

Etude numérique de l'influence du nombre de buses d'entrée sur la performance thermique du tube vortex

Ons TLILI EL MAY*, Inès MOKNI¹, Hatem MHIRI¹, Philippe BOURNOT²

¹ Unité Thermique et Thermodynamique des Procédés Industriels (UTTPI), ENIM, Monastir, Tunisie

² UNIMECA, Marseille, France

*(OnsTlili El May : tlili_ons@hotmail.fr)

Résumé - Le présent travail porte sur une étude numérique tridimensionnelle à l'aide du code de calcul Fluent, en vue d'étudier l'effet du nombre de buses d'entrée (nozzles) sur l'écoulement se produisant à l'intérieur du tube vortex ainsi que sur son efficacité thermique. La résolution numérique des équations adéquates d'un écoulement turbulent et tridimensionnel est basée sur l'approche RANS. Trois valeurs du nombre de buses ont été considérées dans ce travail 2, 4 et 6 en conservant à chaque cas d'étude les mêmes conditions aux limites. A l'issue de cette étude, nous avons pu démontrer que l'augmentation du nombre de buses assure une meilleure séparation des flux thermiques respectivement chaud et froid dans le tube vortex et permet par conséquent d'améliorer les performances de ce dispositif.

Nomenclature

d diamètre, mm

L longueur, mm

k énergie cinétique de turbulence, $m^2.s^{-2}$

T température, K

P pression absolue, Pa

V_0 vitesse d'admission, $m.s^{-1}$

u_i composantes de la vitesse moyenne, $m.s^{-1}$

x_i coordonnées cartésiennes ($i=1,2,3$), m

h enthalpie, $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$

m débit massique, $kg.s^{-1}$

V volume, m^3

n nombre de moles, *moles*

R constante des gaz parfaits, $J.mol^{-1}.K^{-1}$

Symboles Grecs

ε Taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence, $m^2.s^{-3}$

ρ masse volumique, $kg.m^{-3}$

μ viscosité dynamique, $kg.m^{-1}.s^{-1}$

ξ fraction massique

Indices et exposants

$\bar{\quad}$ moyenne de Reynolds

\sim moyenne de Favre

i entrée du tube vortex

h sortie du gaz chaud

c sortie du gaz froid

1. Introduction

Le tube vortex de Ranque-Hilsch (RHVT) est un dispositif thermodynamique qui se présente sous forme d'un tube creux avec une entrée où le fluide y pénètre tangentiellement à haute pression. Le RHVT possède également deux sorties placées au niveau des deux extrémités. Une des extrémités de forme cônica correspond à la sortie du flux chaud tandis que l'autre de forme circulaire permet l'évacuation du flux froid.

En raison de l'entrée tangentielle du fluide (air) comprimé, il s'établit un écoulement fortement tourbillonnaire appelé vortex principal. Le gaz s'échauffe en frappant à grande vitesse les parois du tube et s'échappe en partie par la valve cônica relative à la sortie du flux chaud. Le débit d'air refoulé vers le centre sera animé d'un vortex intérieur de diamètre réduit et donc de plus faible vitesse et sera ainsi forcé d'effectuer un chemin inverse dirigé vers

l'orifice de sortie froide permettant d'évacuer le flux froid. Un tel phénomène est désigné sous le nom d'effet de séparation de température ou d'énergie. Une vue générale de l'écoulement est donnée par la figure1.



Figure1 : Tube vortex de Ranque-Hilsch

Ce phénomène a fait l'objet de plusieurs recherches numériques et expérimentales. Une vue d'ensemble sur les études antérieures portant principalement sur les critères de conception des tubes vortex a été proposée par M.Yilmaz et al. [1] afin de fournir des informations détaillées sur ce dispositif entre autres : ses paramètres de fonctionnement, sa classification.....

Une modélisation de l'écoulement dans le tube vortex a également été menée par M. Ameni et al. [2] qui ont développé un outil numérique permettant de décrire l'écoulement dans ce dispositif; la simulation a été effectuée en utilisant le code de calcul **Fluent** utilisant un modèle de turbulence du second ordre RSM capable de décrire l'aspect turbulent de cet écoulement.

R.Shamsoddini et al. [3] ont également utilisé le code de calcul Fluent pour mener une étude numérique tridimensionnelle en vue d'étudier l'effet du nombre de buses sur l'écoulement se produisant à l'intérieur d'un tube vortex ainsi que sur l'efficacité de séparation thermique de ce dernier. Quatre valeurs du nombre de buses ont été considérées dans ce travail 2, 4, 6 et 8 en gardant à chaque fois les mêmes conditions aux limites.

A l'issue de cette étude R.Shamsoddini et al. [3] ont pu montrer que l'efficacité du tube vortex s'améliore de 8.7% en augmentant le nombre de buses à l'entrée de 2 à 8.

U. Behera et al. [4] ont utilisé le code de calcul Star-CD pour déterminer les paramètres optimaux d'un tube vortex tels que le rapport L/D, le nombre et la forme des buses d'admission, le diamètre de la sortie froide d_c , la fraction massique du fluide froid ...

Les résultats d'U. Behera et al. [4] montrent qu'un tube vortex ayant un diamètre égal à 12 millimètres et formé de six buses convergentes donne les meilleures performances. Dans ce qui suit, une contribution à la compréhension de l'écoulement dans les tubes vortex va être menée.

2. Mise en équation

La modélisation mathématique de l'écoulement tridimensionnel et tourbillonnaire est basée sur les différentes lois de conservation notamment :

L'équation de continuité :
$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

L'équation de conservation de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i)}{\partial x_j}}_{\text{Transport convectif}} = - \underbrace{\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}}_{\text{Forces dues aux pressions}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right]}_{\text{Forces de viscosité}} + \underbrace{\frac{\partial(-\overline{\rho u'_i u'_j})}{\partial x_j}}_{\text{Forces g n r es par la turbulence}} + \underbrace{F_i}_{\text{Forces de volume}} \quad (2)$$

Pour les relier à l'écoulement moyen, on a recours au concept de Boussinesq qui permet de les exprimer en fonction des gradients des vitesses moyennes :

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\bar{\rho} k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

L'équation de conservation de l'énergie:

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{T})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{T})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_j T''} \right) + S_h \quad (4)$$

Avec S_h : *Energie due à la réaction chimique et au rayonnement*

Loi des gaz parfaits : $PV = nRT$ (5)

3. Etude numérique

Le tube vortex étudié est à contre-courant possédant pour entrées 6 buses tangentielles par rapport au tube de forme tubulaire (*nozzles*) et deux sorties : l'une est de forme c nique plac e à l'extrémité chaude du tube, l'autre étant cylindrique plac e à l'extrémité froide.

Une vue générale du dispositif est donn e sur la figure 2 :

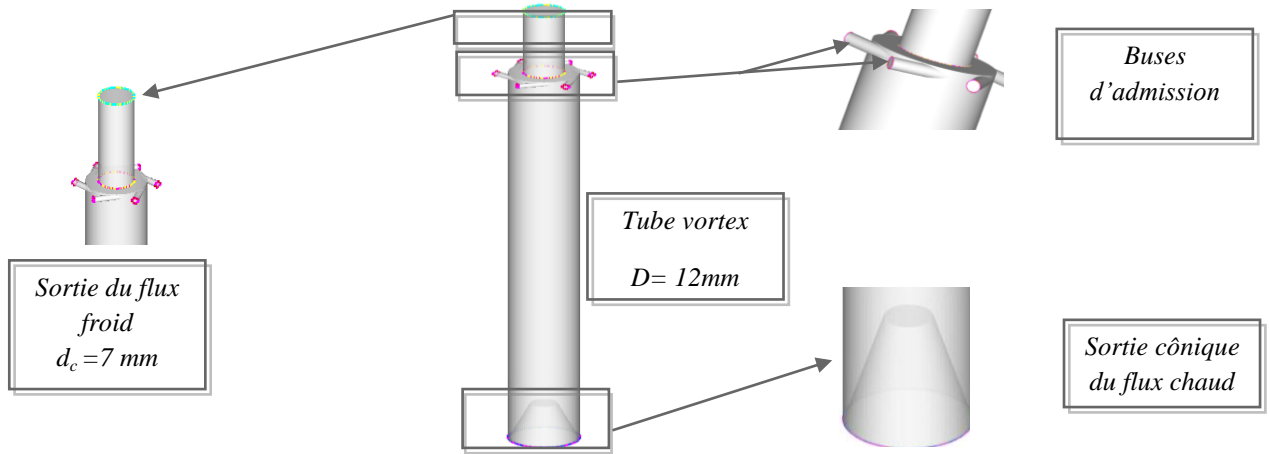


Figure 2 : Vue générale du tube vortex étudié

Le maillage du domaine est constitué de 460 131 volumes de contrôle. Afin d'éviter les erreurs numériques et disposer d'un maillage qui s'adapte bien à la géométrie consid r e, les cellules hexaédriques ont été pr f r es à celles tétraédriques, ce maillage est suffisamment fin au niveau des zones d'entrée et de sortie avec un pas d'espace de $1.6 \cdot 10^{-4} m$, et moins serré (large) dans le reste du tube où il est presque uniforme avec des cellules espac es de $7.3 \cdot 10^{-4} m$

La résolution des équations (2), (3) et (4) gouvernant l'écoulement dans un tube vortex ne peut s'effectuer de manière succincte qu'après avoir fixé convenablement les conditions

aux limites géométriques du problème traité qui, en se référant aux données d'Upendra et al. [4] se présentent comme suit :

	<i>Pression (10^5 Pa)</i>	<i>Température (K)</i>
<i>Entrée</i>	5,42	300
<i>Sortie du flux chaud</i>	<i>Pression atmosphérique</i>	<i>(résultat à trouver)</i>
<i>Sortie du flux froid</i>	<i>A faire varier pendant les simulations</i>	<i>(résultat à trouver)</i>

Tableau1 : Conditions aux limites du problème étudié

4. Résultats et discussions

On analyse dans cette partie l'influence du nombre de buses d'entrée sur l'écoulement interne du tube vortex, l'effet d'un tel paramètre a fait l'objet de plusieurs travaux aussi bien expérimentaux que numériques, à l'issue de ces diverses études [3], [4]...Il a été démontré que l'augmentation du nombre de buses favorise considérablement la séparation d'énergie dans le tube vortex et permet par conséquent d'améliorer les performances du dispositif.

On essayera dans ce qui suit de confirmer ces constatations par une modélisation numérique d'un tube vortex ayant un nombre de 2, 4 ou 6 buses cylindriques à l'entrée. L'ensemble des configurations étudiées est donnée sur la figure 3.

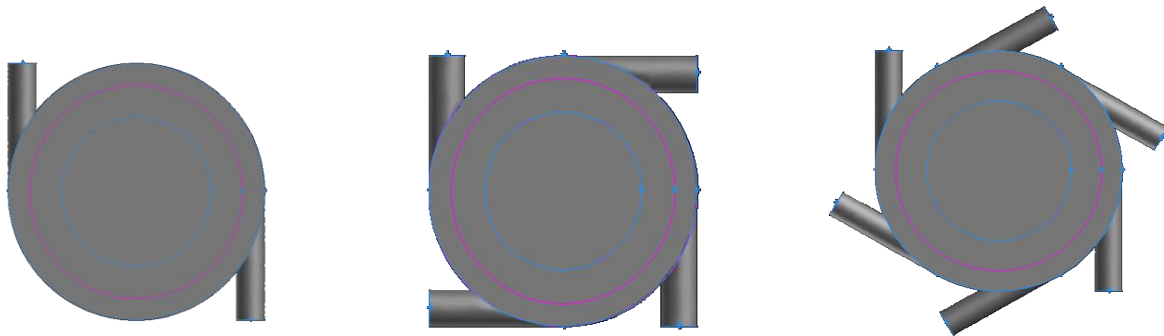


Figure 3 : Variation du nombre de buses à l'entrée

4.1. Effet du nombre de buses sur le champ dynamique de l'écoulement :

4.1.1 Distribution générale de la vitesse :

Un des avantages de l'analyse numérique tridimensionnelle est que l'étude de l'écoulement à l'intérieur de la buse devient accessible ce qui nous permet d'avoir une idée sur la structure générale de l'écoulement. La figure 4 montre que la vitesse n'est pas modifiée par l'augmentation ou la diminution du nombre de buses à l'entrée.

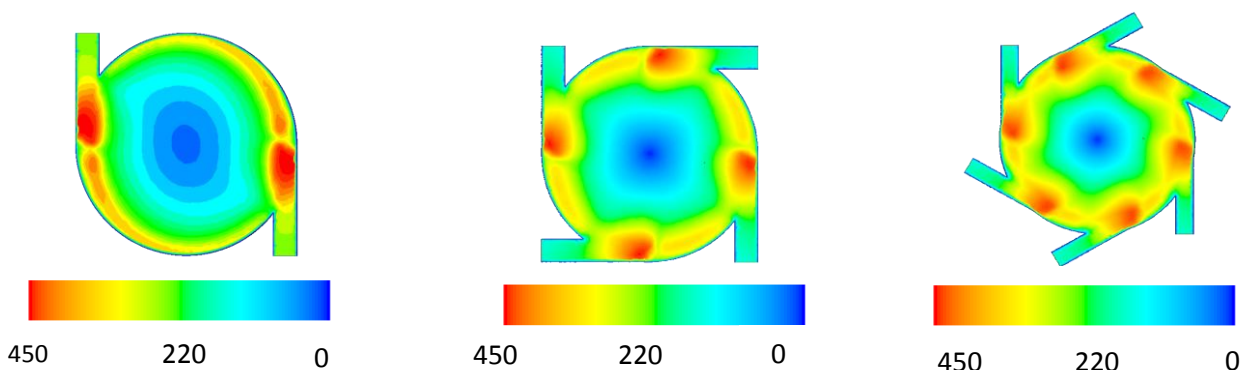


Figure 4 : Distribution générale de la vitesse tangentielle au niveau des entrées du tube vortex (en $m.s^{-1}$)

4.1.2 Lignes de courant :

Pour compléter l'analyse du mécanisme de séparation de l'énergie, nous avons tracé sur la figure 5 les lignes de courant dans une section du tube vortex correspondant au plan $x=0$ et ce pour tous les cas considérés.

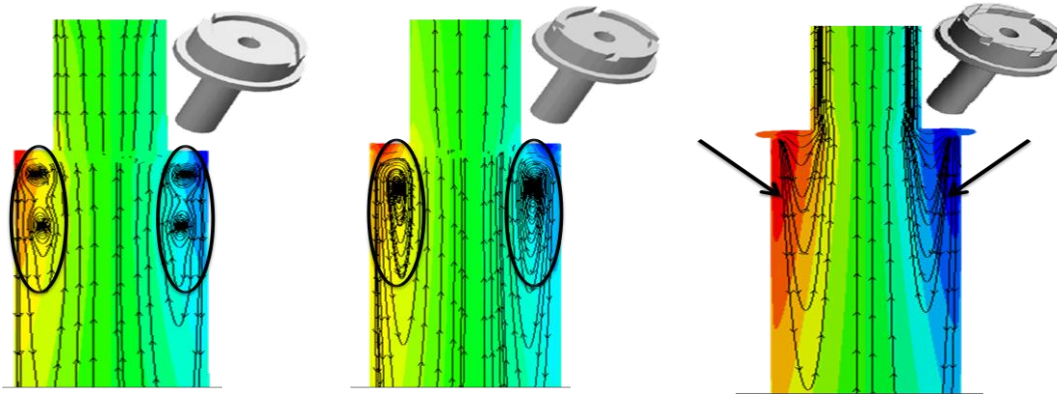


Figure 5 : Lignes de courant observées pour différents nombres de buses à l'entrée

Ces différentes figures nous permettent de constater que l'aspect général des lignes de courant semble le même pour tous les nombres de buses considérés ; en effet on voit bien que les lignes de courant près de la paroi se dirigent vers la sortie chaude ce qui correspond au vortex périphérique, alors que les lignes centrales sont dirigées vers la sortie froide formant ainsi le vortex secondaire ou central. Cependant en observant bien la figure on remarque, vers la sortie des buses d'entrée la formation de quelques vortex réguliers (zones de recirculations) dont le nombre et la forme ont tendance à diminuer en augmentant le nombre de buses.

Plusieurs études notamment celle de R.Shamsoddini et al. [3] ont traité cet effet, et affirment que ces vortex détériorent la séparation thermique dans le tube vortex puisqu'ils sont responsables du confinement de l'écoulement et au mixage des flux chaud et froid à l'intérieur du tube vortex. La réduction de ces vortex engendre une meilleure séparation entre les deux flux, ce qui améliore nettement l'efficacité du dispositif. En effet, dans un tube vortex avec six buses on remarque l'absence de tels vortex près de la paroi, seulement un vortex est généré au centre.

4.2. Effet du nombre de buses sur la séparation thermique du tube vortex :

On s'intéresse dans ce qui suit à la détermination du nombre optimal d'entrées qui permet d'atteindre à la fois les températures les plus élevées du fluide chaud et celles les plus basses pour le fluide froid. Il est à noter qu'initialement le fluide pénètre dans le tube vortex à la température ambiante (300K) et sous forte pression. La séparation thermique qui s'y établit est principalement due au transfert de chaleur entre les composantes des deux vortex respectivement périphérique et central qui y naissent.

4.2.1 Température du fluide chaud :

La figure 6 donne un aperçu général sur l'évolution des températures à la sortie de la valve cônica qui correspond à l'extrémité chaude du dispositif : On peut constater que l'augmentation du nombre de buses à l'entrée améliore les performances de chauffage du dispositif puisque les températures maximales obtenues par la simulation numérique sont obtenues pour la configuration du tube vortex à 6 buses qui a permis d'atteindre une température maximale de 350 K.

4.2.2 Température du fluide froid :

Pour compléter l'analyse de l'effet du nombre de buses sur la séparation thermique, nous devons à présent voir l'évolution de la température du fluide à la sortie de l'orifice froid.

La figure 7 donne les différentes évolutions obtenues pour les trois configurations étudiées (2, 4 et 6 buses). En comparant les valeurs des températures obtenues par les différentes configurations étudiées, on voit clairement que celles obtenues par la configuration à 6 buses sont les plus basses puisque la température minimale pour cette configuration a été de 275 K.

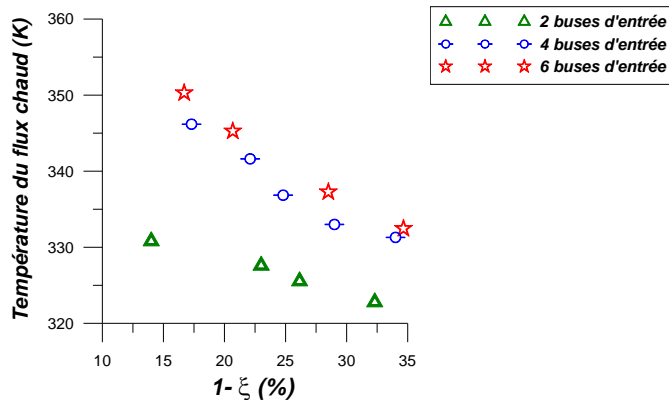


Figure 6 : Evolution de la température du fluide chaud pour différents nombre de buses

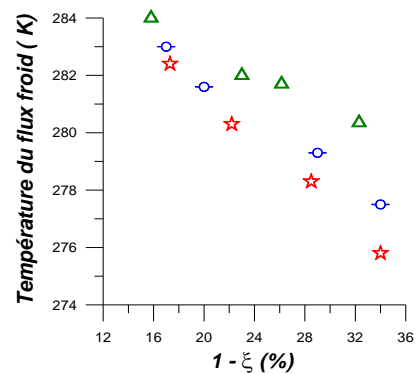


Figure 7: Evolution de la température du fluide froid pour différents nombre de buses

5. Conclusion

A l'issue de cette étude tridimensionnelle de l'effet du nombre de buses d'entrée sur les performances thermiques du tube vortex, on peut conclure que l'augmentation de ce paramètre favorise nettement le mécanisme de séparation des flux thermiques respectivement chaud et froid à partir d'un simple jet de gaz comprimé.

D'après la comparaison des résultats obtenus par la variation du nombre d'entrées, on peut dire que le cas de 6 entrées permet de réaliser la plus grande différence de température entre les deux sorties qui atteint **74,5 K**, donc finalement l'augmentation du nombre d'entrées tangentielles favorise d'une part la séparation des deux vortex à l'intérieur du dispositif et permet ainsi d'assurer une meilleure séparation thermique, cette constatation a été vérifiée aussi bien expérimentalement que numériquement par de nombreux travaux comme ceux de R. Shamsoddini et al. [3], U. Behera et al. [4].

References

- [1] M. Yilmaz, M. Kaya, S. Karagoz, S. Erdogan, A review on design criteria for vortex tubes, *Heat Mass Transfer*, vol.45, 2009, p 613–632, DOI 10.1007.
- [2] Mohammad Ameri, Behrooz Behnia, The study of key design parameters effects on the vortex tube performance, *Journal of Thermal Science*, vol.18, 2009, p 370–376.
- [3] Rahim Shamsoddini, Alireza Hossein Nezhad, Numerical analysis of the effects of nozzles number on the flow and power of cooling of a vortex tube, *International Journal of Refrigeration*, 2009, p 1-9.
- [4] Upendra Behera, P.J. Paul, S. Kasthuriangan, R. Karunanithi, S.N. Ram, K. Dinesh, S. Jacob, CFD analysis and experimental investigations towards optimizing the parameters of Ranque–Hilsch vortex tube, *International journal of heat and mass transfer*, vol.48, n°10,2005, p.1961-1973.