



Contribution à la modélisation de l'interaction entre deux jets inclinés et un écoulement transversal : refroidissement par jets

Amina Radhouane, Nejla Mahjoub Said, Hatem Mhiri, Georges Le Palec,
Philippe Bournot

► To cite this version:

Amina Radhouane, Nejla Mahjoub Said, Hatem Mhiri, Georges Le Palec, Philippe Bournot. Contribution à la modélisation de l'interaction entre deux jets inclinés et un écoulement transversal : refroidissement par jets. Jean-Jacques BEZIAN. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. ENSTIMAC, 5p., 2007. <hal-00161533>

HAL Id: hal-00161533

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00161533>

Submitted on 29 Aug 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONTRIBUTION A LA MODÉLISATION DE L'INTERACTION ENTRE DEUX JETS INCLINÉS ET UN ÉCOULEMENT TRANSVERSAL: REFROIDISSEMENT PAR JETS

Amina RADHOUANE¹, Nejla MAHJOUB SAÏD¹, Hatem MHIRI¹,
George LEPALEC², Philippe BOURNOT²

¹Unité de Thermique et Environnement, Ecole Nationale d'ingénieurs de Monastir, Route de Ouardanine, 5000 Monastir - Tunisie

²Institut de Mécanique de Marseille, 60 rue Joliot Curie Technopôle de Château-Gombert
13453 Marseille Cedex 13 - France.

radhouane_amina@yahoo.fr

Résumé:

L'interaction entre deux jets inclinés et un écoulement transverse est examinée dans ce papier en vue de présenter une description dynamique de l'écoulement résultant. Les deux jets considérés sont circulaires de diamètre 10 mm, espacés de trois diamètres et accusent une inclinaison de 60° par rapport à la direction principale. La simulation numérique de ce problème passe par la considération des équations de Navier-Stokes et l'emploi d'un modèle de fermeture du second ordre. Le maillage est non uniforme et raffiné autour des buses d'éjection. Les différents résultats recueillis en configuration tridimensionnelle permettent d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres dont le taux d'injection qui couvre les valeurs de 0.67, 1, 2 et 5 sur la structure de l'écoulement résultant (vitesse, vortex, etc..) ainsi que sur la distribution de la température.

Mots clés: deux jets, rapport d'injection, température, champ dynamique.

1. INTRODUCTION

Le thème des jets dans un écoulement transverse a largement été traité dans la littérature; cependant les configurations à jet unique en accaparent la majeure partie, viennent ensuite les configurations à jets double ou multiples dont l'intérêt va crescendo. En effet dans plusieurs applications industrielles, l'introduction de plus d'un jet présente plusieurs avantages dont principalement l'amélioration de l'efficacité. Ces applications touchent plusieurs domaines dont la dispersion des polluants gazeux ou liquides, les avions VSTOL, le refroidissement des gaz d'échappement, ou encore le refroidissement des aubes des turbines à gaz, etc...

Certains auteurs ont étudié exclusivement des jets doubles arrangés en tandem tels que Ohanian and Rahai [1]. Leur objectif a été de tester l'influence de différents rapports d'injection et distances inter buses (d , $2d$ et $3d$) sur l'évolution de l'écoulement résultant. Les résultats ont montré que le couplage des jets disparaît lorsque la distance atteint $3d$. Pour les autres distances, l'augmentation de la quantité de mouvement du jet aval au dessus du jet transverse et du premier jet, augmente la distance au bout de laquelle il rejoint l'écoulement transverse pour enfin épouser sa trajectoire. La croissance de l'énergie cinétique turbulente est due au couplage des jets qui favorise un meilleur mélange et un processus de diffusion élaboré.

Certains auteurs tels que Bunsirisert et al. [2] ont plutôt examiné des jets disposés en côte à côte; les buses d'injection étant suffisamment élevées pour ne pas interagir avec la

couche limite de l'écoulement transverse. Le prélèvement des mesures relatives aux deux composantes de la vitesse turbulente et leur quantité de mouvement respective en aval de deux jets a permis de voir que l'élévation des jets a favorisé des interactions diffuses entre le sillage des jets et leur panache dans le champ proche ainsi que des interactions intenses au sein même des sillages des jets. Ceci implique des contributions significatives à la formation de la paire de tourbillons contrarotatifs (CVP).

D'autres travaux enfin ont examiné les deux dispositions à la fois: tandem et côte à côte afin de comparer le comportement des jets au sein de l'écoulement transverse. Zieger et Wooler [3] font partie des pionniers à avoir considéré la question. Ils ont montré que la déflexion notée des jets résulte à la fois de l'entraînement de l'écoulement environnant et des forces de pression agissant sur la couche limite de chacun des jets. Le jet amont est peu affecté par la présence du second jet et ce dernier accuse une réduction au niveau de la vitesse transverse et de la pression dynamique à cause de la présence du premier jet. Toy et al. [4] ont également conduit une étude expérimentale sur les deux dispositions citées. Les mesures y ont été prélevées au moyen de l'anémométrie à fil chaud au niveau des centres des buses. Le phénomène le plus saisissant observé a été la présence d'uniquement une paire de tourbillons contrarotatifs (CVP) au lieu de deux dans le cas de la configuration en côte à côte. Les résultats obtenus ont cependant été insuffisants pour justifier ce comportement.

Dans notre cas, il s'agit d'une étude numérique de deux jets disposés en tandem et éjectant à travers un écoulement transversal en vue de le refroidir. Nous nous proposons donc de décrire le champ résultant de l'interaction entre les jets et l'écoulement environnant ainsi qu'entre les jets eux-mêmes. La variation du rapport d'injection sera également testée afin d'évaluer son impact sur les différentes grandeurs dynamiques (composantes de la vitesse) et thermiques caractérisant l'écoulement.

2. MISE EN ÉQUATION

La configuration considérée dans notre cas d'étude consiste en deux jets circulaires inclinés de 60°, disposés en tandem (alignés), les centres des buses étant séparés de 3d et celui du jet amont l'origine du système de coordonnées régissant le problème (figure 1).

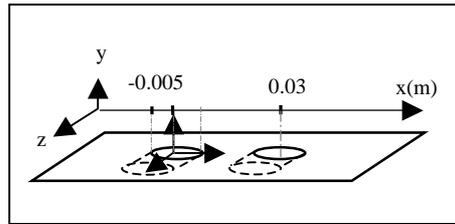


Figure1: Disposition des buses d'injection et du système de coordonnées dans le domaine de calcul

Les équations régissant ce problème, sont obtenues en utilisant la décomposition de Favre et s'écrivent donc sous la forme suivante:

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) + (\bar{\rho}_\infty - \bar{\rho}) g \delta_{ij} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{T})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \mu_t \right) \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{f})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Sc} + \mu_t \right) \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

L'introduction des grandeurs fluctuantes rend ce système ouvert. Sa fermeture nécessite l'utilisation d'un modèle de turbulence qui permette d'obtenir un nombre d'équations égal au nombre d'inconnues. Notre choix s'est donc porté sur un modèle de fermeture au second ordre: RSM (Reynolds Stress Model) qui quantifie la destruction de la turbulence au moyen du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente. Ce modèle contient d'avantage de données sur les forces turbulentes que les approches plus simples et résout l'équation suivante:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho \tilde{u}_k \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}_{C_{ij}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \mu \frac{\partial}{\partial x_k}(\tilde{u}_i \tilde{u}_j)}_{D_{ij}^L} - \underbrace{\rho \left[\tilde{u}_i \tilde{u}_k \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_k} + \tilde{u}_j \tilde{u}_k \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_k} \right]}_{P_{ij}} + D_{ij}^T + G_{ij} + \phi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

C_{ij} étant le terme convectif, et D_{ij}^L , P_{ij} , D_{ij}^T , G_{ij} , ϕ_{ij} , ε_{ij} , respectivement, la diffusion moléculaire, la production de la tension, la diffusion turbulente, la production de flottabilité, la tension de la pression et le taux de dissipation [5].

En utilisant ce modèle, les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente (k) et son taux de dissipation (ε), s'écrivent comme suit :

$$\frac{\partial(\rho \tilde{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \tilde{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{1}{2} (P_{ii} + C_{\varepsilon 3} G_{ii}) \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

Pour compléter le problème, outre les systèmes d'équations cités ci-dessus, il faut tenir compte des conditions aux limites récapitulées dans le tableau suivant (tableau1):

Buses d'injection	$u=v_0 \cos \alpha, v=v_0 \sin \alpha$ $T_0=300.15^\circ K$	$k=10^{-3} v_0^2$ $\varepsilon = k^{3/2}/0.5d$
Écoulement transverse	$u=u_\infty, v=0$ $T_\infty=373.15^\circ K$	$k=\varepsilon=0$

Tableau 1: Conditions aux limites

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le but ultime de cette étude est de caractériser les échanges thermiques ayant lieu entre les deux types de jets en question (jets inclinés et écoulement transverse) à cause de leur large applicabilité et de la diversité des facteurs influent sur leur évolution.

Nous commencerons d'abord par examiner l'impact du rapport d'injection (vitesse d'éjection sur la vitesse de l'écoulement transverse uniforme) sur la distribution spatiale de la température et plus précisément selon la direction longitudinale; celle des deux types d'écoulement. Cet examen est d'autant plus intéressant que le besoin de refroidir des composantes ou des écoulement est devenu une nécessité dans plus d'une application.

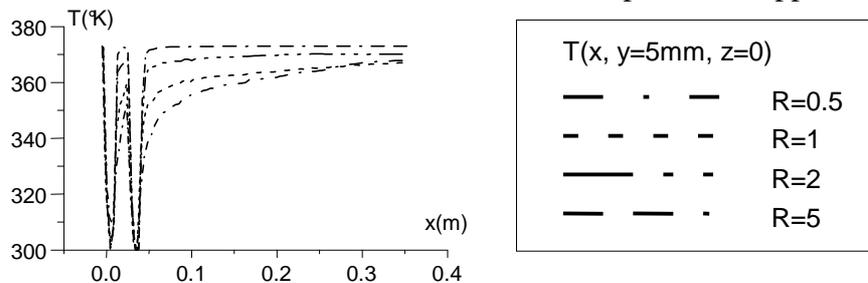


Figure 3: Influence du rapport d'injection sur la distribution spatiale de la température dans la direction longitudinale

Sur la figure présentée ci-dessus (figure 3), nous voyons clairement que la température accuse deux chutes qui coïncident avec les centres des buses d'injection; ceci est tout à fait raisonnable puisque la présence même de ces jets est le refroidissement de l'écoulement transverse. Plus le rapport d'injection croît, plus le gradient de température entre les jets et l'écoulement principal est important: les jets pénètrent plus en profondeur (selon y) ce qui réduit le refroidissement en direction de l'écoulement transverse. En aval des jets, l'augmentation du rapport d'injection permet un retour plus rapide à la température environnante; avec toutefois un refroidissement plus efficace avec le moindre rapport; ceci est probablement dû à l'effet de rattachement à la paroi qui a lieu au voisinage de la plaque d'injection.

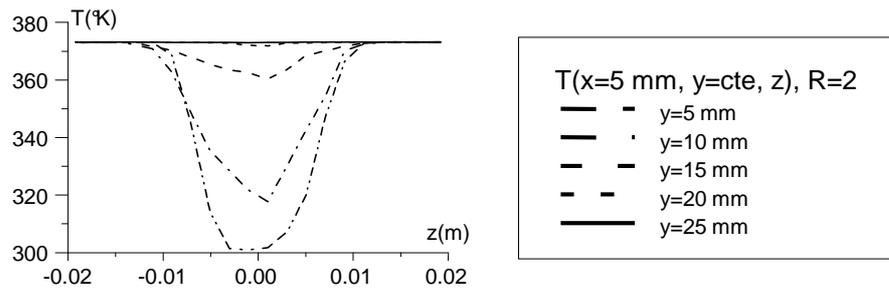


Figure 4: Distribution spatiale de la température dans la direction normale à l'écoulement pour différentes positions y

La configuration étudiée est prise en compte tridimensionnellement; la figure 4 caractérise cet aspect en décrivant son comportement thermique selon la direction transverse et ce pour un rapport d'injection $R=2$. La première remarque à faire est la quasi-symétrie du profil de la température autour du plan $z=0$; notons également l'atténuation de la chute de température à mesure que l'on s'éloigne des buses d'injection (y croissants); pour $y=25 \text{ mm}$ la chute n'est presque plus perceptible: l'expansion verticale du gradient de température n'est presque plus perceptible.

Reste enfin l'évolution selon la direction verticale qui sera explicitée au moyen de cartes thermiques extraites dans différents plans y .

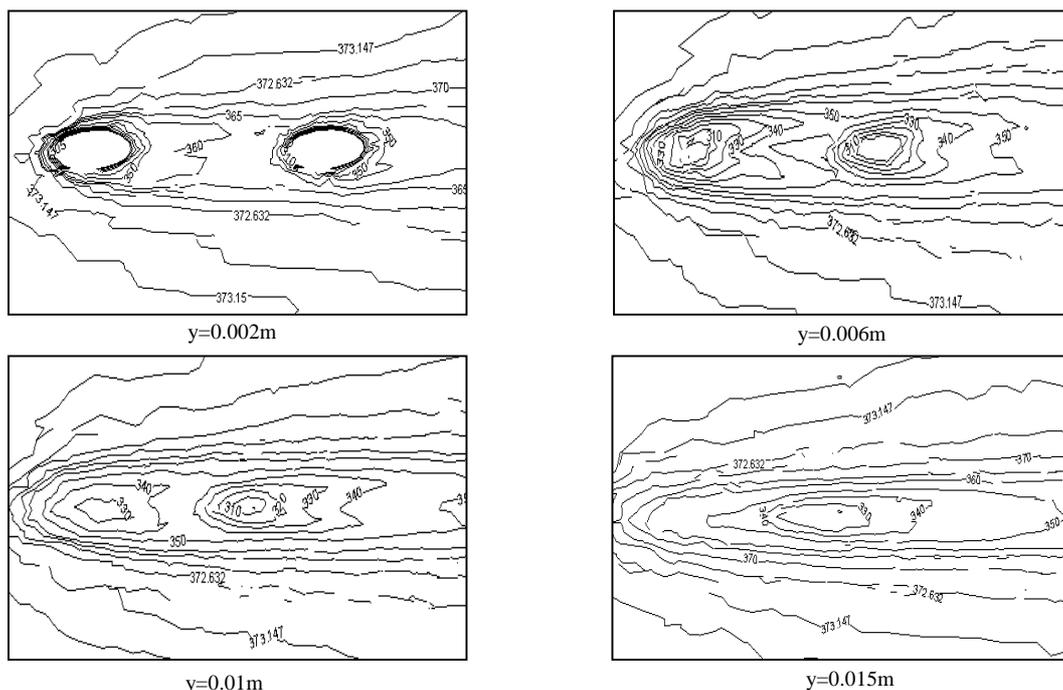


Figure 5: Evolution des iso contours de température pour différentes positions verticales (des plans à $y=cte$)

Sur la figure 5, ces cartes montrent qu'en s'éloignant de la plaque d'injection (y croissants), nous notons une transformation progressive des iso contours de la température: les panaches respectifs des deux jets se rejoignent après évolution pour s'unir et se comporter tel un jet unique émis dans un écoulement transverse. L'atteinte de cette étape dépend de plusieurs paramètres tels que le rapport d'injection, l'inclinaison, etc... Notons également la quasi-symétrie par rapport au plan $z=0$ déjà citée un peu plus haut (figure 4) ainsi qu'une meilleure homogénéisation des températures loin des buses d'injection.

CONCLUSION

Nous voyons donc que le rapport d'injection affecte sensiblement toutes les grandeurs caractéristiques de l'écoulement résultant de l'interaction de deux jets inclinés dans un écoulement transverse et plus particulièrement la distribution de la température en son sein. Une réduction de ce rapport favorise le phénomène de rattachement à la paroi et donc un meilleur refroidissement dans la direction de l'écoulement principal. Par contre son augmentation permet une pénétration plus significative de l'effet de refroidissement dans le domaine de calcul (verticalement). Ceci est à prendre à compte selon que nous visons par notre application un refroidissement en longueur ou en profondeur.

Nomenclature

d	Diamètre des jets, m	S_{ij}	Rapport moyen des tensions
f	fraction massique	T	Temperature, $^{\circ}K$
g	Accélération gravitationnelle, m/s^2	U_{∞}	Vitesse transverse, m/s
G_k	Terme de production des forces de flottabilité, kg/ms^3	V_0	Vitesse d'injection, m/s
k	Energie cinétique turbulente, m^2/s^2	$\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}$	Composantes de la vitesse selon les directions x, y et z , m/s
P_k	Terme de production du aux gradients moyens, kg/ms^3	x, y, z	Coordonnées cartésiennes, m
R	Rapport d'injection		

Symboles Grecs

ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	σ_t	Nombre de Prandtl turbulent
μ_t	Viscosité turbulente, kg/ms	σ_f	Nombre de Schmidt turbulent

Indice

0	Conditions d'injection	∞	Conditions transverses
---	------------------------	----------	------------------------

Exposants

-	Moyenne de Reynolds	\sim	Moyenne de Favre
---	---------------------	--------	------------------

Références

- [1] T. Ohanian, H.R. Rahai, Numerical investigations of multi turbulent jets in a crossflow, *AIAA* 2001-1049.
- [2] K. Bunsirisert, C. Orrala, H. R. Rahai, Profiles of two elevated side-by-side turbulent jets in a crossflow, *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 10 - 13 January 2005, Reno, Nevada
- [3] H. Ziegler, P.T. Wooler, Multiple Jets Exhausted into a Crossflow, *J. Aircraft*, Vol. 8, No. 6, pp. 414-420, May 1970.
- [4] N. Toy, E. Savory, S. McCusker, The interaction region associated with twin jets and a normal cross flow. In *Computational and Experimental Assessment of Jets in Cross Flow*. No. CP-534. *AGARD* 1993.
- [5] R. Schieste, Modélisation et simulation des écoulements turbulents, *Hermès*, Paris, 1993.