

Simulation numérique des échanges convectifs locaux entre un jet d'air cylindrique isotherme et un cylindre chauffé

Numerical simulation of local convective exchanges between an isothermal cylindrical air jet and a heated cylinder

Keryann BREST¹, Aymeric DEHORTER¹, Ulrich FRANÇOISE¹, Guillaume LANNES¹, Thya MESSAOUDEN¹, Julien PELLE^{1,2}

¹INSA Hauts-de-France, 59313 VALENCIENNES CEDEX 9

²Univ. Polytechnique Hauts-de-France, CNRS, UMR8201 – LAMIH, 59313 VALENCIENNES CEDEX 9

Résumé – Ce travail porte sur l'étude numérique des transferts de chaleur par convection entre un jet d'air isotherme en impact et un cylindre chauffé. Le modèle développé sous STARCCM+ est validé par rapport à des résultats issus de la littérature scientifique, dans laquelle seuls des nombres de Nusselt moyens, des valeurs du nombre de Nusselt au point d'impact ou encore la répartition tangentielle du nombre de Nusselt sur l'axe du jet sont étudiés. Pourtant, dans de nombreuses applications, la connaissance de la répartition des transferts convectifs sur l'ensemble de la surface est d'un grand intérêt. Cette étude permet donc de compléter les connaissances déjà établies par des cartographies complètes du nombre de Nusselt et par l'analyse des évolutions en fonction de différents paramètres tels que la distance d'impact et différents rapports de diamètres.

Mots clés : convection, jets, cylindre, simulation, CFD

Abstract – This study deals with the numerical simulation of convective heat transfer between an isothermal impinging air jet and a heated cylinder. The numerical model, developed with STARCCM+, is validated by the comparison with the literature results like Mean Nusselt numbers, stagnation Nusselt number or the tangential repartition of local Nusselt numbers on the axis of jet. This study aims to complete the knowledges about the convective heat transfer by supplying Nusselt number maps over the whole surface of the cylinder and analyze evolutions regarding different parameters such as impact distance and diameter ratios.

Keywords : convection, jets, cylinder, simulation, CFD

Nomenclature

D_{jet}	Diamètre du jet, m	H	Distance jet-cylindre, m
$D_{cylindre}$	Diamètre du cylindre, m	α	Angle d'impact du jet, °
Nu	Nombre de Nusselt	Re	Nombre de Reynolds
U_e	Vitesse d'entrée du jet, m.s ⁻¹	k_f	Conductivité thermique de l'air, W/(mK)
U_0	Vitesse en sortie du jet, m.s ⁻¹	T_j	Température locale mesurée du jet, K
U	Vitesse locale suivant X, m.s ⁻¹	T_s	Température locale mesurée du cylindre, K

1. Introduction

Dans l'industrie, de nombreuses applications utilisent des jets en impact pour échanger de la chaleur par convection (refroidissement de composants électroniques, mise en forme de matériaux,

échangeurs de chaleur...). À ce titre, ces configurations font l'objet de nombreuses études scientifiques afin de caractériser les écoulements et les transferts de chaleur locaux et globaux en fonction de la géométrie du système ainsi que des paramètres dynamiques et dimensionnels [1].

Ces études montrent toutes une forte hétérogénéité des transferts de chaleur sur la paroi d'impact. Lorsque le jet est, par exemple, utilisé pour rétracter un manchon thermorétractable initialement cylindrique afin de l'apposer sur un objet de forme donnée (pour protection, conditionnement ou décoration), l'hétérogénéité des transferts de chaleur ne permet pas une rétraction homogène et une apposition parfaite du film sur l'objet. Dans le cas du dépôt d'une décoration marketing, cela peut par exemple résulter en une écriture déformée et illisible. Afin de contrôler le procédé et de minimiser la quantité d'énergie à transférer, une parfaite connaissance de l'écoulement et des transferts de chaleur convectifs locaux sur un cylindre soumis à l'impact d'un jet d'air est requise.

On s'intéresse donc ici aux échanges de chaleur par convection entre un jet d'air rond isotherme en impact sur un cylindre chauffé. La Figure 1 représente la configuration étudiée.

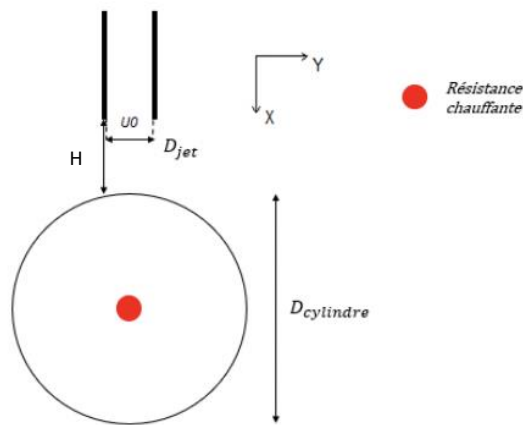


Figure 1: Configuration étudiée représentant un jet en impact sur un cylindre chauffé

Un cylindre de diamètre D_{jet} permet de générer un jet rond. Ce dernier impacte le centre d'un cylindre de diamètre $D_{cylindre}$ sur lequel les échanges de chaleur sont étudiés. La sortie du jet est séparée de la paroi du cylindre par la distance H .

De nombreuses études [2][3] montrent l'existence d'un cône potentiel à la sortie du jet circulaire. La longueur de ce cône correspond à la distance entre la sortie du jet et un point de l'axe du jet où la vitesse médiane équivaut à 95% de la vitesse de sortie du jet. L'ordre de grandeur de la longueur du cône potentiel est de $3-7 D_{jet}$ [2][4]. La longueur du cône tend à augmenter avec le nombre de Reynolds [5]. Lorsque l'on dépasse cette distance, l'écoulement du jet est dit libre. En présence d'un impact sur une paroi, cette distance influence le nombre de Nusselt au point d'arrêt. Wang [6][7] étudie expérimentalement l'influence du rapport H/D_{jet} sur les transferts de chaleur sur un cylindre, pour une plage comprise entre $1 D_{jet}$ à $9 D_{jet}$. De plus, il est montré dans [4] que l'échange de chaleur sur la circonférence du cylindre augmente lorsque le rapport de diamètres $D_{cylindre} / D_{jet}$ diminue.

Malgré les études disponibles dans la littérature, l'échange de chaleur par convection est principalement étudié par l'intermédiaire des nombres de Nusselt moyens, les valeurs du nombre de Nusselt au point d'impact et la répartition tangentielle du nombre de Nusselt sur l'axe du jet uniquement. Il n'est donc pas étudié sur la surface entière du cylindre.

Dans cette étude, on s'efforcera donc de compléter les connaissances déjà établies dans cette configuration par des cartographies de nombres de Nusselt complètes, par l'analyse des répartitions tangentielle et axiale, et cela pour différentes distances jet-cylindre H/D_{jet} et différents rapports de diamètre $D_{cylindre}/D_{jet}$.

2. Étude numérique

2.1. Description du modèle numérique

La géométrie utilisée est représentée sur la Figure 2. À l'entrée du cylindre permettant de générer le jet, une vitesse homogène U_0 est imposée, de manière à obtenir un nombre de Reynolds de 20000. La température à l'entrée est quant à elle fixée à 300K. Ce cylindre est suffisamment long pour obtenir un écoulement turbulent pleinement développé en sortie de jet. Ce jet impacte le centre d'un cylindre creux sur lequel on étudie les échanges de chaleur. Le cylindre est alors chauffé grâce à une condition de température imposée à 400K sur la surface interne. Le système étudié présente des symétries géométriques mais aussi dynamiques (le plan vertical et le plan horizontal). La simulation est donc effectuée sur un quart de la géométrie afin de réduire le nombre de cellules du maillage et ainsi diminuer le temps de calcul CPU. Les limites du domaine sont placées suffisamment loin du cylindre impacté par le jet de manière à ne pas influencer le développement de l'écoulement. Des conditions de pression sont imposées sur les frontières restantes.

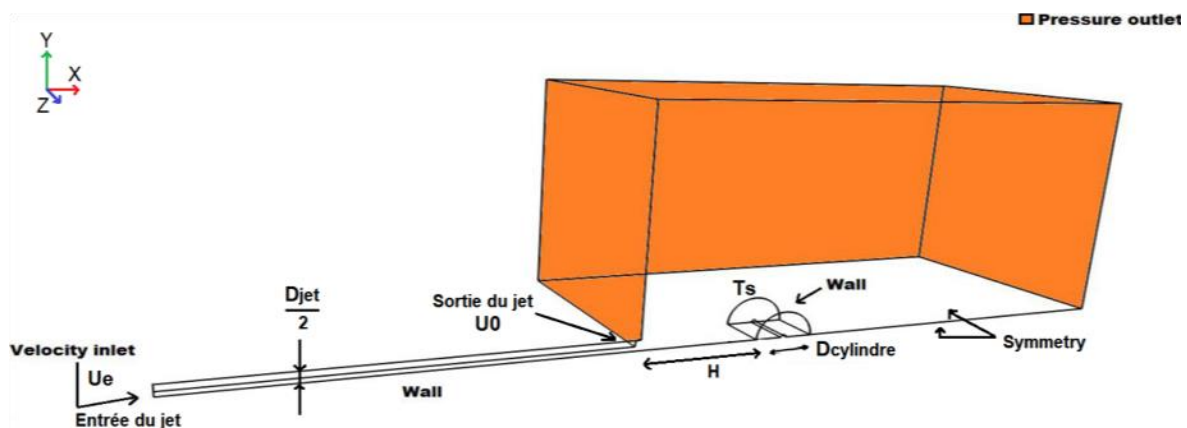


Figure 2: Modèle numérique avec conditions aux limites

Différents modèles de turbulence peuvent être utilisés pour modéliser cet écoulement en régime permanent : $k-\epsilon$ Realizable, $k-\omega$ SST et V2F. Le modèle de turbulence $k-\omega$ SST est généralement le plus utilisé car celui-ci permet une convergence rapide néanmoins il est connu pour avoir tendance à surestimer le nombre de Nusselt dans la zone d'impact, d'après Singh et al [8].

2.2. Validation de notre modèle

2.2.1. Longueur de cône potentiel en configuration de jet libre

On s'intéresse dans un premier temps à la simulation du jet libre $Re = 2000$. La figure 3 montre l'évolution de la vitesse axiale dans l'axe du jet en fonction de la distance à la sortie du X/D_{jet} pour différents modèles de turbulence. Ces évolutions sont comparées à celle obtenue expérimentalement par Wang [6].

Nous constatons que les différents modèles donnent des longueurs de cône potentiel assez différentes. En effet, le modèle k- ω SST prédit la plus faible longueur de cône potentiel avec une distance de $5 D_{jet}$ tandis que le modèle V2f donne une distance de $7 D_{jet}$. La valeur expérimentale [6] se situe quant à elle à $5,5 D_{jet}$. Sur cette base, le modèle k- ω SST semble donc mieux modéliser le développement du jet pour les faibles distances X/D_{jet} . Au-delà de $10 D_{jet}$, le modèle V2f suit par contre beaucoup plus fidèlement l'évolution de vitesse obtenue expérimentalement.

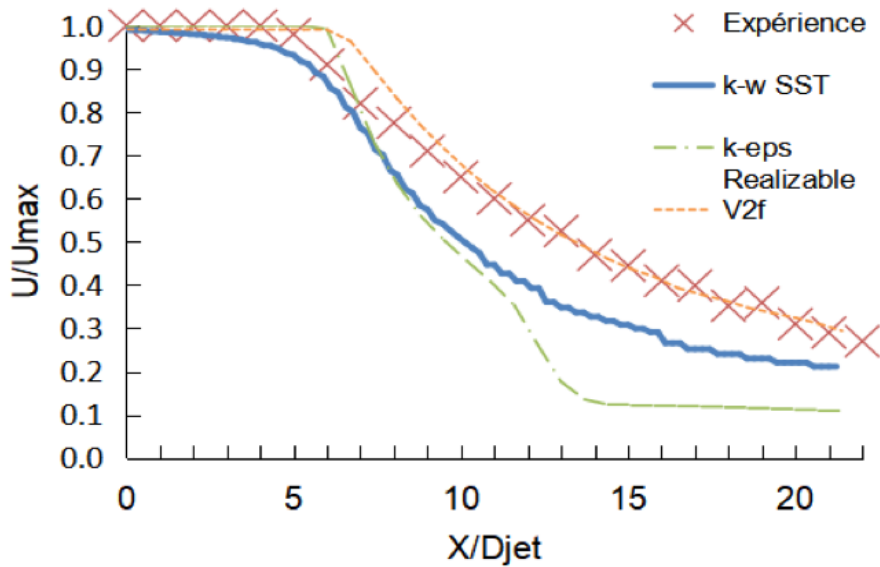


Figure 3: Représentation de la vitesse axiale normalisée en fonction de la distance normalisée pour un jet libre.

2.2.2. Nombres de Nusselt

L'objectif de cette étude étant de modéliser les transferts thermiques entre un jet d'air et un cylindre, la répartition tangentielle du nombre de Nusselt ainsi que le nombre de Nusselt moyen en fonction du rapport de diamètres sont également étudiés afin de valider notre modèle. Pour cela, les résultats expérimentaux obtenus par Wang et al [6] sont utilisés en référence.

Le transfert thermique est évalué par l'utilisation du nombre de Nusselt défini comme suit :

$$Nu(\alpha) = h(\alpha) D_{jet} / k_f$$

$$\text{où } h(\alpha) = q'' / (T_s(\alpha) - T_{jet})$$

Les propriétés de l'air sont estimées à la température de l'air du jet, soit à 300K et sont constantes dans la simulation.

Une étude de sensibilité au maillage avec le modèle k- ω SST nous a permis de déduire qu'un domaine discrétisé en 2 millions de cellules avec une zone de contrôle permettant un maillage fin autour du jet et du cylindre était un bon compromis précision/temps de calcul. 10 cellules sont alors utilisées pour modéliser la couche limite sur le cylindre d'impact en veillant à obtenir un y^+ proche de 1 pour bien appréhender l'écoulement dans la couche limite.

Le cas ayant pour paramètres $D_{cylindre}/D_{jet} = 5$ et $H/D_{jet} = 2$ est étudié. La comparaison des répartitions tangentielles du nombre de Nusselt local dans l'axe du jet est présentée sur la figure 4. On constate tout d'abord que la simulation numérique surestime légèrement le nombre de Nusselt au

point d'impact (+4%). Les nombres de Nusselt chutent ensuite assez rapidement dans l'expérience de Wang, et même si l'allure globale est respectée, la chute est plus tardive dans les résultats de la simulation. Dans la zone arrière, de fortes différences sont également constatées. La chute brutale du nombre de Nusselt obtenu par simulation dans la zone arrière du cylindre est due à la présence d'une zone de recirculation. Cette chute n'est pas observée expérimentalement.

À l'exception de la zone centrée sur 3 radians, les écarts relatifs entre les résultats de simulations et les résultats expérimentaux n'excèdent pas 15%.

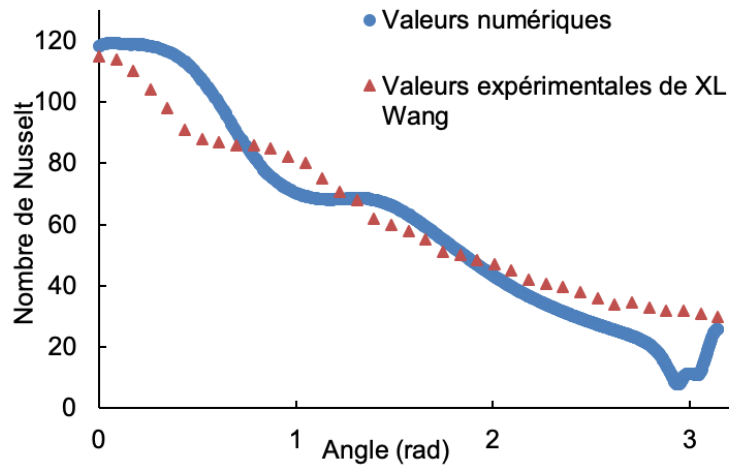


Figure 5: Répartition tangentielle du nombre de Nusselt pour $D_{cylindre} / D_{jet}=2$ et $H / D_{jet} = 2$

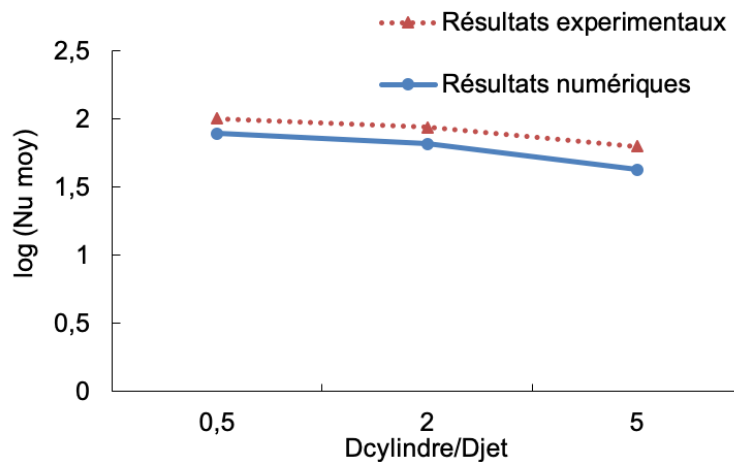


Figure 4: Évolution logarithmique du nombre de Nusselt moyen pour différents rapports de diamètres $D_{cylindre} / D_{jet}$

La Figure 5 montre l'évolution des nombres de Nusselt tangentiels moyens obtenus dans l'axe du jet pour 3 rapports de diamètres $D_{cylindre} / D_{jet} = 0,5 ; 2 ; 5$. La diminution du nombre de Nusselt moyen avec l'augmentation du rapport des diamètres est obtenue aussi bien expérimentalement que numériquement. Globalement les simulations sous-estiment les transferts de chaleur d'environ 20% mais les évolutions sont bien représentées.

Ces comparaisons avec la littérature, même si des différences sont observées, nous permettent de conclure sur la pertinence d'utiliser ces simulations pour observer l'influence des différents paramètres dimensionnels sur le comportement thermique à la surface du cylindre.

3. Résultats et analyses

3.1 Structure d'écoulement autour du cylindre

La Figure 6 permet la visualisation des lignes de courants issues du jet et passant autour du cylindre.

On observe que les lignes de courants au centre du jet, qui possèdent les vitesses les plus élevées, contournent parfaitement le cylindre sans s'en éloigner, à l'exception d'une très petite zone située à l'arrière du cylindre. Dans cette zone, la chute du nombre de Nusselt, précédemment remarquée, correspond au décollement de l'écoulement. Ce décollement provoque ensuite une recirculation à l'arrière du cylindre qui s'évacue par le côté.

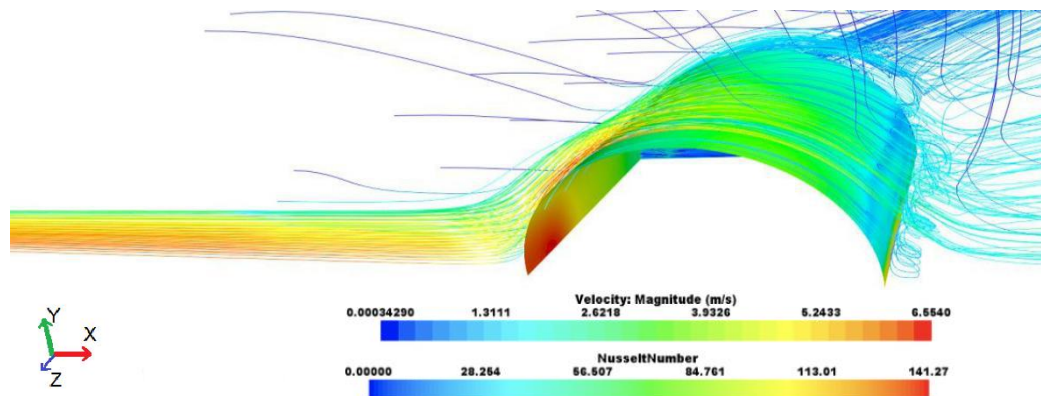


Figure 6: Visualisation des lignes de courants en aval du cylindre

Les parties 3.2 et 3.3 ci-dessous présentent des cartographies de nombres de Nusselt sur toute la surface du cylindre soumis au jet, ce qui est totalement nouveau par rapport aux données disponibles dans la littérature.

3.2 Étude de l'influence de la distance $D_{\text{cylindre}}/D_{\text{jet}}$ sur la répartition du nombre de Nusselt local sur la surface du cylindre

L'influence du rapport de diamètre $D_{\text{cylindre}}/D_{\text{jet}}$ a été étudiée. Durant notre étude, nous nous sommes intéressés au rapport de diamètre $D_{\text{cylindre}}/D_{\text{jet}} = 2 ; 2,5$ et 5 . L'effet du rapport de diamètre a été observé dans un contexte où le nombre de $Re = 20000$ et $H/D_{\text{jet}} = 2$.

Pour cela, nous avons tracé la cartographie du nombre de Nusselt du cylindre pour différents rapports de diamètres (Figure 7). On étudie une cartographie d'un quart de cylindre simulé. L'abscisse X représente l'abscisse curviligne sur le cylindre (déplié) et l'ordonnée l'axe Z du cylindre impacté. Le centre du jet impacte le cylindre en $(0,0)$.

Sur chaque cartographie, on observe une zone à l'arrière du cylindre (partie droite des cartographies) où apparaissent 2 bandes rectilignes et s'étalent sur toute la longueur du cylindre où les nombres de Nusselt sont très faibles. Cette zone est celle à proximité de laquelle apparaît le décollement de l'écoulement (Figure 6) et qui est le siège du tourbillon qui s'évacue sur le côté du cylindre.

Le nombre de Nusselt est le plus élevé au point d'impact quel que soit le cas. On observe cependant que plus le rapport de diamètre $D_{\text{cylindre}}/D_{\text{jet}}$ est faible, plus le nombre de Nusselt est élevé

notamment au point d'impact. En effet, cela est causé par l'accélération de l'écoulement après impact au niveau du point de stagnation. Celui-ci est plus important, causant un écoulement turbulent instable localement d'où la présence d'un transfert thermique élevé [4][8].

Lorsque l'on accroît le rapport de diamètre $D_{\text{cylindre}}/D_{\text{jet}}$ pour une distance jet-cylindre fixée, les cartographies de la Figure 7 révèlent une homogénéisation de la répartition du nombre de Nusselt local.

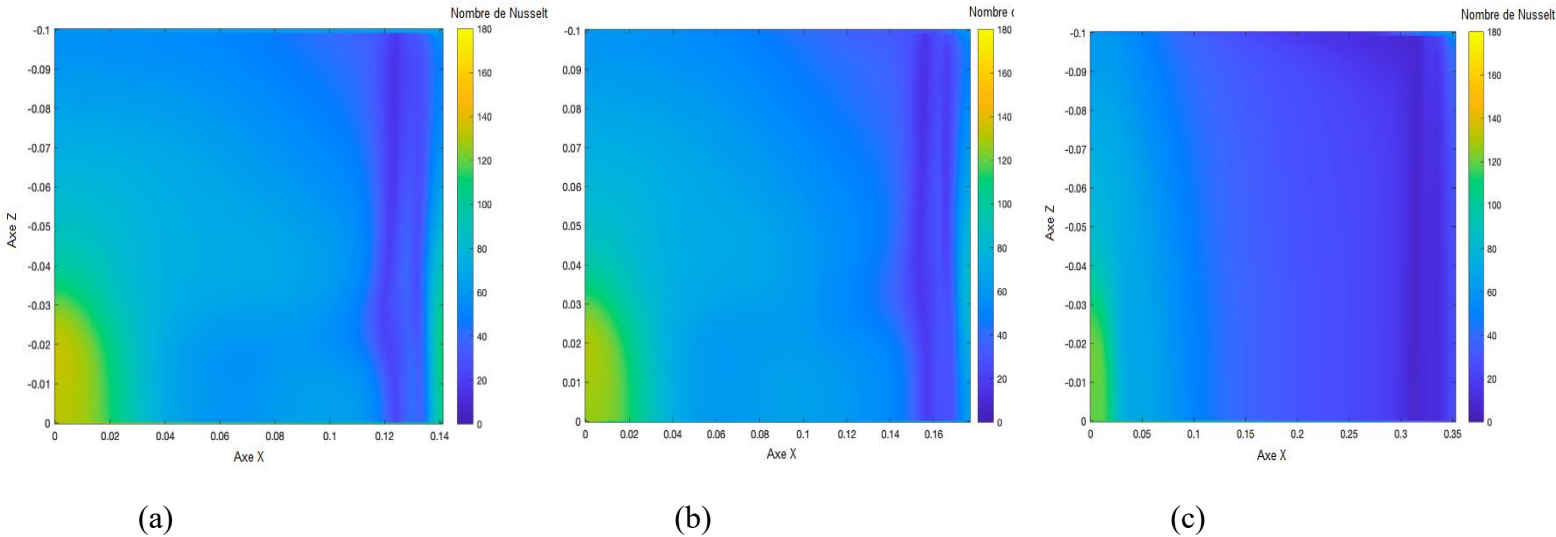


Figure 7 : Cartographie du nombre de Nusselt pour le quart de cylindre étudié pour $h/D_{\text{jet}} = 2$, (a) $D_{\text{cylindre}}/D_{\text{jet}} = 2$, (b) $D_{\text{cylindre}}/D_{\text{jet}} = 2,5$, (c) $D_{\text{cylindre}}/D_{\text{jet}} = 5$

3.3 Étude de l'influence de la distance H/D_{jet} entre la sortie du jet et le cylindre sur le nombre de Nusselt local sur la surface du cylindre

Le rapport de diamètre a ici été fixé à $D_{\text{cylindre}}/D_{\text{jet}} = 2$ et l'écoulement est toujours turbulent avec un nombre de Reynolds de 20 000. Nous avons tracé les cartographies du nombre de Nusselt local pour différentes distances H/D_{jet} (Figure 8).

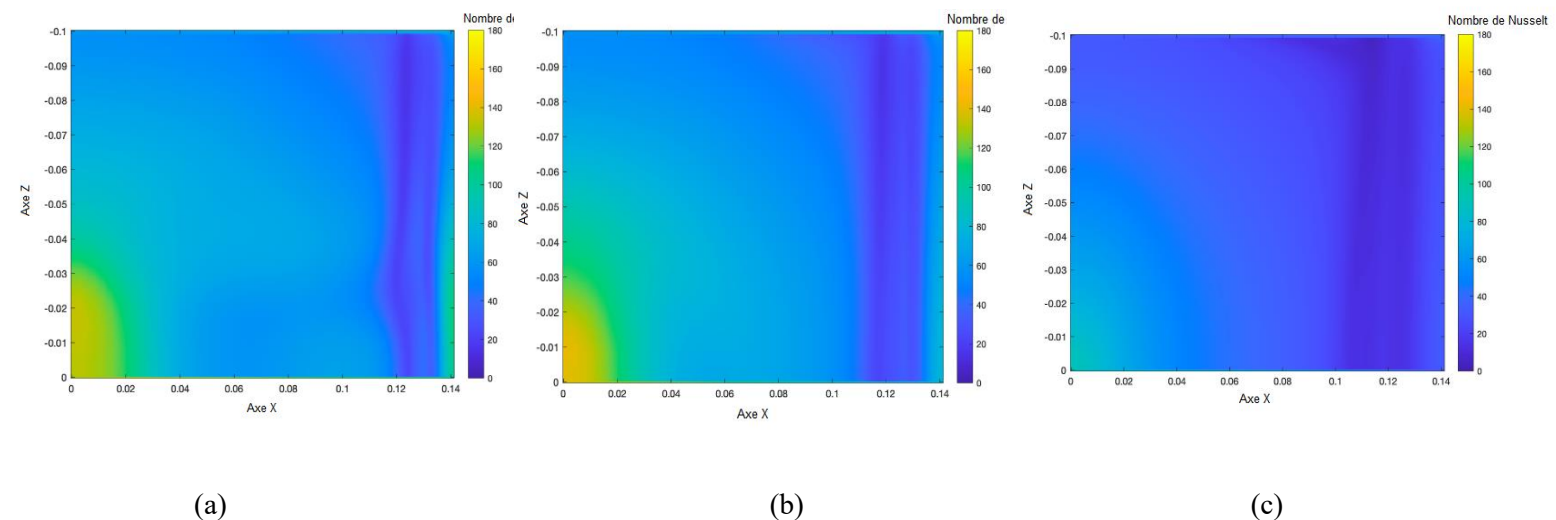


Figure 8 : Cartographie du nombre de Nusselt pour le quart de cylindre étudié pour $D_{\text{cylindre}}/D_{\text{jet}} = 2$, (a) $h/D_{\text{jet}} = 2$; (b) $h/D_{\text{jet}} = 5$; (c) $h/D_{\text{jet}} = 8$

On observe également dans tous les cas une zone circulaire de transferts élevés à proximité du point d'impact et une zone de transferts plus faible à l'arrière du cylindre. La taille de cette zone

semble être plus prononcée pour une distance H/D_{jet} élevée.

On observe une homogénéisation globale du nombre de Nusselt sur la surface du cylindre lorsque la distance H/D_{jet} augmente, le jet étant de plus en plus large, les vitesses sont de plus en plus homogènes. On remarque que le nombre de Nusselt est maximal pour $H/D_{jet}=5$. En effet, le cylindre se situe alors dans la zone de fin de cône potentiel, le jet est alors pleinement développé et cette augmentation du transfert thermique est causée par une augmentation de l'intensité de turbulence [1].

4. Conclusion

Cette étude présente une étude numérique des transferts de chaleur et de l'écoulement dans une configuration d'impact d'un jet d'air sur un cylindre chauffé. Après validation du modèle numérique, l'étude du rapport de diamètres $D_{cylindre}/D_{jet}$ ainsi que la distance jet-cylindre H/D_{jet} a permis de déterminer la répartition des nombres de Nusselt locaux sur la surface entière du cylindre, les autres auteurs se focalisant généralement sur les nombres de Nusselt au point d'impact ou dans l'axe du jet. Le maximum de transfert de chaleur est situé au point d'impact. Plus le rapport de diamètres $D_{cylindre}/D_{jet}$ diminue plus le nombre de Nusselt augmente. Ce phénomène est causé par une courbure importante de la surface d'impact qui accroît l'accélération de l'écoulement causant une augmentation locale de la turbulence. Concernant le paramètre distance jet-cylindre H/D_{jet} , les transferts de chaleur augmentent avec la distance jet-cylindre H/D_{jet} jusqu'à la fin du cône potentiel soit environ $5,5D_{jet}$. Cela s'explique par une augmentation de l'intensité de turbulence. L'étude de l'influence du nombre de Reynolds sera étudiée dans la suite de ce travail.

Bibliographie:

- [1] H. Shariatmadar, A. Momeni, A. Karimi, M. Ashjaee, *Heat transfer characteristics of laminar slot jet arrays impinging on a constant target surface temperature*, Elsevier Ltd, Tehran, 2014
- [2] J.W. Gauntner, J.N.B. Livingood, P. Hrycak, *Survey of literature on flow characteristics of a single turbulent jet impinging on a flat plate*, NASA, Cleveland Ohio, 1970
- [3] W. Pitts, *Single-shot laser Mie scattering measurements of the scalar profiles in the near field of turbulent jets with variable densities*, Experiments in Fluids, USA, 1994
- [4] D.H. Lee, Y.S. Chung, D.S. Kim, *Turbulent flow and heat transfer measurements on a curved surface with a fully developed round impinging jet*, Elsevier Ltd, South Korea, 1997
- [5] D. Ravinesh, *The influence of Reynolds number on a plane jet*, Physics of Fluids, Toulouse, 2008
- [6] X.L. Wang, D. Motala, T.J. Lu, S.J. Song, T. Kim, *Heat transfer of a circular impinging jet on a circular cylinder in crossflow*, International Journal of Thermal Sciences, 2014
- [7] X.L. Wang, J.H. Lee, T.J. Lu, S.J. Song, T. Kim, *A comparative study of single-/two-jet crossflow heat transfer on a circular cylinder*, Elsevier Ltd, China South Korea and South Africa, 2014
- [8] D. Singh, B. Premachandran, S. Kohli, *Experimental and numerical investigation of jet impingement cooling of a circular cylinder*, Elsevier Ltd, New Delhi, 2013