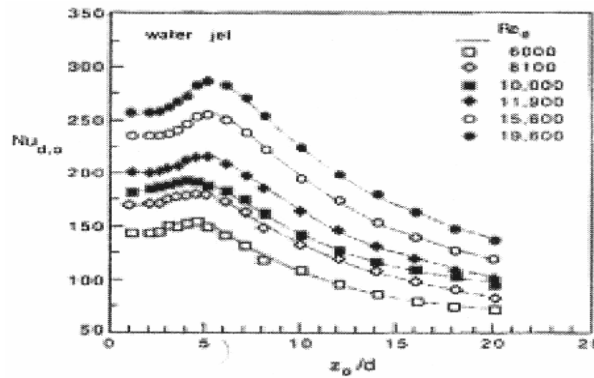


Fig. 6: Variation du nombre de Nusselt au point de stagnation en fonction de la distance plaque-injecteur d'après Webb et Ma (1995)

Du point de vue industriel, il est intéressant de disposer de corrélations globales. Celles-ci ne sont hélas disponibles que pour des fluides, ou des groupes de fluides donnés. On retiendra par exemple l'expression proposée par Martin (1977) pour un jet rond immergé :

$$\overline{Nu}_D = \frac{1 - 1.1 (D/r)}{1 + 0.1 [(H/D) - 6](D/r)} \left( \frac{D}{r} \right) F(Re_D) Pr^{0.42}$$

où  $Pr$  désigne le nombre de Prandtl du fluide et où la fonction  $F$  est telle que :

$$F(Re_D) = 2 Re_D^{0.5} \left( 1 + \frac{Re_D^{0.55}}{200} \right)^{0.5}$$

Dans cette expression,  $d$  représente le diamètre de la plaque impactée par le jet issu de la buse de diamètre  $D$  et située à la distance  $H$  de la plaque.  $\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{\lambda}$  représente l'échange thermique intégré entre 0 et  $r$ , c'est-à-dire la valeur moyenne de la surface située sous la courbe  $Nu(r)$  de la figure 3. Cette formule est valable pour  $2000 < Re < 400000$ ,  $2 < H/D < 12$  et  $2.5 < r/D < 7.5$ .

### 3. LES VOIES D'INTENSIFICATION DES ECHANGES PAR JETS

Les recherches actuelles visent à améliorer les résultats présentés au paragraphe précédent. Nous allons ainsi donner quelques exemples de travaux en cours.

- Influence de la géométrie de l'injecteur

La génération de vortacité à la sortie de l'injecteur est un élément essentiel d'intensification des échanges de chaleur. Récemment, Lee et Lee (2000b) ont comparé les performances des 3 types d'orifices représentés sur la figure 7. Leurs résultats montrent qu'un orifice à bords tranchants provoque une légère amélioration des échanges du fait d'une meilleure tendance à générer de la vortacité dès la naissance du jet. Dans une autre étude (Lee et Lee, 2000a) ces auteurs ont étudié les performances d'un injecteur de forme elliptique, toujours avec l'objectif de favoriser la déstabilisation du fluide au plus tôt. Pour des distances de plaque  $H/D < 4$ , ils ont ainsi mis en évidence l'augmentation des transferts sur l'axe lorsque, à  $Re$  donné, la déformation de l'ellipse augmente. Des travaux récents réalisés à l'Ecole Centrale de Lyon par Barthet (2000) dans le cadre de l'amélioration de l'efficacité des jets d'air destinés au refroidissement des turbines de moteurs d'avion ont étudié numériquement et expérimentalement l'efficacité d'une injection issu d'un orifice évasé. Là encore, des performances accrues semblent se dessiner, confirmant le fait que l'injection classique de type cylindrique est à éviter en vue d'un refroidissement optimum.

- Influence du nombre de Mach

Toujours dans le cadre des études liées au refroidissement des aubes de turbine, Brevet et al. (2001) montrent que le nombre de Mach de l'écoulement influe sur les échanges, dès lors qu'il devient supérieur à 0.3. La figure 8, issue des actes de la Journée organisée par la Société Française de Thermique (Marty, 2001), montre l'influence de ce paramètre pour  $H/D = 10$  et divers nombres de Reynolds. Pour  $Ma = 0.69$ , les échanges intégrés entre  $r = 0$  et  $r = 5D$  sont quasiment doublés par rapport à la valeur obtenue avec un écoulement totalement subsonique.

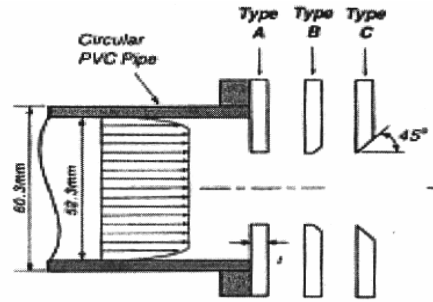


Fig. 7: Différents types d'orifices testés par Lee et Lee (2000b)

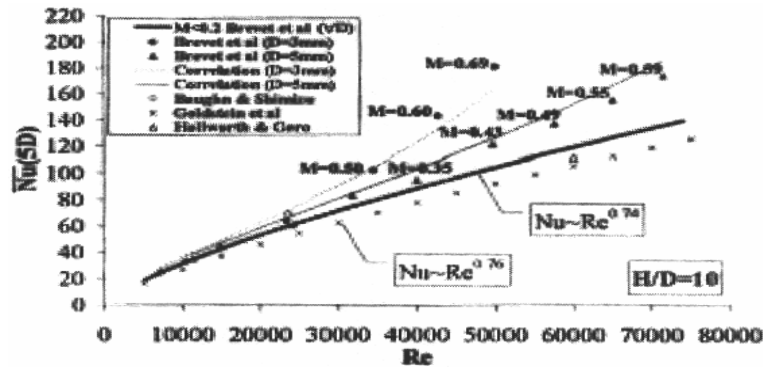


Fig. 8: Influence du nombre de Mach sur le refroidissement d'un jet impactant (d'après Brevet et al., 2001)

- Influence de la rugosité

Beitelmal et al. (2000) ont étudié l'effet de protubérances disposées sur la plaque d'impact du jet. Vingt obstacles de 0.5 mm ont été ainsi placés circulairement sur un rayon égal à 1.5D. Pour des distances buse-plaque allant de 1 à 10 et des nombres de Reynolds entre 9600 et 38500, ces auteurs montrent une augmentation des échanges de l'ordre de 6 %. Même modeste, ces résultats illustrent l'influence du déclenchement de la turbulence sur la qualité des échanges thermiques.

- Influence d'excitations acoustiques

A l'Université de Marseille, des recherches sont actuellement en cours afin d'étudier la réponse d'un jet à une sollicitation acoustique. Des modélisations numériques sont effectuées ainsi que des visualisations par tomographie laser (Fig. 9 issue de Marzouk et al., 2001).

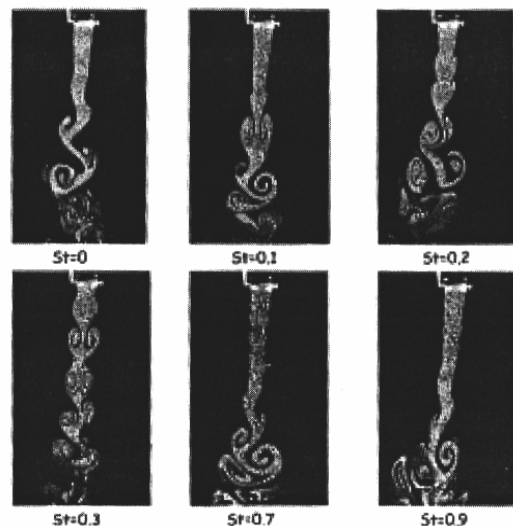


Fig. 9: Tomographie laser d'un jet plan (fente d'épaisseur e) à  $Re = 500$  pour différentes valeurs de la fréquence d'excitation acoustique (d'après Marzouk et al., 2001 :  $St = f \cdot e/U_0$  désigne le nombre de Strouhal de l'excitation)

#### 4. EVOLUTION DES METHODES EXPERIMENTALES ASSOCIEES A L'ETUDE DES JETS

Les mesures de vitesse dans les jets sont classiquement réalisées par fil chaud ou par PIV (Particle Image Velocimetry). La première méthode donne de bons résultats lorsque l'écoulement est propre et que les niveaux de température reste raisonnable. La seconde méthode permet une visualisation plus globale de l'écoulement. On lui préfère parfois la visualisation par tranche laser (ou lumineuse) telle que celles montrées sur les Figures 10a et 10b pour un jet plan issu d'un orifice rectangulaire de dimension  $e$  : ces visualisations montrent bien l'apparition d'instabilités lorsque  $Re$  devient supérieur à un seuil critique (d'après Varieras et al., 2001).

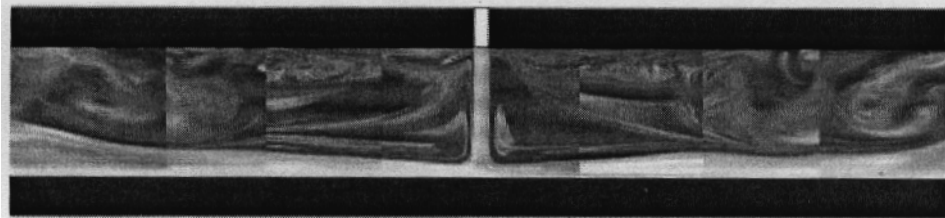


Fig. 10a: Visualisation de l'écoulement pour  $H/e = 8$  et  $Re_j = 150$  ( $Re_j < Re_{jcr}$ )

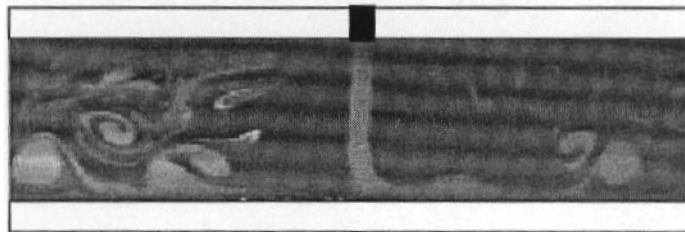


Fig. 10b: Visualisation de l'écoulement pour  $H/e = 8$  et  $Re_j = 220$  ( $Re_j > Re_{jcr}$ ).

L'évolution de la technologie des cristaux liquides a également permis de grands progrès dans la mesure de température, surtout en paroi. Cette technique se substitue bien aux mesures par thermocouples. Elle permet une visualisation globale du champ de température et, comme on le voit sur la figure 11, permet dans certains cas la mise en évidence expérimentale d'instabilités hydrodynamiques que des mesures ponctuelles auraient difficilement détecté.

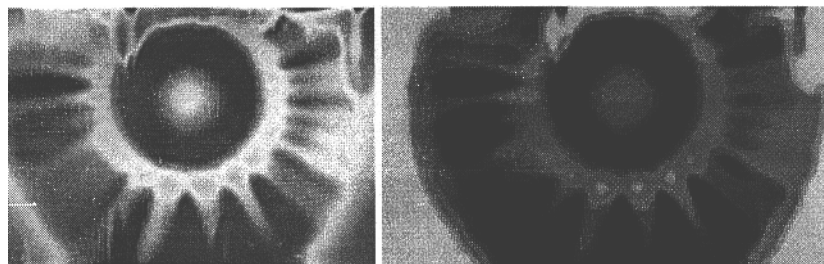


Fig. 11: Allure des isothermes pour  $Re = 35000$  et  $H/D = 1$   
a) avant traitement, b) après traitement (d'après Vejrazka et al., 2001)

#### 5. LA MODELISATION NUMERIQUE DES JETS ET DES TRANSFERTS DE CHALEUR ASSOCIES

Des travaux de Simulation Numérique Directe (DNS) et de modélisation numérique par la méthode  $k$ - $\epsilon$  sont réalisés avec succès dans diverses universités (voir par exemple les travaux de Marzouk et al. 2001 à Marseille ou encore ceux de Habli et al. 2001 à Monastir, Tunisie). Ces calculs rendent compte de façon satisfaisante des propriétés "moyennes" de l'écoulement mais l'instationnarité tourbillonnaire ne peut évidemment pas être prise en compte. C'est cette lacune que tentent de résoudre les codes de Simulation des Grandes Echelles (LES en anglais), mais la puissance de calcul nécessaire est encore grande. La figure 12, issue des travaux de Bigot (2001), illustre la distribution du champ de vitesse à la sortie d'un jet rond : ce graphe montre bien l'existence des tourbillons de Kelvin-Helmholtz en sortie de buse venant impacter en  $r/D = 0.5$

ainsi que la présence d'une structure tourbillonnaire en  $r/D = 2$  probablement responsable de l'intensification des échanges notée sur la figure 3.

Des études similaires sont effectuées à l'Ecole des Mines de Nantes dans le cas d'un jet plan (Beaubert, 2001). La figure 13 illustre leurs résultats et montre l'instabilité du jet dans le plan principal pouvant correspondre à une instabilité de type Goertler similaire à celle observée sur la figure 11.

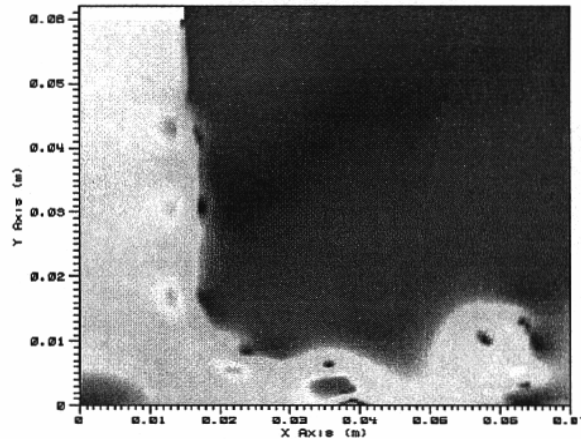


Fig. 6: Modélisation numérique axisymétrique par LES d'un jet impactant rond : distribution instantanée des iso-vitesses dans le plan r-z pour  $Re = 15000$  et  $H/D = 2$  (d'après Bigot, 2001). Le diamètre de l'injecteur vaut ici  $D = 30$  mm.

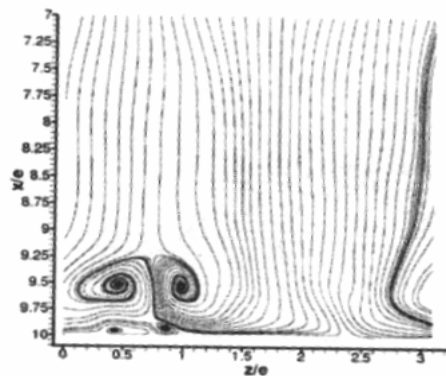


Fig. 13: Résultats de Simulation des Grandes Echelles d'un jet plan  $Re = 3000$  et  $H/e = 10$  (Beaubert et al., 2001)

## 6. CONCLUSION

Les connaissances de base sur le refroidissement par jets en simple phase et en géométrie classique sont actuellement très satisfaisantes d'un point de vue industriel. Des recherches complémentaires gardent toutefois un grand intérêt notamment en vue de nouvelles méthodes numériques. Les techniques d'intensification des échanges doivent être renforcées par des recherches sur la géométrie des injecteurs ou encore sur une déstabilisation ou excitation acoustique de l'écoulement. Les recherches sur l'ébullition dans les transferts par jets sont toutefois moins avancées et méritent un surcroît de travail en vue d'applications industrielles telles que le séchage ou le refroidissement de métaux en fusion. Des méthodes numériques performantes doivent continuer d'être étudiées afin de rendre compte du détail, souvent complexe, des écoulements turbulents présents dans les jets libres ou impactants.

## REFERENCES

- Barthet S., 'Etude Expérimentale et Numérique des Phénomènes de Refroidissement par Jets Issus d'Orifice Evasés', Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, Novembre 2000.
- Beaubert F. et Viazzo S., 'Etude d'un Jet Plan Turbulent en Impact Proche par Simulation des Grandes Echelles', Société Française de Thermique, Paris, Mars 14, 2001.
- Beitelmal A., Saad M. and Patel D., 'Effects of Surface Roughness on the Average Heat Transfer of an Impinging Air Jet', Int. Comm. Heat Mass Transf., Vol.27, n.1, pp. 1-12, 2000.

- Bigot J., '*Simulation des Grandes Echelles d'un Jet Impactant*', Rapport de DEA, Institut National Polytechnique de Grenoble, Sept. 2001.
- Brevet P., Dorignac E. et Vuillierme J.J., '*Refroidissement par Impact de Jets : Application aux Aubes de Turbines de Turboréacteurs*', Journée Thématique de la Société Française de Thermique, Paris, 14 Mars 2001.
- Habli S., Mhiri H., El Golli S., Le Palec G. et Bournot P., '*Simulation Numérique d'un Ecoulement de Type Jet Plan Turbulent à Masse Volumique Variable par Deux Modèles de Turbulence au Premier Ordre*', Congrès Français de la Société Française de Thermique, Nantes, Mai 2001.
- Lee J. and Lee S-J., '*The Effect of Nozzle Aspect Ratio on Stagnation Region Heat Transfer Characteristics of Elliptic Impinging Jet*', Int. J. Heat and Mass Transf., 43, pp. 555-575, 2000a.
- Lee J. and Lee S-J., '*The Effect of Nozzle Configuration on Stagnation Region Heat Transfer Enhancement of Axisymmetric Jet Impingement*', Int. J. Heat and Mass Transf., Vol. 43, pp. 3497-3509, 2000b.
- Martin H., '*Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces*', Advances in Heat Transfer, Vol. 13, pp. 1-60, 1977.
- Marty P., '*Transferts de Chaleur et de Masse dans les Jets*', Journée Thématique de la Société Française de Thermique, Paris, 14 Mars 2001.
- Marzouk S., Mhiri H., Caminat P., Le Palec G. et Bournot P., '*Etude Expérimentale et Modélisation Numérique des Jets Libres Pulsés*', Journée Thématique de la Société Française de Thermique, Paris, 14 Mars 2001.
- Varietas D. et Gervais P., '*Transfert de Chaleur Généré par un Jet Plan Confiné : Détermination Expérimentale*', Congrès Français de la Société Française de Thermique, Nantes, Mai 2001.
- Vejraska J., Marty P. and Sobolik V., '*Heat Transfer Experiments in a Submerged Impinging Round Jet Using Liquid Crystal Thermometry*', 5<sup>th</sup> World Conf. On Exp. Heat Transf., Fluid Mech. and Thermodynamics, Thessalonique, Grèce, Sept. 2001.
- Webb B.W. and Ma C.F., '*Single-Phase Liquid Jet Impingement Heat Transfer*', Advances in Heat Transfer, Vol. 26, pp. 105-217, 1995.