

Marseille (France), 28-30 octobre 2015



ÉTUDE NUMÉRIQUE D'UN JET COAXIAL IMPACTANT UNE PLAQUE CHAUFFÉE ET L'EFFET DE LA DISTANCE DE SÉPARATION JET-PLAQUE SUR L'ÉCHANGE THERMIQUE

Chiraz BOUGHANMI, Hatem MHIRI, Philippe BOURNOT

¹ UTTPI, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Route de Ouardanine, 5000 Monastir, Tunisie ² IUSTI, Technopôle de Château-Gombert, 5 rue Enrico Fermi, 13 013 Marseille, France

E-mail: chiraz.boughanmi@gmail.com

Résumé: Dans ce travail, nous présentons une modélisation numérique par la technique CFD du comportement d'un jet coaxial impactant une plaque chauffée verticale, à l'aide du code de calcul "Fluent" en utilisant le modèle de turbulence RSM avec les hypothèses considérées.

Le modèle numérique mis en place nous a permis de décrire convenablement les champs dynamique et thermique de l'écoulement puisque une bonne concordance avec les résultats expérimentaux de N.Celik et Eren [1] a été obtenue.

Les résultats obtenus lors des simulations nous ont permis de calculer les coefficients d'échange thermique Nu local, Nu moyen, et Nu de stagnation, relatifs à un nombre de Reynolds de 5000 aux différentes positions de la plaque chauffée. Le calcul de ces différents paramètres a révélé qu'en éloignant la plaque des buses de jet la vitesse de jet arrivant à la plaque est plus faible. L'effet de la pesanteur et des forces de flottabilité sur le transfert de chaleur de la plaque chauffée verticale provoque une zone de recirculation qui n'est visible que dans la partie inférieure du jet horizontal entraînant une diminution du transfert de chaleur et par conséquent une diminution des nombres de Nusselt.

A l'issu de cette étude, nous avons pu construire une base de connaissances pour l'évaluation des paramètres de l'échange thermique d'un jet coaxial impactant une plaque chauffée.

Mots clés: jet coaxial, impactant, plaque chauffée, Nu, CFD

1. Introduction

Les écoulements de type jet interviennent dans beaucoup d'applications industrielles : L'optimisation du refroidissement des aubes des turbines aéronautiques ou des composants électroniques, pour un transfert de chaleur intensif. Le traitement de surface, le découpage, le perçage et le soudage des matériaux métalliques pour une couverture gazeuse par le biais d'une buse. Pour cela, on a suscité ces dernières décennies un intérêt considérable qui s'est traduit par la production d'une bibliographie abondante.

La compréhension des phénomènes physiques de ces types d'écoulement avec ou sans chauffage constitue en soit un objectif, ceux-ci font intervenir des phénomènes complexes de la mécanique des fluides et de la thermique.

Des études étaient réalisées des jets libres et l'effet des différentes formes et tailles de buse (plates, circulaires, coaxiales...) sur les propriétés dynamiques du jet. Ainsi que des études sur le transfert de chaleur et de la masse des jets impactant.

Bien que les effets de la forme de la buse sur le transfert de chaleur et de masse aient été étudiés par de nombreux chercheurs, les effets de la forme coaxiale sont toujours restés un sujet brut, et beaucoup de recherches sur ce sujet sont nécessaires. Parmi quelques uns des rares travaux qui abordaient ce sujet, nous citons celui

réalisé par Celik et Eren [1] où était réalisée une étude expérimentale sur le flux de chaleur d'un jet coaxial impactant.

Nous détaillons ci-après ces deux types d'écoulement comme dans la littérature que nous les assemblons dans la suite de notre travail.

• Les écoulements de type jet coaxial libre:

L'écoulement du jet est caractérisé par la présence de deux couches de mélange ; couche externe adjacente à l'air extérieur stationnaire et couche interne se trouve entre le jet central et le jet annulaire. Le mécanisme des mélanges des deux écoulements adjacents commence dans la région initiale mais il n'aura lieu que dans la région intermédiaire. La structure du jet coaxial est représentée dans la figure 1.

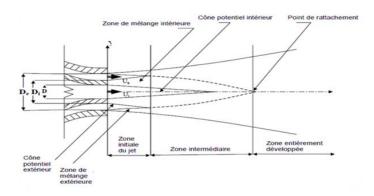


Figure 1 Les différentes régions d'un jet coaxial

Les premiers à étudier mécaniquement les jets coaxiaux libres sont Forstall et Shapiro [2]. Ils ont démontré que le ratio $\lambda = \text{Ui/Uo}$ est la plus importante variable pour déterminer la configuration de flux et les profils de vitesse.

Durao et Whitelaw[3] ont focalisé leurs expériences sur le développement de l'interaction des jets dans la région en aval de l'origine de jet et en résultat ils ont montré que le jet coaxial tend à atteindre l'état de « auto-préservation » beaucoup plus rapidement qu'un seul jet asymétrique.

Kriaa et al [4] ont préparé un travail numérique pour montrer les profils de vitesse axial d'un non-isotherme coaxial jet pour un d/D = 0.35 (ratio de diamètre).

L'étude expérimentale présentée par KO et Au [5] a traité expérimentalement l'écoulement coaxial libre ce qui a permis de constater qu'un écoulement de jet émis par deux buses coaxiales éjectant de l'air dans de l'air, est isolé dans trois régions séparées: la région initiale, intermédiaire, et la région entièrement développée où la répartition des différents paramètres satisfait à des lois d'affinité.

• Jet simple impactant :

Un jet simple impactant est un jet de fluide issue de la buse qui heurte une plaque installée perpendiculairement à l'écoulement. Les chercheurs ont identifié trois régions distinctes caractérisant ce type d'écoulement :

La région de la couche cisaillée du jet libre, les deux autres sont localisées au voisinage de la plaque : la région d'impact et la région du jet pariétal comme le montre la figure 2.

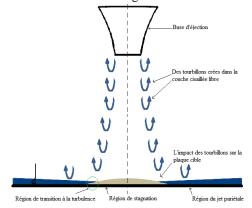


Figure 2 Jet impactant

♦ La couche cisaillée du jet :

Un fluide sortant d'une buse plane ou axisymétrique, injecté dans un milieu ambiant au repos, réalise une couche cisaillée libre ou on trouve que la vitesse moyenne du jet est entrain de diminuer à partir de la sortie de la buse d'éjection. Cette région de couche cisaillée est instable et génère la formation périodique des tourbillons, qui lorsqu'ils perdent de leur régularité, ils sont portés par l'écoulement vers la plaque cible. Ainsi, quelques interactions peuvent avoir lieu entre eux. Des structures cohérentes proviennent de ce mécanisme d'impact sur la plaque, et influent considérablement sur le mécanisme de transfert dans la région de l'écoulement au voisinage de la surface.

♦ Région de l'écoulement proche de la plaque cible :

Du point de vue transfert de chaleur et de masse, cette région est importante. En fait, en s'approchant de la paroi, le développement du jet devient perturbé et l'importance de gradient de pression et des forces des fluctuations de la composante de la vitesse perpendiculaire à la plaque identifient l'écoulement dans une région de stagnation (Figure 2).

La couche limite développée dans la région de stagnation possède un caractère laminaire au début, et par la suite, il tend vers la turbulence. La plupart des coefficients de transfert de chaleur et de la masse local sont généralement observés à la fin de la région de la stagnation où l'interaction d'écoulement dévié avec les tourbillons produit une diminution de l'épaisseur de la couche limite. Dans cette zone, la vitesse axiale doit s'annuler à la paroi.

De diverses études sur les jets simples impactant ont été menées; Nous pouvons citer Colucci et Viskanta [6] qui ont étudié l'effet de géométrie de la buse sur la chaleur convective locale transférée à un jet d'air confiné impactant. Narayanan et Yagoobi [7] ont déterminé les caractéristiques de transfert de chaleur d'un jet à buse plate. Garimella et Nenaydyk [8] ont examiné l'effet de la géométrie de buse sur le transfert de chaleur du liquide d'un jet impactant.

2. Etude numérique d'un écoulement de type jet coaxial impactant

2.1 Configuration géométrique :

On présente sur la figure 3 le schéma du modèle physique utilisé dans l'expérience de N.Celik et Eren [1]. L'air fourni par le compresseur d'air est déshumidifié, filtré, et réglé avant d'entrée au tube de jet. Le compresseur possède une chambre de tranquillisation de 500 l. Il y a 2 débitmètres pour mesurer le débit volumétrique de l'air. Le jet coaxial est généré par deux tubes coaxiaux comme on peut le voir sur la figure 4. Le flux de l'air venant du compresseur entre par le tube extérieur des deux tubes après une longueur précise dans le tube, le flux rencontre le tube intérieur. En ce point, le flux se devise parallèlement dans les deux tubes jusqu'aux sorties des buses où ces deux écoulements parallèles deviennent deux jets.

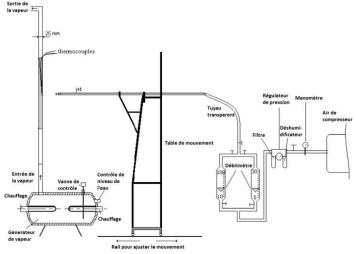


Figure 3 Schéma du modèle physique

Nous considérons un jet issu de deux buses circulaires coaxiales de diamètre respectivement D et d et de longueur respectivement L et l (Figure 4). Les deux cylindres sont de dimensions très petites vis-à-vis du milieu

ambiant dans le quel débouche l'écoulement. Le fluide éjecté et le milieu ambiant sont de même nature et à la température ambiante (T=27°C), les forces présentes dans ce cas sont celles de frottement et d'inertie. Les équations sont écrites dans un système de coordonnées cartésiennes.

La plaque chauffée (température constante T=96°C) verticale est placée à une distance H qui va être impactée par le jet d'air coaxial. Donc, le système devient anisotherme.

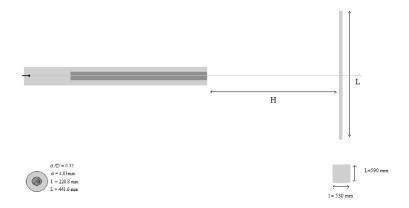


Figure 4 Configuration des buses de jet impactant la plaque chauffée.

2.2 Maillage

Le logiciel « GAMBIT ».

La figure (5) montre une vue globale du maillage des buses. En respectant la relation de y+ auprès des parois de la plaque et du milieu extérieur. Une vue détaillée du maillage au niveau des buses est donnée par la figure (6) de la plaque et (7) des tubes. L'adoption de ce type de maillage est due au non uniformité de la géométrie.

Le maillage du domaine d'étude est constitué de 1428308 volumes de contrôles pour la configuration avec la position x1 de la plaque, et 1837516 pour la position x4. Nous avons considéré dans la direction y un pas de calcul, $\Delta y = \Delta z = 10^{-2}$ m, dans la zone du milieu entre la sortie des buses et la plaque. Dans la même zone Selon la direction x, le pas de calcul pris est de $\Delta x = 2.76 \cdot 10^{-3}$ m et 4.33 $\cdot 10^{-4}$ m à la sortie des buses sur la section de la plus grande.



Figure 5 Vue globale du maillage des buses, de la plaque et du milieu extérieur.



Figure 7 Vue détaillée du maillage au niveau des buses

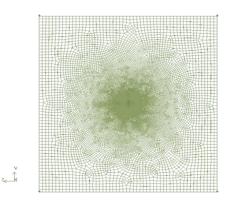


Figure 6 Vue du maillage de la plaque impactée.



Figure 8 Vue détaillée du maillage au niveau de l'entrée de la grande buse

2.3 Formulation mathématique

Les équations régissant l'écoulement d'un jet coaxial impactant sont les équations de conservation (masse, quantités de mouvement, énergie).

Afin de résoudre ces différentes équations, nous tenons compte des hypothèses suivantes :

- ✓ Le fluide (air) est newtonien incompressible.
- ✓ Le jet émis horizontalement est axisymétrique.
- ✓ Le fluide est supposé incompressible à propriétés physiques constantes (considérées à la température moyenne) sauf la masse volumique qui est variable.
- Moyenne) saur la masse votamque qui est variante.

 ✓ Le régime d'écoulement est supposé turbulent et stationnaire en moyenne.

 ✓ Les approximations de Boussinesq sont adoptées.

Compte tenu de la décomposition de Reynolds (U= Ū+u') qui permet de distinguer l'écoulement moyen de l'écoulement fluctuant, les équations générales de conservation s'écrivent comme suit :

L'équation de conservation de la masse

$$\frac{\partial(\overline{u}_i)}{x_i} = 0 \tag{1}$$

L'équation de conservation de la quantité de mouvement

$$\overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_l}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \overline{u_l}}{\partial x_j} - \overline{u_l' u_j'} \right) + \overline{f_l}$$
(2)

Le terme $\overline{u_i'u_j'}$ est appellé tensions de Reynolds.

Le terme $\overline{f_i}$ représente les forces de flottabilité exprimés par $\overline{f_i} = \rho g_i$

Le terme $\rho~$ vérifie la relation de Boussinesq $(\rho\text{-}\rho_0)\approx\rho_0~\beta~(T\text{-}T_0)$

L'équation de conservation de l'énergie

$$\overline{u_{J}} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_{j}} = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(\alpha \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_{J}} - \overline{u'_{J}} \overline{T'} \right) + \frac{u_{j}}{\rho c p} \frac{\partial p}{\partial x_{j}}$$
(3)

Le terme $\alpha = \frac{\lambda}{\alpha Cn}$ représente la diffusivité thermique du fluide (m².s⁻¹)

Ce système d'équations moyennées fait apparaître des inconnues supplémentaires, on a donc recours à des modèles de turbulence pour assurer sa fermeture. Le modèle de turbulence utilisé dans ce travail est le modèle RSM.

Pour un écoulement impactant une plaque chauffée, l'équation du tenseur des contraintes de Reynolds s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{\partial (\overline{R_{ij}})}{\partial t} + C_{ij} = P_{ij} + (D_{T,ij} + D_{L,ij}) - \varepsilon_{ij} + \varphi_{ij}$$
(4)

Avec:

- $R_{ij} = -\rho \overline{U'_{\iota}U'_{J}}$: Le tenseur de Reynolds $C_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_{k}} (\rho \overline{U_{J}U'_{\iota}U'_{J}})$: Terme de convection $D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_{k}} (\rho \overline{U'_{\iota}U'_{J}U'_{k}} + \rho (\overline{U'_{\iota}\delta_{\iota J} + U'_{J}\delta_{\iota k}})$: Terme de diffusion turbulente $D_{L,ij} = \mu \frac{\partial}{\partial x_{k}} (\overline{U'_{\iota}U'_{J}})$: Terme de diffusion laminaire
- $P_{ij} = -\rho \overline{(U'_{i}U'_{j}\frac{\partial u'_{j}}{\partial x_{h}} + \overline{U'_{i}U'_{k}}\frac{\partial U'_{i}}{\partial x_{h}})$: Terme de production

- $\varepsilon_{ij} = 2\mu \frac{\overline{\partial U_i}}{\partial x_k} \frac{\partial U_j'}{\partial x_k}$: Terme de dissipation
- $\varphi_{ij} = \overline{\rho \frac{\partial U_l}{\partial x_k} + \frac{\partial U_J}{\partial x_k}}$ Terme de corrélation pression-déformation

Le modèle de turbulence RSM utilisé dans notre travail est combiné avec l'approche de traitement paroi renforcée ou « Enhanced wall treatement » qui est une méthode de modélisation proche de la paroi qui combine le modèle à deux couches avec des fonctions de parois renforcées (Fluent 2006).

2.4. Conditions aux limites

Les conditions aux limites présentées ci-dessous dans le tableau sont précisément pour la position de la plaque H/D=4.

| Les limites | Туре | Les conditions aux limites |
|--|-----------------|---|
| l'entrée de la buse | Velocity inlet | U= 5.29251 m/s |
| Sorties (4 cotés) : En face des buses (la plaque) | Wall | T=96°C; épaisseur =0.0005 m |
| Sortie au dessous et au dessus des buses | | P=Patm=1 atm ; D _h =0.099986 m ; I _t =0.05% |
| Sortie cotés verticaux | Pressure outlet | P=Patm=1 atm; D _h =0.1009547m; I _t =0.05% |
| Sortie plan de la sortie des buses | | P=Patm=1 atm; D _h =0.55839m; I _t =0.05% |
| Parois des buses | Wall | |

Internal

Tableau 1 Les différents conditions initiales et aux limites utilisées pour la simulation

3. Résultats et Interprétations

Sortie des buses

Nous présentons dans cette partie les solutions numériques obtenues pour un écoulement de type jet coaxial en régime turbulent impactant une surface plane (plaque) chauffée à une température fixe. Le problème est stationnaire, tridimensionnel et axisymétrique. Les résultats obtenus sont comparés à ceux proposés par N.Celik et Eren [1] qui ont traité ce jet expérimentalement. La validation du modèle est effectuée par comparaison des profils des caractéristiques dynamiques les nombres de Nusselt de stagnation, moyens, et locaux.

3.1. Test de maillage :

Comme première étape, nous devons valider notre maillage à utiliser et cela par l'étude de l'effet de changement du maillage sur les résultats. Pour cela, on considère 3 maillages non structurés différents constitués respectivement de 1759998 volumes de contrôles, 1511820 volumes de contrôles, 1014370 volumes de contrôles.

Sur la figure 4, on présente les profiles de rapport de la vitesse du jet en $(0 \le y/d \le 7)$ sur la vitesse du centre de la sortie du jet obtenus avec ces trois maillages à tester en comparant avec les résultats expérimentaux trouvés par Celik et Eren [1] pour un jet coaxial libre avec la même configuration de cette figure 3 mais sans la plaque.

La figure 9 montre en comparant avec les mesures expérimentales que les profils des rapports vitesses de maillage 2 et maillage 3 sont similaires et la différence entre les résultats ne dépassent pas les 4%. Par contre, le profil de rapport des vitesses avec le maillage 1 donne des résultats différents qui sont en mauvaises concordances avec ceux expérimentaux. Donc par faute de temps pour le traitement, le maillage sélectionné est celui numéro 2.

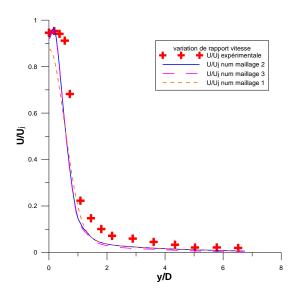


Figure 9 Sensibilité de maillage des variations des rapports de vitesses en x/D=4

3.2 Champs de température

Nous allons commencer par présenter la distribution de la température sur la plaque, ainsi que sur l'air au voisinage de la plaque et comparer entre les deux cas où nous déplaçons la plaque axialement (0,X) de H/D=4 à H/D=12 en tenant compte que D=13.8 mm sur les figures 10 et 11.

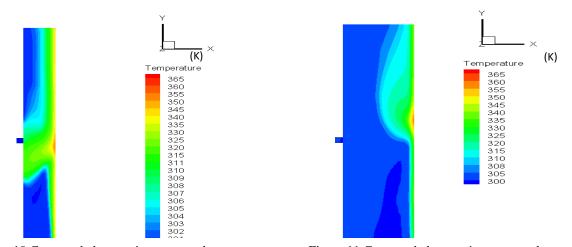


Figure 10 Contour de la température entre la plaque verticale chauffée et la sortie des buses pour H/D= 4 et sur le plan (Z=0)

Figure 11 Contour de la température entre la plaque verticale chauffée et la sortie des buses pour H/D= 12 et sur le plan (Z=0)

La température constante qui chauffe la plaque posée verticalement et perpendiculairement au jet impactant joue un rôle principal dans le changement de la température de l'air ambiant ainsi, celle du jet. Tout en modifiant la distance entre les buses et la plaque, cette influence change. Lorsque la plaque été posée plus proche de la buse, il y a eu un grand changement de la température de l'air existant entre les buses et la plaque. Par contre, lorsque la plaque est placée loin ce changement de température de l'air était focalisé dans la zone proche de cette plaque.

3.3 Champs de vitesse

3.3.1 Distribution de la vitesse pour H/D=4

Nous représentons dans la figure 12 la distribution générale de la vitesse au niveau de la position H/D=4 correspondant à une distance axiale H de 55.2 mm entre la sortie des buses et la plaque verticale. Cette figure permet de discerner les différentes régions qui définissent le jet impactant au niveau de la plaque (région du jet pariétal et région d'impact) présentées en détails dans la section 1.2.

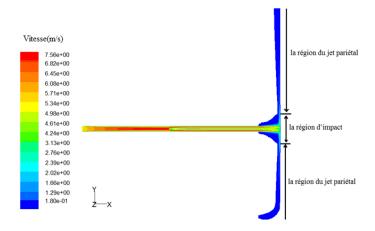


Figure. 12 Contour de la vitesse moyenne dans tout le domaine pour H/D= 4 sur le plan (z=0)

La couche cisaillée du jet libre est présentée dans la figure 13 où nous pouvons remarquer que l'air sortant des buses, injecté dans le milieu ambiant au repos, réalise une couche cisaillée libre où on trouve la vitesse moyenne du jet entrain de diminuer à partir de la sortie de la buse d'éjection jusqu'à la région d'impact de la plaque.

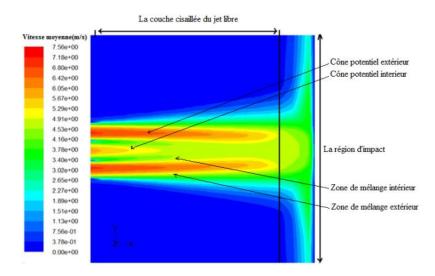


Figure 13 contour de la vitesse moyenne du jet coaxial impactant la plaque pour H/D= 4 sur le plan (z=0)

Au niveau de la région d'impact le transfert de chaleur est important comme le montre la figure 13 ; En effet, en s'approchant de la paroi, le développement du jet devient perturber et l'importance de gradient de pression et des forces des fluctuations de la composante de la vitesse axiale (perpendiculaire à la plaque) identifient l'écoulement dans une région de stagnation. On observe un grand changement des coefficients de transfert de chaleur qui diminuent de la région de stagnation vers les extrémités de la plaque. Cela est dû dans la région de stagnation à la convection forcée qui est prépondérante grâce à la vitesse du jet par contre vers les extrémités, la convection devient de plus en plus naturelle. Autrement dit, il y a une compétition entre les effets de flottabilité produits par la différence de température entre la plaque et le fluide, et les effets d'inertie. Cette compétition se traduit par le décollement de la couche limite cinématique et thermique du fluide sur la plaque, à une distance plus ou moins éloignée de l'axe de la buse.

Pour mieux comprendre le phénomène établi au niveau de la plaque nous présentons les lignes de courant de ce jet dans ses différentes composantes. Commençons tout d'abord par une vue en 3 dimensions des lignes de courant du jet coaxial impactant dès l'entrée du fluide jusqu'à la plaque dans tout l'espace dans la figure 14, ensuite nous présentons ces lignes de courant sur le plan z=0 dans la figure 15.

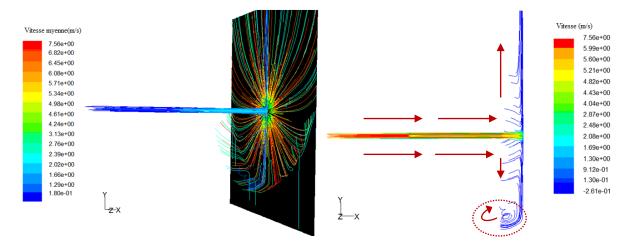


Figure 14 Les lignes de courant dans tout le domaine en 3D pour H/D= 4

Figure 15 Les lignes de courant dans tout notre domaine pour H/D=4 et sur le plan (z=0)

L'écoulement en régime établie va être troublé par la présence de la plaque. Les molécules d'un fluide réel ont une grande vitesse et rencontrent une discontinuité ou un obstacle, elles tournoient en petits tourbillons transportant de l'énergie qui finissent par créer des zones de recirculation comme montré dans la Figure.15. L'écoulement autour d'un obstacle est représenté dans notre cas par la paroi de la plaque verticale chauffée. Dans la région pariétale supérieure les forces de flottabilité sont prépondérantes. L'air chaud sous l'effet des forces de flottabilité s'élève librement (sans formation de zones de recirculations). Par contre dans la région pariétale inférieure, l'air a tendance à s'élever mais en contre partie il s'entraine par le jet impactant ce qui crée des zones de recirculation.

3.3.2 Distribution de la vitesse pour H/D = 12

Dans le passage suivant, nous présentons les mêmes résultats mais cette fois pour H/D= 12. C'est-à-dire à une distance axiale entre la sortie des buses et la plaque verticale chauffée de H= 165.6 mm. Nous interprétons ensuite la différence entre ces deux cas et l'effet de la distance entre sortie de buse et plaque, sur les propriétés dynamiques du jet.

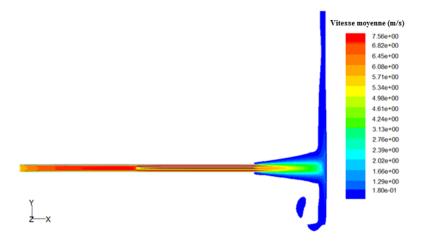


Figure 16 Contour de la vitesse moyenne dans tout le domaine pour H/D= 12 sur le plan (z=0)

En comparant avec le contour de la vitesse précédent pour H/D=4 (figure 12), pour une distance H plus grande (H=12) présentée dans la figure 16, La couche cisaillée du jet libre devient plus longue, la vitesse du jet s'est affaiblie en éloignant la plaque des buses, et par la suite la région d'impact se réduit et la région du jet pariétal s'agrandit.

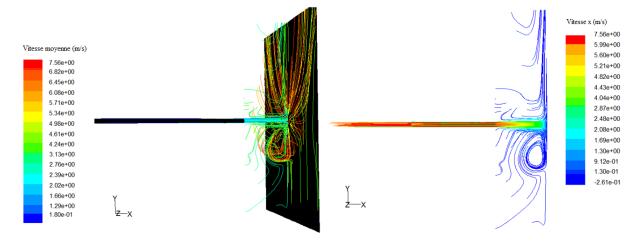


Figure 17 Les lignes de courant dans tout le domaine pour H/D= 12 en 3D

Figure 18 Les lignes de courant dans tout notre domaine pour H/D=12 et sur le plan (z=0)

En éloignant la plaque des buses (c'est-à-dire une distance H plus grande), les zones de recirculation dans les lignes de courant crées par la présence de la plaque impactée par le jet et qui transportent de l'énergie, sont approchées de la zone d'impact. Aussi, la taille de ces zones est amplifiée en s'éloignant des buses, ce qui provoque plus de perturbation sur l'écoulement. Toujours cette zone de recirculation ne se présente que dans la partie inferieure de ce jet horizontal. La vitesse du jet au niveau de la plaque tend à s'affaiblir en l'éloignant. Cela, explique l'amplification de ces zones de circulation par rapport au cas de la position H/D=4 de la plaque chauffée.

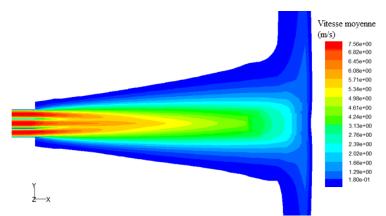


Figure 19 Contour de la vitesse moyenne du jet coaxial impactant la plaque pour H/D= 12 sur le plan (z=0)

En plaçant la plaque plus loin des buses de jet l'influence des forces de flottabilité diminue. Le décollement de la couche limite a un effet important sur la quantité de chaleur échangée entre la plaque et le fluide, et donc, sur la qualité du refroidissement de la plaque. La région d'impact se réduit ce qui provoque la diminution de transfert de chaleur autrement dit la valeur du nombre de Nusselt de stagnation et de Nusselt moyen.

3.4. Evolution de nombre du Nusselt

Ci-dessous les distributions du nombre de Nusselt sur la plaque chauffée et impactée par le jet. Nous présentons sur les figures dans ce passage la distribution du nombre de Nusselt sur toute la plaque (Figure 26-29), dans une surface carrée centrée de la plaque (160mmx160mm) (Figure 20, 22,24,25) à comparer avec les nombres de Nusselt locaux et de stagnation expérimentaux (Figure 21et 23).

Ce nombre caractérise l'importance de la convection par rapport à la conduction :

Le nombre de Nusselt est le rapport de la quantité de chaleur échangée par convection à une quantité de chaleur échangée par conduction. Le coefficient de transfert thermique est la somme de celui de la convection naturel et celui de la convection forcée :

$$Nu = \frac{h.L}{\lambda} \qquad (6) \qquad ; \qquad h = \frac{q}{s (Tp-T0)}$$
 (7)

Nusselt moyen:

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h}.L}{\lambda}$$
 (8) ; $\overline{h} = \frac{1}{s} \int h \, ds$ (9)
$$q_{\text{tot}} \int h(\text{Tp} - \text{T0}) \, ds = \overline{h} \left(Tp - T0 \right) S$$
 (10)

*La conductivité thermique de l'air à la température moyenne (λ) est 0.0278 w/m. K

3.4.1 Evolution du Nombre de Nusselt local :

Nous présentons ci-dessous les iso-valeurs de nombre du Nusselt local sur un quart de la surface carrée centrée de 160 x160 mm de la plaque.

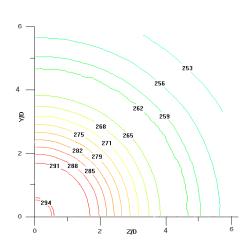
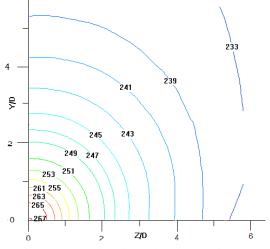


Figure 20 Nombre de Nu local numérique pour H/D = 4

Figure 21 Nombre de Nu local expérimental pour H/D=4 [1]



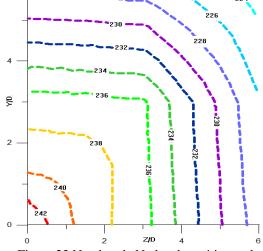


Figure 22 Nombre de Nu local numérique pour H/D = 12

Figure 23 Nombre de Nu local expérimental pour H/D =12 [1]

Les distributions sont similaires au niveau des allures avec une petite marge d'erreur pour les valeurs. Les résultats expérimentaux sur lesquels nous voulons valider notre code pour le nombre de Nusselt local de H/D= 6 et H/D= 8 n'étaient pas présentés dans la référence [1]. Donc nous allons les traiter numériquement pour voir la différence chaque fois que nous éloignons la plaque de la buse entre H/D=4 et H/D=12.

^{*}Pour déterminer le nombre de Nusselt nous tirons le flux de chaleur « q » à partir de « Fluent 6.3».

^{* «} qtot » est la quantité de chaleur totale à une zone carrée de la plaque de 160x160 mm centrée.

^{* «} S » La surface de la plaque à considérer pour les résultats est de 160 x160 mm centrée de la plaque chauffée. Cette surface est celle où étaient placés dans l'expérience de N. Celik et H. Eren [1] les 33 thermocouples de type T de diamètre 0.3mm dont 25 étaient placés aux intersections de réseau de quadrillage qui définissent un maillage de 25 places et les 8 restants étaient déployés dans un anneau serré autour de point de stagnation du jet impactant.

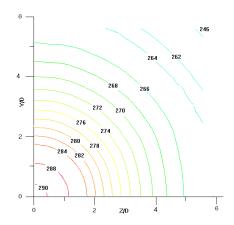


Figure 24 Nusselt local numérique pour H/D = 6

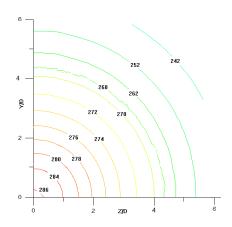


Figure 25 Nusselt local numérique pour H/D=8

Nous présentons l'évolution du nombre de Nusselt sur toute la plaque chauffée de dimensions (590mm x530mm) :

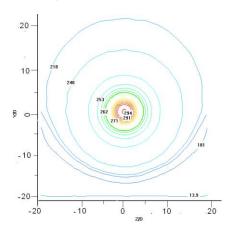


Figure 26 Contour du nombre de Nusselt local sur toute la plaque chauffée pour H/D=4

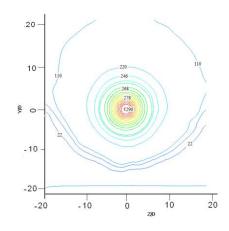


Figure 27 Contour du nombre de Nusselt local sur toute la plaque chauffée pour H/D=6

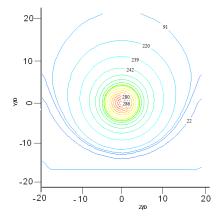


Figure 28 Contour du nombre de Nusselt local sur toute la plaque chauffée pour H/D=8

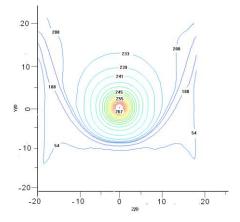


Figure 29 Contour du nombre de Nusselt local sur toute la plaque chauffée pour H/D=12

Nous remarquons que lorsque nous éloignons la plaque du jet coaxial selon la direction de l'axe (0,x), le transfert de chaleur diminue, tout en perdant l'axisymétrie constatée sur la surface restreinte. Nous pouvons voir l'influence de la force de flottabilité qui apparait lorsqu'on a une différence de température. La distribution n'est plus circulaire tout en s'éloignant du point de stagnation. Le changement de la température de l'air entre la plaque et les buses du jet et la distribution des vitesses du jet impactant la plaque explique le mouvement ascensionnel du flux de chaleur sur la plaque.

3.4.2 Evolution du Nombre de Nusselt de stagnation et Nusselt moyen

Dans le tableau suivant nous avons établi les résultats obtenus pour les nombres de Nusselt de stagnation et moyen sur la plaque chauffée avec notre simulation numérique ainsi que les résultats expérimentaux présentés par N. Celik et H. Eren [1] afin de pouvoir les comparer.

Tableau 2 Les différents résultats déterminés expérimentalement et numériquement des Nusselt de stagnation.

| | Nombre de Nuss | Erreur | |
|-----|----------------|--------------|-----|
| H/D | Résultat | Résultat | (%) |
| | numérique | expérimental | |
| 4 | 294 | 270 | 8 |
| 6 | 291 | 265 | 9 |
| 8 | 286 | 260 | 10 |
| 12 | 267 | 242 | 10 |

Tableau 3 Les différents résultats déterminés expérimentalement et numériquement des Nusselt moyens.

| | Nombre de N | Erreur | |
|-----|-------------|--------------|-----|
| H/D | Résultat | Résultat | (%) |
| | numérique | expérimental | |
| 4 | 281 | 260 | 8 |
| 6 | 272 | 254 | 7 |
| 8 | 268 | 250 | 7 |
| 12 | 254 | 240 | 5 |

Erreur (%) représente l'écart entre les résultats numériques et ceux expérimentaux estimée par la relation :

Erreur (%)=
$$\frac{|V_{\text{num-Vexp}}|}{V_{\text{exp}}}$$
 (11)

Nous constatons d'après ces résultats que tout d'abord en augmentant le rapport H/D c'est-à-dire en s'éloignant des buses les nombres de Nusselt de stagnation et, moyen diminuent. Les résultats trouvés numériquement sont supérieurs mais acceptables en les comparant à ceux expérimentaux de 5 à 8% pour les valeurs des Nu moyens et de 8 à 10 % pour les valeurs des Nu stagnation.

L'utilisation de et l'hypothèse de Boussinesq infiltrent des erreurs non négligeables (exemple : recirculation, écoulement avec décollement,...) pour la correction de cette hypothèse, on a eu recours à l'utilisation du modèle RSM afin d'utiliser les équations de tensions de Reynolds en modélisant (modélisation de second ordre) les termes supplémentaires. Cette modélisation est très délicate spécialement sur les termes de corrélation pression-vitesse.

L'épaisseur des tubes intérieur et extérieur n'est pas spécifiée dans le travail expérimental de N. Celik et H. Eren [1], le nombre de mesures expérimentales est faible pour une validation meilleure.

Ces causes peuvent expliquer l'écart d'erreur des valeurs trouvées entre les résultats numériques et expérimentaux.

4. CONCLUSION:

Dans ce travail, un jet coaxial impactant une plaque plane chauffée à une température constante est étudié numériquement à différentes positions de la plaque (H/D=4, H/D=6, H/D=8, H/D=12). Une comparaison des résultats numériques obtenus avec ceux expérimentaux disponibles dans la littérature a montré une bonne concordance, le modèle numérique mis en place a donc été validé.

A l'issu de cette étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

• Le champ d'écoulement a été prédit convenablement et une bonne distinction des différentes régions du jet a été observé à savoir : Les trois régions du jet impactant (région d'impact, région de jet pariétal),

les trois zones du jet simple (initiale, interne, développée) et la couche cisaillée et les différentes zones caractérisant le jet coaxial (mélange intérieur et celui extérieur, les cônes potentiels intérieur et extérieurs et le point de rattachement).

- Au niveau de champ de température, plus la plaque est proche de jet plus il y a une augmentation de la température de l'air existant entre la buse et la plaque.
- En s'approchant de la plaque le jet devient perturbé et l'importance du gradient de pression et des forces des fluctuations de la composante de la vitesse axiale identifient l'écoulement dans une région de stagnation.
- Dans la région pariétale supérieure les forces de flottabilité sont prépondérantes. L'air chaud s'élève librement sans zone de recirculation. Par contre, dans la région pariétale inférieure, l'air a tendance à s'élever mais il s'entraine par le jet impactant ce qui crée ces zones de recirculation.
- En s'éloignant de la plaque chauffée, la distribution des nombre de Nusselt locaux n'est plus circulaire tout en s'éloignant du point de stagnation. Le changement de la température de l'air entre la plaque et les buses du jet et la distribution des vitesses du jet impactant la plaque explique le mouvement ascensionnel du flux de chaleur sur la plaque.
- L'éloignement de la plaque entraine une perturbation de l'écoulement qui se traduit par l'augmentation de la taille des zones de recirculation. Cette perturbation de l'écoulement affecte le transfert de chaleur entre le fluide et la plaque ce qui explique la diminution des différents nombres de Nusselt dans ce cas.
- Les résultats des nombres de nombre de Nu moyen, Nu de stagnation et Nu local sont en bonne concordance avec ceux expérimentaux avec un pourcentage d'erreur ≈ 8%.

Nomenclature

• Cp : Capacité thermique massique du fluide

• λ : conductivité thermique :

Dans l'équation de l'énergie : du fluide. Dans l'équation de Nusselt : de l'air à la température moyenne ($\lambda = 0.0278 \text{ w/m. K}$).

• β : La délation thermique

• gi : Les composantes de la gravité (m.s⁻²)

• α : La diffusivité (m².s⁻¹)

 h: Coefficient de transfert thermique convectif(W/(m².K))

• \bar{h} : Coefficient de transfert thermique convectif moyen (W/(m².K))

• ρ: La masse volumique(kg.m⁻³)

• L : La longueur de la plaque (m)

• q : flux de chaleur (W)

S: Surface (m²)

Tp : Température de la plaque (K)

T0 : Température du jet (dans notre cas ambiante)

I_t : Intensité turbulente(%)

U: vitesse (m/s)

 \overline{U} :vitesse moyenne (m/s)

U': fluctuation de la vitesse(m/s)

P: pression (Pa)

μ: viscosité (kg/m.s)

Nu : nombre de Nusselt

Nu : nombre de Nusselt moyen

Cp : Capacité thermique massique à pression

constante (J/kg.k)

CFD: Computational Fluid Dynamics

Références

[1] N. Celik et Eren , Heat transfer due to impinging co-axial jets and the jets' fluid flow characteristics, Experimental Thermal and Fluid Science 33, 715–727, 2009.

[2] Forstall et Shapiro, Momentum and mass transfer in co-axial gas jets, Transactions of ASME, Journal of Applied Mechanics 18, 219–228,1951.

- [3] Durao et Whitelaw, Turbulent mixing in the developing region of coaxial jets, Transactions of ASME, Journal of Fluids Engineering 95, 467–473, (1973).
- [4] W. Kriaa, K. Abderrazzak, H. Mhiri, G. Le Palec, P. Bournot, Numerical study of non-isothermal turbulent coaxial jets, Heat and Mass Transfer 44,1051–1063,2008.
- [5] N.W.M. Ko, H. Au, ''Initial region of subsonic coaxial jets of high mean velocity ratio", Trans ASME, J. Fluids. Engng 103, 335-338, 1981.
- [6] D.W. Colucci et R. Viskanta, Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet, Experimental Thermal and Fluid Science 13, 71–80, 1996.
- [7] V.Narayanan et Yagoobi J.S., R.H. Page, Heat transfer characteristics of a slot jet reattachment nozzle, Transactions of ASME (C) 120, 348–356, 1998.
- [8] S.V. Garimella et B.Nenaydyk , Nozzle-geometry effects in liquid jet impingement heat transfer, International Journal of Heat and Mass Transfer 39, 2915–2923, 1996.