

# Caractérisation du mélange dans un éjecteur supersonique destiné à la réfrigération solaire

M. Dandani<sup>1, a</sup>, A.Ghezal<sup>1, b</sup>, A. Bouhanguel<sup>2, c</sup>, V. Lepiller<sup>3, d</sup>, P. Desevaux<sup>3, e</sup>

<sup>1</sup>LMFTA, USTHB, Alger, Algérie

<sup>2</sup>SPE-UMR CNRS 6134, Université de Corse, Ajaccio, France

<sup>3</sup>FEMTO-ST-UMR CNRS 6174, Dép. Energie, Université de Franche-Comté, Belfort, France

<sup>a</sup>moundir.dandani@gmail.com; <sup>b</sup>abdghezal@yahoo.fr, <sup>c</sup> bouhanguel@univ-corse.fr, <sup>d</sup>valerie.lepiller@univ-fcomte.fr, <sup>e</sup>philippe.desevaux@univ-fcomte.fr

---

## Résumé

Cette étude concerne le développement d'outils numériques permettant d'analyser le processus de mélange entre les jets primaire et induit dans un éjecteur supersonique destiné à la réfrigération solaire par éjecto-compression. L'approche scientifique repose sur des simulations CFD de l'écoulement dans un éjecteur 2D axisymétrique. Après une validation des simulations s'appuyant sur des données expérimentales recueillies sur banc d'essai, deux approches permettant d'analyser numériquement la qualité du mélange dans l'éjecteur sont comparées. La première approche consiste à suivre l'évolution des distributions radiales de la vitesse le long de la chambre de mélange de l'éjecteur. La seconde repose sur l'observation du développement de l'énergie cinétique turbulente dans les zones d'interaction entre les flux primaire et secondaire. Bien que cette étude soit menée sur un éjecteur air /air, les méthodes proposées doivent être applicables à d'autres gaz et permettre à terme une étude de l'amélioration du processus de mélange dans les éjecteurs.

Mots-clefs : Ejecteur supersonique, mélange, CFD, réfrigération solaire

---

## 1. Introduction

L'utilisation de l'énergie solaire peut s'avérer un moyen intéressant pour produire du froid par le biais d'un cycle thermodynamique tritherme. Plusieurs technologies sont possibles pour mettre en œuvre un tel cycle, notamment la technique de réfrigération par éjecto-compression [1-3].

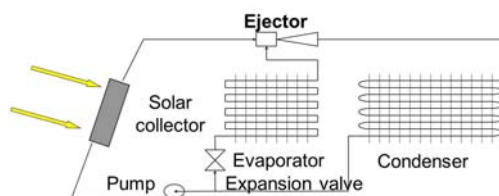


Fig.1. Principe de la réfrigération solaire par éjecto-compression

Une installation de réfrigération solaire par éjecteur (Fig. 1) est constituée de deux circuits de fluide. Le premier cycle fluide récupère l'énergie solaire pour assurer la production de vapeur d'un second fluide à l'aide d'un générateur ou bouilleur (collecteur solaire). Ce second fluide sert à la production de froid au niveau de l'évaporateur. Dans un tel dispositif, l'éjecteur remplace le compresseur mécanique d'un

système conventionnel. L'énergie fournie au éjecteur provient de la vapeur générée par le bais de l'énergie solaire.

L'élément clef d'un tel système est l'éjecteur supersonique. Un des critères de performance des éjecteurs porte sur leur capacité à mélanger rapidement les flux moteur et induit. La littérature sur les éjecteurs propose un certain nombre d'études traitant de l'amélioration du processus de mélange soit par des méthodes passives [4, 5], soit par des méthodes actives [6, 7]. Toutefois, la capacité de mélange d'un éjecteur reste une propriété difficilement quantifiable. La simple observation de grandeurs classiques telles que pressions et débits s'avère insuffisante et l'analyse de ce processus repose souvent sur la visualisation qualitative de l'écoulement [8, 9]. L'obtention d'informations quantitatives sur le mélange nécessite alors une analyse plus détaillée de l'écoulement dans l'éjecteur. La CFD peut s'avérer être un outil précieux dans ce domaine. En effet, outre la possibilité de visualiser numériquement l'écoulement, la simulation CFD permet également de suivre l'évolution du profil radial de la vitesse le long de la chambre de mélange de l'éjecteur [10]. L'analyse des profils de vitesse et notamment de leurs éventuelles discontinuités donne des informations sur l'interaction entre les deux écoulements et sur leur mélange.

L'objectif de cette étude concerne le développement d'outils numériques permettant d'analyser le processus de mélange entre les jets primaire et induit et de quantifier la qualité du mélange. L'approche scientifique repose essentiellement sur des simulations CFD de l'écoulement dans un éjecteur air / air, 2D axisymétrique, en prenant en compte la turbulence par des modèles RANS. Après une validation des simulations s'appuyant sur des données expérimentales recueillies sur banc d'essai, deux approches permettant d'analyser numériquement la qualité du mélange dans l'éjecteur sont comparées. La première approche consiste à suivre l'évolution des distributions radiales de la vitesse le long de la chambre de mélange de l'éjecteur. La seconde repose sur l'observation du développement dans les zones d'interaction entre les flux primaire et secondaire.

## 2. Modèle CFD

### 2.1. Configuration de l'éjecteur étudié

L'éjecteur considéré dans cette étude est constitué de deux tuyères coaxiales (Fig. 2). Un compresseur à vis délivrant une pression maximale de 6 bar alimente la tuyère primaire qui détend l'air et l'accélère à une vitesse supersonique à sa sortie (Mach = 2,3), ce qui permet l'aspiration du flux secondaire à travers trois entrées disposées à 120° au tour de la chambre de tranquillisation.

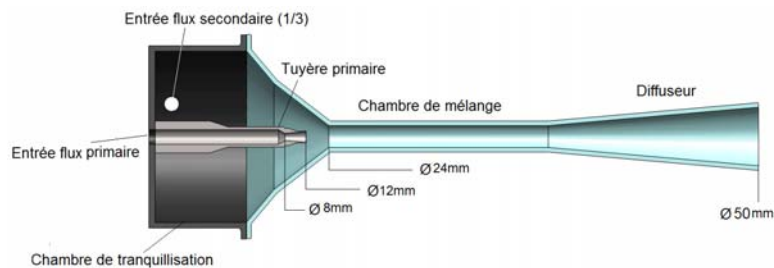


Fig. 2. Schéma de l'éjecteur

Les deux flux d'air primaire et secondaire se mélangent ensuite dans la chambre de mélange en subissant un processus de recompression plus ou moins complexe et dépendant entre autre de la pression génératrice primaire et la géométrie de l'éjecteur. Le mélange est ensuite refoulé par le diffuseur dans le milieu atmosphérique. Le rapport géométrique  $A$ , correspondant au rapport de la section radiale de la chambre de mélange à la section au col de la tuyère primaire, est égal à 9. La longueur de la chambre de mélange est égale à 240 mm.

## 2.2. Conditions de simulation numérique

Les simulations sont réalisées à l'aide du code CFD Ansys-Fluent. Compte tenu de la géométrie de l'éjecteur, le domaine d'étude est considéré pour cette étude comme 2D axisymétrique (Fig. 3). Une condition au limite de type *pressure-inlet* est imposée à l'entrée de la tuyère primaire. Au niveau l'aspiration du flux secondaire, une section annulaire équivalente accompagnée d'une condition de type *mass-flow inlet* est utilisée pour cette étude. La valeur de débit imposée est celle mesurée expérimentalement sur le banc d'essai. Une condition de type *pressure-outlet* est fixée à la sortie du diffuseur correspondant à un refoulement à la pression atmosphérique. Les parois de l'éjecteur sont considérées comme adiabatiques. Le maillage utilisé, de type structuré, est composé d'environ 110000 éléments. Les équations Navier-Stokes sont résolues à l'aide du solveur *pressure-based*, avec couplage pression-vitesse et selon un schéma de discrétisation au second ordre. La turbulence de l'écoulement est prise en compte par trois modèles RANS : le modèle k-epsilon standard et les modèles k-omega standard et k-omega SST particulièrement bien adaptés aux écoulements compressibles de type jets circulaires avec cisaillement [11].

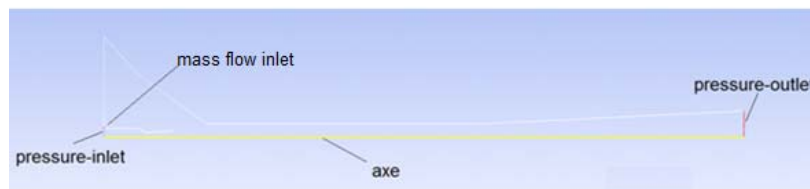


Fig. 3. Domaine d'étude et conditions aux limites

## 2.3. Validation des simulations

La validation des simulations CFD est réalisée en comparant les distributions axiales de la pression statique obtenues numériquement avec différents modèles de turbulence et expérimentalement sur banc d'essai. Les mesures expérimentales ont été réalisées en utilisant une sonde d'exploration de la pression spécifiquement conçue à cet effet [12]. Une comparaison pour deux valeurs de la pression génératrice primaire  $P_1$  (3 et 4 bar), est présentée sur la figure 4. Pour ces deux valeurs de pression relativement faible et compte tenu du rapport géométrique  $A = 9$  de l'éjecteur étudié, l'écoulement est caractérisé par la formation d'un train de chocs obliques en sortie de tuyère primaire, qui s'atténue ensuite dans la chambre de mélange. L'éjecteur fonctionne alors en régime mixte, c'est-à-dire avec un flux primaire supersonique en sortie de tuyère motrice et un flux secondaire qui reste quant à lui subsonique.

La figure 4 montre un bon accord entre les résultats numériques et les mesures. C'est le modèle k-epsilon standard qui donne les résultats les plus proches de l'expérimentation, notamment en ce qui concerne le nombre de chocs obliques et leur intensité.

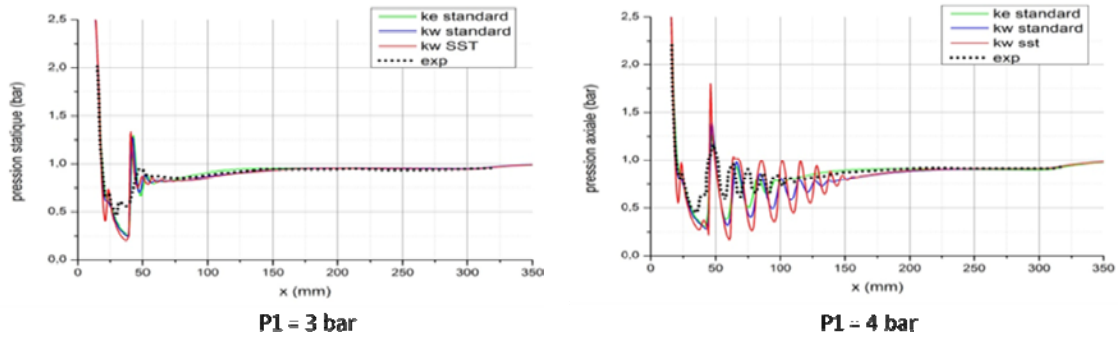


Fig.4. Distribution axiale de la pression statique pour deux valeurs de la pression génératrice primaire.

### 3. Caractérisation du mélange

#### 3.1. Evolution de la distribution radiale de la vitesse le long de l'éjecteur

La première approche considérée pour examiner le processus de mélange au sein de l'éjecteur consiste à comparer les distributions radiales de la vitesse obtenues numériquement. Les trois graphes présentés sur la Fig. 5 correspondent respectivement à des pressions génératrices primaires de 3, 4 et 5 bar. Les profils de vitesse couvrent toute la section de la chambre de mélange de diamètre 24 mm. Les positions A, B, C, D et E correspondent respectivement aux abscisses de 40, 70, 200, 308 et 538 mm le long de la chambre de mélange. On rappelle que l'abscisse de 40 mm correspond à la sortie de la tuyère primaire, l'abscisse de 70 mm à l'entrée de la chambre de mélange, l'abscisse de 308 mm à sa sortie et enfin que l'abscisse de 538 mm correspond à la section de sortie de l'éjecteur. Pour la pression génératrice  $P_1 = 3$  bar, le profil radial en sortie de tuyère motrice (section A) est non uniforme. La vitesse est maximale (de l'ordre de 399 m/s) au cœur de l'écoulement. Elle correspond au jet primaire débouchant de la tuyère motrice. Le flux induit en périphérie de ce jet est caractérisé par une vitesse faible n'excédant pas la valeur de 9 m/s. Il est à noter l'existence au niveau de la section A de singularités sur la distribution de vitesse près de l'axe de l'éjecteur, qui sont sans doute dues à la présence d'un choc oblique. Au fur et à mesure que l'écoulement progresse dans la chambre de mélange, le profil de vitesse tend à s'homogénéiser lorsque le mélange entre les flux primaire et secondaire s'opère. La distribution radiale de la vitesse est uniforme à la sortie de cette chambre correspondant à l'abscisse D, ce qui indique que le mélange est complet entre les deux flux. Le diffuseur décélère ensuite ce mélange qui est refoulé à une vitesse d'environ 35 m/s. Le profil de vitesse obtenu dans la section D montre que le mélange est complètement réalisé à la sortie de la chambre de mélange. Les résultats obtenus en augmentant la pression génératrice primaire à 4 puis 5 bar confirment ces observations. La valeur de la vitesse du flux induit continue à augmenter régulièrement. Par contre, la vitesse du jet primaire en sortie de tuyère motrice tend à se stabiliser à une valeur proche de 568 m/s, correspondant à la valeur du nombre de Mach de 2,3 pour lequel est dimensionnée la tuyère motrice. Pour toutes les pressions primaires testées, le mélange des flux primaire et secondaire semble être totalement réalisé à la sortie de la chambre de mélange. Cette chambre remplit donc parfaitement son rôle. Le diffuseur se charge ensuite de décélérer le mélange avant son refoulement à l'atmosphère. Il apparaît de cette première

analyse que l'évolution de la distribution radiale de la vitesse peut donner des informations sur le processus de mélange dans l'éjecteur.

### 3.2. Evolution de l'énergie cinétique turbulente le long de la chambre de mélange

L'interaction du jet supersonique avec le flux secondaire qui est entraîné avec une vitesse plus faible crée une couche limite entre les deux écoulements. Cette couche limite appelée couche limite de mélange est caractérisée par un fort cisaillement. Ce cisaillement délimite les zones non mélangées des zones mélangées. Ce cisaillement étant le siège de forte production d'énergie cinétique de turbulence  $k$ , nous avons donc suivi l'évolution de cette énergie le long de la chambre de mélange de l'éjecteur. Les résultats présentés sur la Fig. 6 concernent trois valeurs de la pression génératrice (3, 4 et 5 bar). Les positions A, B, C, D et E correspondent respectivement aux abscisses de 40 mm indiquant la sortie de tuyère motrice, de 70 mm indiquant l'entrée de la chambre de mélange, de 150 et 200 indiquant l'intérieur de la chambre de mélange et de 308 mm indiquant la sortie de la chambre de mélange cylindrique. Les résultats obtenus pour les trois valeurs de la pression  $P_1$  considérées sont comparables. Ils mettent tous en évidence un profil radial de l'énergie cinétique turbulente à double lobes en sortie de tuyère motrice notamment. Ces maximums d'énergie, qui augmentent avec la pression  $P_1$ , correspondent aux zones de cisaillement entre les flux moteur et induit. Dans la section A, l'énergie cinétique turbulente est nettement plus faible et homogène sur l'axe de l'éjecteur et en périphérie de tube de mélange. Ces deux régions correspondent respectivement au jet primaire et au flux secondaire qui ne subissent pas d'interaction entre eux. Dans la section B confondue avec l'entrée de la chambre de mélange cylindrique, ces zones à faible énergie turbulente commencent à se réduire au profit de la zone d'interaction entre les deux flux qui s'élargit au fur et à mesure que l'écoulement progresse dans la chambre de mélange. Les profils relatifs aux sections C et D confirment l'élargissement de cette zone d'interaction. Pour la pression  $P_1$  de 3 bar, la distribution de l'énergie turbulente présente une forme quasi parabolique. Les profils relatifs aux pressions plus élevées ( $P_1 = 4$  et 5 bar) conservent encore leur forme en double lobes. Cependant, l'ensemble des résultats à cette section montre que la production de l'énergie turbulente s'est très nettement accrue au cœur de l'écoulement. Enfin, les résultats obtenus à l'extrémité de la chambre de mélange correspondant à la section E montrent des distributions radiales de l'énergie de turbulence sensiblement uniformes et de faible intensité. Cela prouve que le cisaillement entre les deux flux a presque disparu et semble indiquer que le mélange est presque achevé. La Fig. 7 montre une comparaison du champ de l'énergie cinétique turbulente avec une visualisation expérimentale de l'écoulement, dans le cas d'une pression génératrice primaire de 4 bar. La visualisation expérimentale présentée ici a été réalisée sur le banc d'essai du laboratoire au cours d'une étude précédente [13]. Elle a été obtenue par tomographie laser en introduisant des traceurs dépolarisants dans le flux induit. La région d'écoulement marquée par ces traceurs diffusants apparaît donc en clair sur la photographie. Par contre, la zone centrale qui apparaît en sombre, correspond à la portion de flux primaire qui ne s'est pas mélangée avec le flux induit. La longueur de cette zone d'écoulement représente donc la longueur nécessaire au mélange complet entre les deux flux. En comparant cette image avec le champ d'énergie cinétique turbulente obtenu par CFD, on constate un bon accord visuel entre cette zone sans mélange et la région (de couleur bleue) caractérisée par une faible valeur de  $k$ . La corrélation entre zone sans mélange et zone à faible valeur d'énergie cinétique turbulente semble se confirmer. La Fig. 8 présente l'évolution de l'énergie cinétique turbulente le long de l'axe de l'éjecteur. Cette distribution, obtenue numériquement, est relative à une pression génératrice primaire  $P_1 = 5$  bar. Elle montre une zone d'écoulement située en sortie de tuyère primaire où la production d'énergie turbulente reste faible. Cette zone est donc à rapprocher de la zone sans mélange visualisée expérimentalement. Lorsque les deux flux interagissent en se mélangeant, cela se

traduit par une augmentation de l'énergie cinétique turbulente. Cette augmentation est clairement visible à partir de l'abscisse de 130 mm. L'énergie turbulente est alors multipliée par un facteur 4 sur une distance d'écoulement de 20 mm.

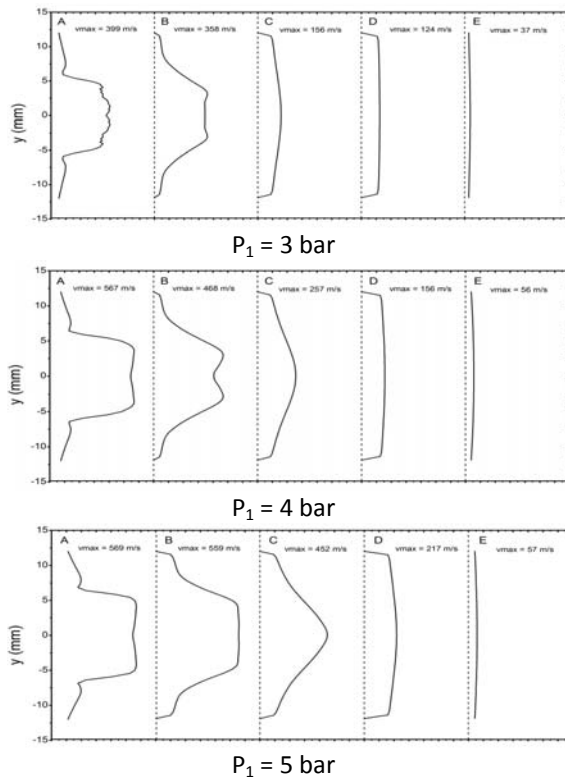


Fig. 5. Evolution des distributions radiales de la vitesse le long de la chambre de mélange pour différentes pressions  $P_1$

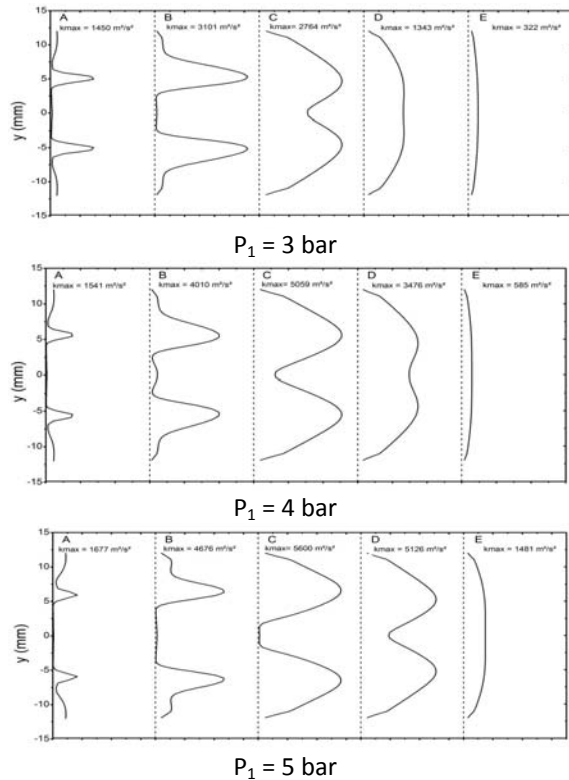


Fig. 6. Evolution des distributions radiales de l'énergie cinétique turbulente le long de la chambre de mélange pour différentes pressions  $P_1$

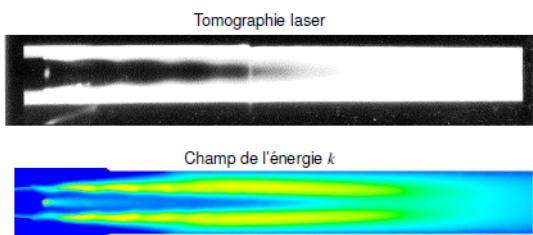


Fig. 7. Tomographie laser [13] vs champ de l'énergie cinétique turbulente ( $P_1 = 4$  bar).

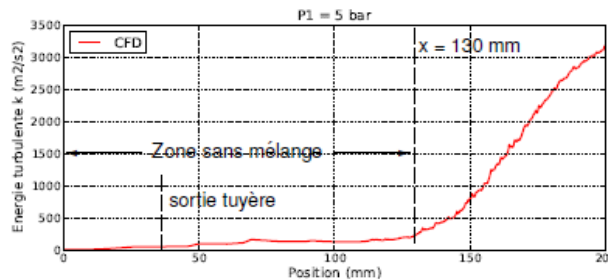


Fig. 8. Distribution axiale de l'énergie cinétique turbulente ( $P_1 = 5$  bar).

#### 4. Conclusion

Bien que la présente étude est menée sur un éjecteur supersonique à air /air, les méthodes proposées pour l'évaluation de la qualité du mélange sont toutefois applicables à d'autres gaz ce qui permet à terme de mener des études relatives à l'amélioration du processus de mélange dans les éjecteurs. Cette étude, basée sur une modélisation 2D axisymétrique de l'écoulement, a montré que l'analyse de l'évolution des distributions radiales de la vitesse et de l'énergie cinétique turbulente le long de l'éjecteur peut fournir des informations sur le processus de mélange entre les flux primaire et secondaire. Les différents résultats numériques obtenus présentent entre eux une bonne cohérence. Ils montrent que le mélange est complétement réalisé à l'entrée du diffuseur, confirmant ainsi que la chambre de mélange rempli parfaitement son rôle. Par ailleurs, l'évolution de l'énergie cinétique turbulente semble fournir des informations correctes sur la zone sans mélange. Les résultats obtenus en comparant les champs de l'énergie cinétique turbulente aux visualisations expérimentales sont en effet en bon accord. Toutefois, il semble difficile de pouvoir conclure définitivement quant à la fiabilité de ces critères pour caractériser le mélange. Une analyse plus poussée s'appuyant en particulier sur des résultats expérimentaux est donc nécessaire pour pouvoir conclure quant au critère le plus judicieux pour caractériser le mélange dans l'éjecteur.

#### References

- [1] Chunnanond K and Aphornratana S. Ejectors. Applications in refrigeration technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2004;8:129–155.
- [2] Paridasawas W. *Solar-Driven refrigeration systems with focus on the ejector cycle*. PhD thesis, KTH Royal institute of technology; 2006.
- [3] Nedjar M, Hachemi M. *La réfrigération solaire par cycle à éjecteur*. Editions universitaires européennes; 2011.
- [4] Charyulu B, Kurian J, Venugopalan P, and Sriramulu V. Experimental study on mixing enhancement in two dimensional supersonic flow. *Experiments in fluids* 1998;24 :340–346.
- [5] Hari S and Kurian J. Effectiveness of secondary tabs for supersonic mixing. *Experiments in fluids* 2001;32:302–308.
- [6] Murakami E and Papamoschou D. Experiments on mixing enhancement in dual steam jets. AIAA-2001-0668, AIAA 39th Aerospace Sciences Meeting, January 2001, Reno, Nevada.
- [7] Hidetaka O, Hisashi H, Myeong-Kwan P, Shuzo O, and Ryuichiro Y. Control of pseudo-shock by slot injection. *Japan Society of Mechanical Engineers* 2002;45:150–157.
- [8] Desevaux P. A method for visualizing the mixing zone between two co-axial flows in an ejector. *Optics and Lasers Engineering* 2001;35:317–323.
- [9] Rao M, Srisha V, and Jagadeesh G. Visualization and image processing of compressible flow in a supersonic gaseous ejector. *Journal of the Indian Institute of Science* 2013; 93:57–66.
- [10] Al-Doori G.F. *Investigation of refrigeration system steam ejector performance through experiments and computational simulations*. PhD thesis, University of Southern Queensland, 2013.
- [11] Wilcox DC. *Turbulence modeling for CFD*. 2<sup>nd</sup> ed. DCW Industries; 1998.
- [12] Bouhanguel A. *Etude numérique et expérimentale de l'interaction entre deux écoulements compressibles dans un éjecteur supersonique*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2013.
- [13] Desevaux P, Prenel J.P, and Hostache G. Flow visualization methods for investigating an induced flow ejector. *Journal of Flow Visualization and Image Processing* 1995;2:61–74.