



HAL
open science

Etude numérique et expérimentale du processus de recompression le long d'un éjecteur supersonique

Ala Bouhanguel, Philippe Desevaux, Eric Gavignet

► **To cite this version:**

Ala Bouhanguel, Philippe Desevaux, Eric Gavignet. Etude numérique et expérimentale du processus de recompression le long d'un éjecteur supersonique. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. <hal-03422642>

HAL Id: hal-03422642

<https://hal.science/hal-03422642v1>

Submitted on 9 Nov 2021

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.



HAL Authorization

Etude numérique et expérimentale du processus de recompression le long d'un éjecteur supersonique

A. BOUHANGUEL, P. DESEVAUX, E. GAVIGNET

Institut FEMTO-ST, Département ENISYS, Parc Technologique, 2 Avenue Jean Moulin, 90000 BELFORT

Résumé :

Les éjecteurs supersoniques sont soumis à un processus de recompression par chocs qui influe sensiblement sur leurs performances. Ce processus complexe est analysé expérimentalement en suivant l'évolution de la pression statique le long de l'axe de l'éjecteur. Le système de mesure, spécifiquement développé à cet effet, consiste en un tube capillaire, doté d'un orifice permettant la prise de la pression, et pouvant se translater le long de l'éjecteur. Des simulations numériques avec et sans présence de la sonde de pression sont également réalisées. L'influence de différents modèles de turbulence RANS est également analysée. Les résultats expérimentaux et numériques obtenus sont en très bonne cohérence. Les simulations numériques mettent notamment en évidence l'effet intrusif de la sonde sur l'écoulement qui explique le léger décalage dans le nombre et l'amplitude des chocs.

Abstract :

Supersonic ejectors are subjected to a process of recompression by shocks which influences their performances significantly. This complex process is investigated experimentally by following the evolution of the static pressure along the ejector axis. The measurement device, specifically developed for this purpose, consists of a thin tube equipped with a small hole to capture the static pressure, and which can translate along the ejector axis. Numerical simulations are also carried out with and without presence of the pressure probe. The influence of various RANS turbulence models is also analyzed. The experimental and numerical results obtained are in very good coherence. The numerical simulations show the intrusive effect of the pressure probe on the flow pattern which explains the slight difference in the number and the amplitude of the shocks.

Mots clefs : Ejecteur, Supersonique, Structure de chocs, CFD, Capteur de pression

1 Introduction

Les éjecteurs sont des appareils à jets supersoniques qui utilisent l'effet d'entraînement du jet supersonique primaire pour générer une succion sur un fluide secondaire. Cette succion peut se traduire par une diminution de la pression du fluide aspiré et/ou par une mise en mouvement du fluide secondaire [1]. Les éjecteurs sont couramment utilisés dans une grande variété d'applications [2] : pompes à vide, éjecto-compresseurs, séparateurs de fluides, augmentation de poussée de propulseurs, ...

Ces appareils, généralement de conception simple et robuste, sont le siège d'écoulements très complexes du fait des nombreux phénomènes physiques qui entrent en jeu (interaction entre des flux supersonique et subsonique, chocs, mélange, instabilités, ...). Parmi les phénomènes complexes rencontrés, le processus de recompression par succession de chocs qui caractérisent les éjecteurs supersoniques conditionne de façon sensible les performances de ces appareils [3]. Ce processus de recompression est délicat à analyser, en particulier expérimentalement. En effet les mesures de la pression statique dans les tuyères et éjecteurs sont généralement réalisées au moyen de prises de pression pariétales [4, 5]. Cette technique, certes non intrusive, ne permet pas de mesurer la pression de façon continue le long de l'écoulement, mais en un nombre bien déterminé de points correspondant aux prises de pression. De plus, cette méthode ne permet pas d'obtenir la pression interne de l'écoulement, notamment la pression régnant au sein d'un flux supersonique entouré d'un flux secondaire annulaire dans un éjecteur à flux induit [6].

Une solution pour pallier ces limites consiste à insérer une fine sonde de pression sur l'axe de l'éjecteur. L'appareillage développé au sein de notre laboratoire et les premiers résultats obtenus sur un éjecteur supersonique à air induit sont présentés dans cette étude. Les relevés de pression sont comparés à des simulations numériques de l'écoulement, réalisées avec et sans présence de la sonde, afin notamment d'évaluer le caractère intrusif du système de mesure. Deux modèles de turbulence RANS sont également testés au cours de nos simulations CFD.

2 Dispositif expérimental

Les essais sont menés sur le banc d'essai d'éjecteurs disponible au département ENISYS. Il est composé principalement de l'éjecteur à étudier, monté sur un bâti de fixation, et d'un compresseur à vis relié à un sécheur permettant d'alimenter l'éjecteur en air sec sous une pression maximale de 7 bar. L'éjecteur considéré lors de cette étude est constitué de deux tuyères convergentes-divergentes coaxiales (figure 1). La tuyère primaire est alimentée par de l'air à une pression génératrice P_1 . Cet air se détend à travers cette première tuyère jusqu'à une vitesse supersonique (nombre de Mach de 2,3 en sortie de tuyère primaire), ce qui permet l'entraînement d'un second flux d'air appelé flux secondaire ou induit. Ce flux induit est aspiré au travers de 3 entrées disposées à 120° autour de la chambre de tranquillisation secondaire. Les flux d'air primaire et secondaire se mélangent ensuite le long de la chambre de mélange cylindrique et du diffuseur avant d'être refoulés dans l'atmosphère. Les principales dimensions de l'éjecteur sont indiquées sur la figure 1.

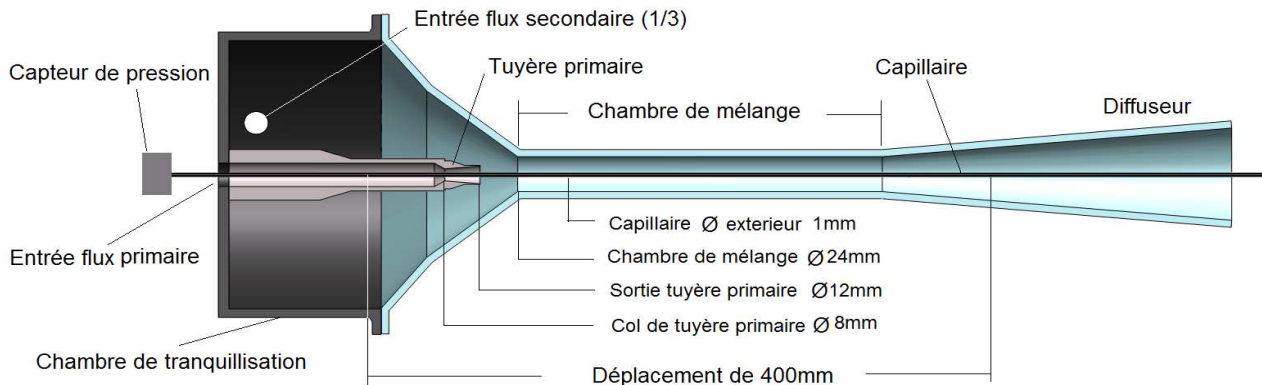


FIG. 1 – Dispositif expérimental

La pression statique au sein de l'éjecteur est mesurée à l'aide d'un appareillage spécifiquement développé à cet effet. Il consiste en un tube capillaire placé sur l'axe de l'éjecteur et traversant de part en part l'éjecteur. Ce tube possède un diamètre extérieur de 1 mm et de 0,66 mm intérieur et génère un taux d'obstruction maximal au col de la tuyère primaire inférieur à 2%. Le tube est doté d'un trou de diamètre de 0,3 mm permettant de capter la pression locale de l'écoulement. La translation du tube capillaire le long de l'axe de l'éjecteur permet de mesurer la pression statique depuis l'entrée de la tuyère primaire jusqu'à l'entrée du diffuseur. A noter qu'un système de maintien et de centrage permet de limiter les oscillations du tube.

La mesure de cette pression est effectuée grâce à un capteur piézo résistif situé à l'extérieur de l'éjecteur afin de perturber le moins possible l'écoulement. La partie sensible du capteur a une surface de 1 mm^2 et est montée sur un support de 25 mm^2 .

3 Modèle 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. Une condition au limite de type *pressure-inlet* est imposée à l'entrée de la tuyère primaire et des conditions aux limites du type *pressure-outlet* sont utilisées à l'aspiration du flux secondaire et à la sortie au diffuseur (figure 2). Les parois de l'éjecteur et de la sonde de pression sont considérées comme adiabatiques. Le maillage utilisé est composé d'environ 150000 éléments. Il est de type structuré et raffiné autour du tube capillaire. 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 deux modèles

RANS de type k-oméga (modèles k-omega standard et k-omega SST) bien adaptés aux écoulements compressibles de type jets circulaires avec cisaillement [7].

A noter qu'afin d'assurer la convergence et la stabilité des calculs, les simulations sont conduites en augmentant graduellement la pression d'entrée du fluide primaire de 1,5 à 4 bar avec un pas de 0,5 bar.

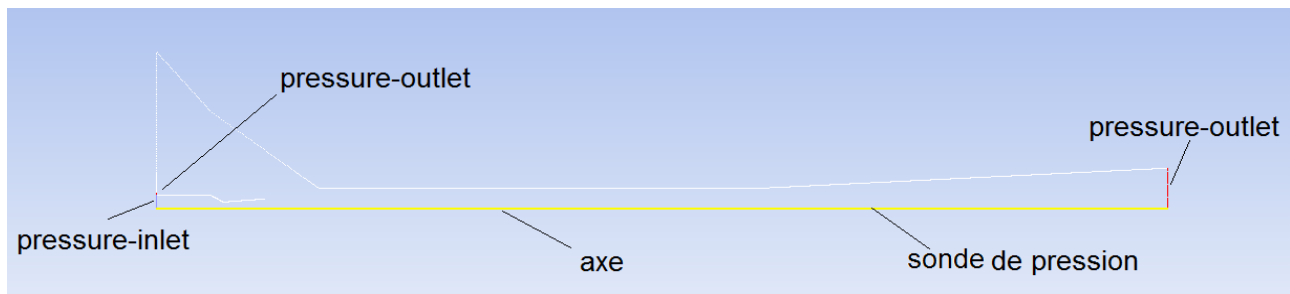


FIG. 2 – Domaine d'étude et conditions aux limites

4 Résultats et discussion

Les résultats discutés dans cette étude sont présentés sous forme de distributions de la pression statique le long de l'axe de l'éjecteur, accompagnées de visualisations numériques du champ des iso-Mach. Les résultats sont comparés pour trois valeurs de la pression génératrice primaire P_1 .

Les premières figures concernent une faible pression P_1 de 2 bar. La figure 3a compare les distributions de la pression obtenues numériquement en utilisant les deux modèles de turbulence k-oméga considérés avec la distribution de pression relevée expérimentalement. Les simulations numériques ont été conduites en prenant en compte la présence de la sonde de pression. On constate de prime abord une meilleure prédiction des résultats avec le modèle k-oméga standard. Toutefois, l'ensemble des résultats met en évidence une remontée brusque de la pression à travers un choc localisé au sein même du divergent de la tuyère primaire. Ce phénomène est confirmé par les champs des iso-Mach de la figure 4 qui montrent clairement un désamorçage du régime supersonique dans le divergent primaire. Ce désamorçage est en parfait accord avec la théorie des écoulements quasi-monodimensionnels en tuyère [8] compte tenu de la valeur de la pression génératrice trop faible pour maintenir un régime supersonique sur la totalité du divergent primaire.

La figure 3b compare quant à elle les simulations réalisées avec et sans présence de la sonde de pression, en utilisant le modèle de turbulence k-oméga standard. Elle révèle la forte influence de la sonde sur l'évolution de la pression, en particulier dans la tuyère primaire. Il apparaît en effet que le choc se forme plus tôt dans la tuyère primaire en présence de la sonde, celle-ci anticipant le désamorçage du régime supersonique dans la tuyère. Par ailleurs, la figure 4 montre que ce choc, dont la configuration est celle d'un choc droit en l'absence de sonde, est transformé en chocs obliques autour du capillaire quand la sonde est insérée sur l'axe. Les résultats présentés sur les figures 5 et 6 sont relatifs à une pression génératrice $P_1 = 3,4$ bar. Les résultats obtenus montrent qu'avec cette pression plus élevée, l'écoulement ne subit plus de désamorçage dans la tuyère primaire et débouche de cette tuyère avec un nombre de Mach supersonique voisin de 2,3 (Figure 6). La recompression du fluide se fait alors à travers une succession de chocs obliques, appelé train de chocs, qui prend naissance en sortie de tuyère primaire, se développe dans une partie de la chambre de mélange cylindrique avant de s'atténuer au fur et à mesure que la pression se rapproche de la pression de refoulement. Ce train de chocs est détecté avec succès par notre sonde et notre capteur de pression. Il est relativement bien modélisé par nos simulations CFD, notamment lorsque le modèle k-oméga standard est utilisé, malgré un léger décalage dans le nombre et l'intensité des chocs. Le nombre et l'amplitude des chocs sont par contre nettement surestimés par le modèle k-oméga SST.

La figure 5b et les champs des iso-Mach correspondants (figure 6) confirment l'effet intrusif de la sonde sur le processus de recompression. Les multiples interactions de l'écoulement avec le tube capillaire provoquent la formation d'un système de chocs complexe mais qui s'avère toutefois peu significatif pour le développement de l'écoulement le long de l'éjecteur. Par contre, plus localement, le tube capillaire atténue considérablement l'intensité des chocs mais sans en modifier leur position. Il apparaît donc que la prise en compte de la sonde de mesure dans le modèle numérique est indispensable à toute validation rigoureuse de simulations numériques s'appuyant sur des mesures de la pression locale interne.

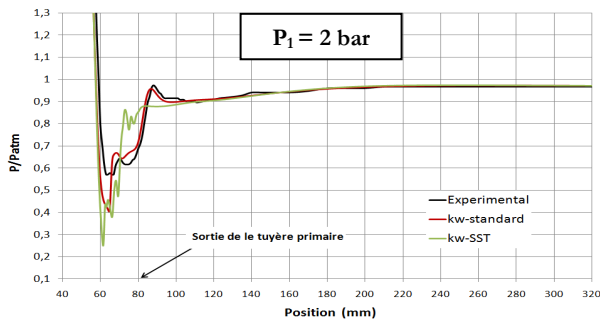


FIG. 3a – Sensibilité au modèle de turbulence

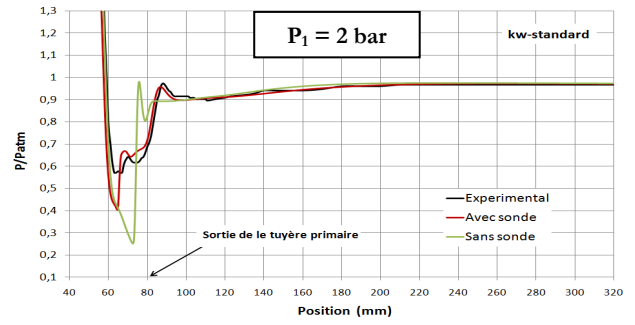


FIG. 3b – Sensibilité à l'intrusion de la sonde

FIG. 3 – Distributions de la pression statique le long de l'axe de l'éjecteur ($P_1 = 2$ bar)

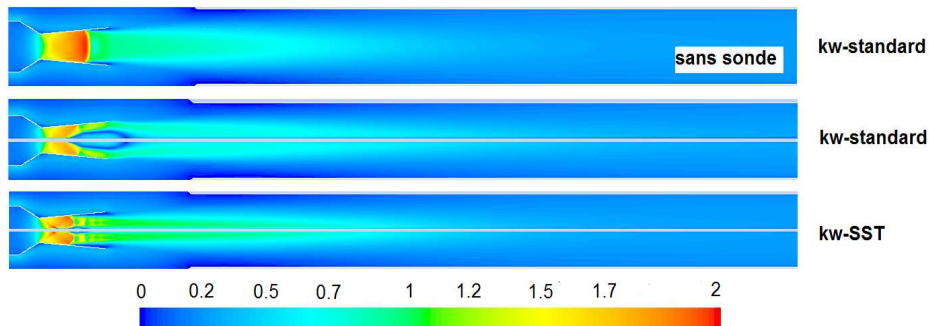


FIG. 4 – Champs des iso-Mach dans l'éjecteur ($P_1 = 2$ bar)

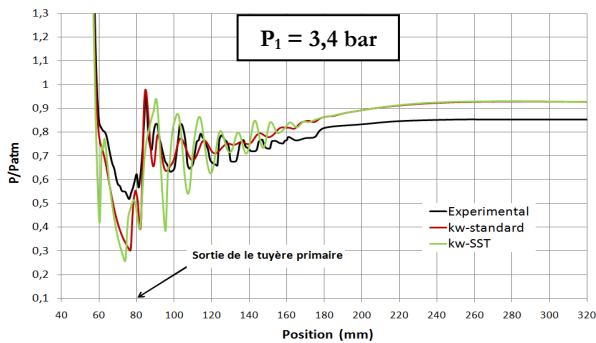


FIG. 5a – Sensibilité au modèle de turbulence

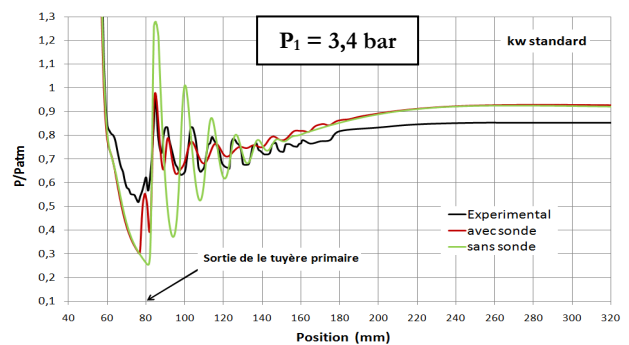


FIG. 5b – Sensibilité à l'intrusion de la sonde

FIG. 5 – Distributions de la pression statique le long de l'axe de l'éjecteur ($P_1 = 3,4$ bar)

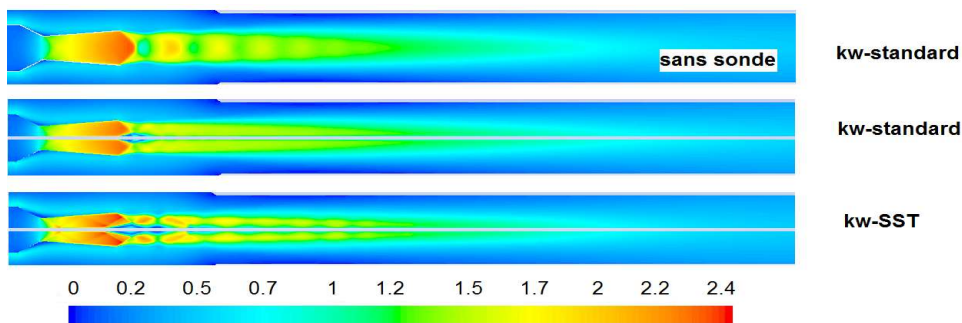


FIG. 6 – Champs des iso-Mach dans l'éjecteur ($P_1 = 3,4$ bar)

Les résultats présentés sur les figures 7 et 8 ont été obtenus en alimentant l'éjecteur avec une pression génératrice P_1 de 4 bar. En comparant ces figures avec celles obtenues avec des pressions P_1 plus faibles, on constate une nette intensification du processus de recompression par chocs au fur et à mesure que la pression génératrice augmente. Le train de chocs s'allonge sensiblement, tout comme le nombre et l'amplitude des chocs.

Les profils de pression de la figure 7a confirme la très forte sensibilité du modèle de turbulence k-oméga SST et son inaptitude dans notre étude à prédire convenablement le train de chocs et le processus de recompression qui lui est associé. Les résultats prédits par le modèle k-oméga standard sont quant à eux en bon accord avec les mesures, tant au niveau du nombre de chocs que de leur intensité. Les perturbations liées à l'intrusion de la sonde sont une nouvelle fois visibles sur la figure 7b, même si la différence en terme de nombre et d'intensité des chocs entre les simulations avec et sans sonde est moins marquée que pour la pression de 3,4 bar. Cette influence plus modérée de la sonde est confirmée par les visualisations numériques des iso-Mach présentés sur la figure 8.

A noter que les profils de pressions présentés dans cette étude ne couvrent pas toute la totalité de l'éjecteur mais s'arrêtent à l'entrée du diffuseur. La différence entre la pression statique et la pression atmosphérique, observée en particulier sur le profil expérimental, est comblée par le diffuseur qui assure la fin de la recompression du fluide.

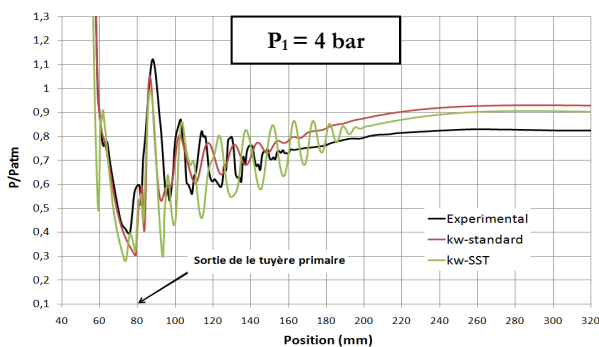


FIG. 7a – Sensibilité au modèle de turbulence

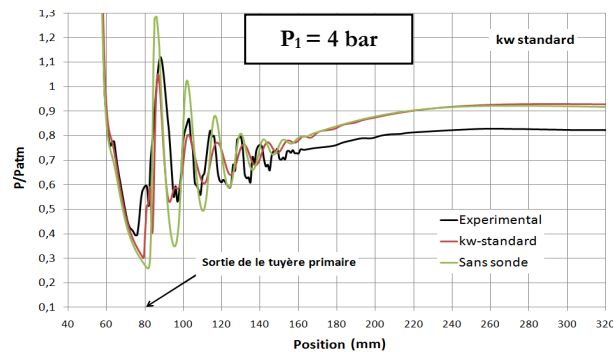
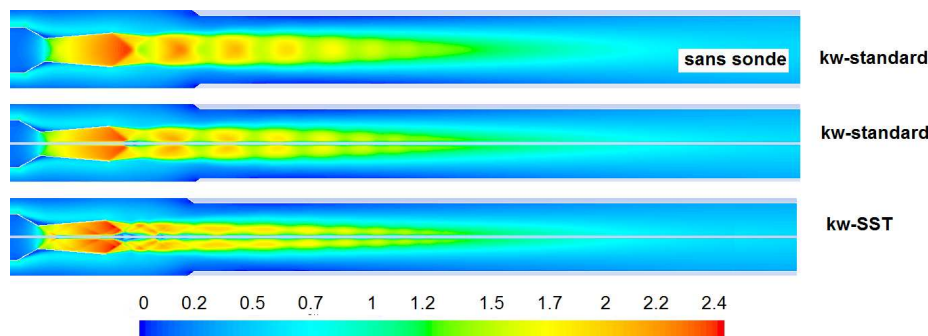


FIG. 7b – Sensibilité à l'intrusion de la sonde

FIG. 7 – Distributions de la pression statique le long de l'axe de l'éjecteur ($P_1 = 4$ bar)FIG. 8 – Champs des iso-Mach dans l'éjecteur ($P_1 = 4$ bar)

5 Conclusion

Les travaux menés lors de cette étude concernent l'analyse du processus de recompression par chocs dans les éjecteurs supersoniques à flux induit. Ce processus est étudié expérimentalement grâce à un dispositif de mesure de la pression statique sur l'axe de l'éjecteur spécialement développé à cet effet. Des simulations numériques sont également réalisées, en prenant en compte notamment la présence de la sonde de mesure dans le modèle numérique.

Cette étude nous a permis dans un premier temps de faire face à un problème complexe d'analyse locale de la pression dans un écoulement turbulent fortement compressible pour lequel limiter l'intrusivité de la sonde de pression présente un challenge pour l'exactitude des mesures.

La confrontation des résultats numériques et expérimentaux s'avère globalement satisfaisante. Les distributions de pression relevées expérimentalement et calculées numériquement sont en bon accord, malgré de légères différences concernant le nombre et l'amplitude des chocs. Ces différences sont fortement atténuées lorsque la sonde de mesure est prise en compte dans le modèle numérique ce qui témoigne du caractère intrusif de la sonde.

Les simulations numériques ont également montré que l'insertion de la sonde sur l'axe de l'éjecteur anticipe le désamorçage du régime supersonique dans la tuyère primaire lorsqu'elle est alimentée avec une faible pression. Il apparaît donc clairement que la prise en compte de la sonde de mesure dans le modèle numérique est indispensable pour une validation rigoureuse des simulations numériques et que l'aptitude du modèle à prédire correctement ce type d'écoulement complexe dépendra fortement de la finesse du maillage au voisinage de la sonde.

Par ailleurs, deux modèles de turbulence de type k-oméga ont été comparés au cours de nos simulations. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le modèle k-oméga standard alors qu'il apparaît que le modèle k-oméga SST surestime fortement l'intensité des chocs.

Par la suite, il semble intéressant d'étendre ces travaux à d'autres régimes de fonctionnement de l'éjecteur. En effet, l'éjecteur considéré lors de cette étude fonctionne en régime mixte, correspondant à un flux primaire supersonique et un flux secondaire subsonique. Il serait intéressant de tester notre système de mesure dans le cas d'un éjecteur opérant en régime totalement supersonique, c'est-à-dire avec un flux secondaire lui aussi supersonique.

Enfin, une amélioration du système de mesure, intégrant directement le capteur de pression dans la sonde, est actuellement en cours de développement.

References

- [1] Marynowski T., Etudes expérimentale et numérique d'écoulements supersoniques en éjecteurs avec et sans condensation, Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, Canada, 2007.
- [2] Riffat S.B., Jiang L. and Gan G., Recent development in ejector technology – A review, *Int. J. Ambient Energy*, 26, 13-26, 2005.
- [3] Matsuo K., Miyazato Y. and Kim H.D., Shock train and pseudo-shock phenomena in internal gas flows, *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 35, 33-100, 1999.
- [4] Sriveerakul T., Aphornratana S., Chunnanond K., Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics : Part 1. Validation of the CFD results, *Int. J. of Thermal Sciences*, 46, 812-822, 2007.
- [5] Sriveerakul T., Aphornratana S., Chunnanond K., Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 2. Flow structure of a steam ejector influenced by operating pressures and geometries. *Int. J. of Thermal Sciences*, 46, 823-833, 2007.
- [6] Desevaux P., Contribution à l'étude expérimentale d'un éjecteur à flux induit, Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 1994.
- [7] Wilcox D.C., Turbulence modeling for CFD, 2nd edn. DCW Industries, 1998.
- [8] Delery J., Traité d'aérodynamique compressible, Volume 2 : Ecoulements monodimensionnels stationnaires et surfaces de discontinuité, Lavoisier, Paris, 2008.