

# Simulation numérique de l'écoulement dans un éjecteur supersonique.

## Numerical simulation of the flow in a supersonic ejector.

Souhir GRITLI<sup>1</sup>, Valérie LEPILLER<sup>2\*</sup>, Mouna ELAKHDAR<sup>1</sup>, Ezzedine NEHDI<sup>1</sup>, Philippe DESEVAUX<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Unité de Recherche Energétique et Environnement, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis  
BP 37, Le Belvédère 1002, Tunis, Tunisie.

<sup>2</sup> Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174, UBFC, Département ENERGIE, Parc Technologique, 2 avenue Jean Moulin, 90000 Belfort.

\*(auteur correspondant : [valerie.lepiller@univ-fcomte.fr](mailto:valerie.lepiller@univ-fcomte.fr))

**Résumé** – Ce travail présente une étude sur l'analyse de l'écoulement au sein d'un éjecteur supersonique et plus particulièrement du processus de recompression par chocs qui prend place le long de la tuyère secondaire. Les simulations numériques sont réalisées à l'aide du logiciel de CFD Ansys-Fluent. Les deux modes de fonctionnement de l'éjecteur (sans et avec flux induit) sont étudiés pour différentes valeurs de la pression génératrice primaire  $P_1$  comprises entre 2 et 5 bar. L'influence de la distance entre la section de sortie de la tuyère primaire et la section d'entrée de la chambre de mélange de l'éjecteur (facteur géométrique NXP) sur les performances de l'éjecteur est également analysée.

**Mots-clés** : Ejecteur supersonique ; CFD ; Régimes d'écoulement ; Chocs ; NXP.

**Abstract** – This paper describes the investigation of the flow within a supersonic ejector and more particularly the analysis of the shock recompression process which takes place along the secondary nozzle. Numerical simulations are performed using the CFD package Ansys-Fluent. The two operating modes of the ejector (without and with induced flow) are studied for different values of the primary stagnation pressure  $P_1$  between 2 and 5 bar. The impact of the distance between the outlet section of the primary nozzle and the inlet section of the mixing chamber (geometric factor NXP) on the performance of the ejector are then analyzed.

**Keywords**: Supersonic Ejector; Flow regimes; Shocks; CFD; NXP.

### Nomenclature

$P$	pressure, bar	<i>Indices et exposants</i>
$A$	rapport de la section	$l$ primaire

## 1. Introduction

Un éjecteur est un appareil de conception simple, sans aucune pièce mécanique en mouvement, destiné à entraîner, recomprimer et mélanger des fluides. Il s'agit d'un appareil disposant de deux orifices d'admission et d'un orifice de sortie, qui permet à un fluide primaire (ou moteur) à haute pression d'entraîner un fluide secondaire (ou induit) à basse pression. Les deux flux sont mélangés à l'intérieur de l'éjecteur, notamment dans une chambre de mélange, et refoulés à une pression intermédiaire appelée contre-pression [1].

Les éjecteurs supersoniques sont utilisés dans une gamme assez large d'applications, telles que l'augmentation de poussée de propulseurs (aérospatiale), la séparation de fluides (génie des procédés), la production du vide et la réfrigération via des systèmes à éjecto-

compression [2]. L'écoulement au sein d'un éjecteur supersonique est très complexe, 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 conditionne fortement les performances de l'éjecteur en termes d'aspiration et d'entraînement [3]. L'analyse de la recompression dans l'éjecteur et plus particulièrement dans la chambre de mélange se base généralement sur l'évolution axiale de la pression statique. La simulation numérique par CFD est un outil précieux dans ce domaine, en permettant de suivre l'évolution des grandeurs de l'écoulement le long de l'éjecteur et en offrant la possibilité de visualiser numériquement l'écoulement et l'éventuelle structure de chocs

Le travail présenté ici se situe dans ce contexte. Il a pour objectif d'analyser le processus de recompression qui prend place dans un éjecteur fonctionnant avec ou sans flux induit. L'étude, essentiellement numérique, est menée par une approche CFD. La turbulence est prise en compte par le biais de modèles RANS. Les performances en termes d'aspiration et d'entraînement sont déduites de ces simulations numériques et comparées aux données expérimentales recueillies sur banc d'essai. L'influence de la distance entre la section de sortie de la tuyère primaire et la section d'entrée de la chambre de mélange de l'éjecteur (facteur géométrique NXP) sur les performances de l'éjecteur est également analysée.

## 2. Modèle numérique CFD

### 2.1. Configuration de l'éjecteur étudié

L'éjecteur considéré dans cette étude est disponible sur le banc d'essai du département ENERGIE de l'institut FEMTO-ST et a été utilisé par Bouhanguel [4]. Il est constitué de deux tuyères coaxiales comme schématisé sur la figure 1. La tuyère primaire (ou motrice) est du type convergent-divergent. Elle est alimentée par de l'air sous pression. Le fluide secondaire est de l'air aspiré dans l'atmosphère par le biais de 3 entrées disposées à  $120^\circ$  autour de la chambre de tranquillisation. Les deux flux d'air se mélangent ensuite dans la chambre de mélange cylindrique avant d'être refoulés dans l'atmosphère en sortie de diffuseur.

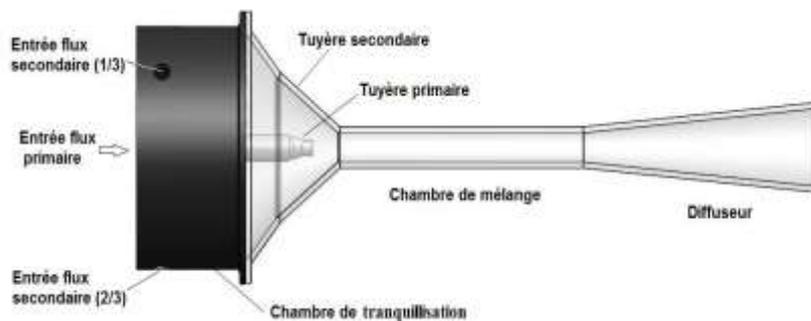


Figure 1: Configuration géométrique de l'éjecteur étudié

Les principales dimensions de l'éjecteur étudié sont indiquées sur la figure 2. Le rapport géométrique  $A$  est un paramètre essentiel, qui conditionne fortement le comportement et les performances de l'éjecteur. Il est défini comme le rapport de la section du tube de mélange sur la section au col de la tuyère primaire et est égal à  $A = 4$ . Cette valeur modérée doit permettre l'installation du régime supersonique dans la tuyère secondaire même pour des valeurs relativement faibles de la pression génératrice primaire (inférieure à 5 bar) [4]. Le paramètre NXP représente la distance entre la sortie de la tuyère primaire et l'entrée de la

chambre de mélange. Cette distance, appelée pénétration de la tuyère primaire, peut varier soit positivement soit négativement sur le banc d'essai.

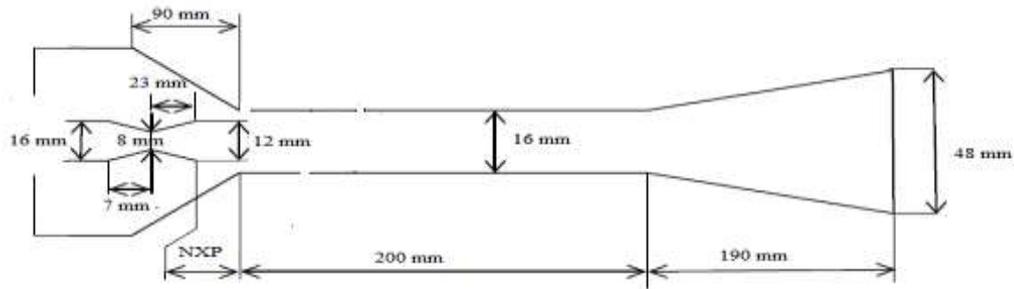


Figure 2: Principales dimensions de l'éjecteur étudié ( $A = 4$ )

## 2.2. Conditions de simulation numérique

Les simulations numériques sont réalisées à l'aide du code CFD Ansys-Fluent. Les équations résolues sont les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie, des grandeurs turbulentes ainsi que la relation d'état du fluide considéré comme un gaz parfait. La formulation de ces équations est donnée dans [4]. Compte tenu de la géométrie de l'éjecteur, le domaine d'étude est considéré comme 2D axisymétrique. La figure 3 donne un schéma du domaine d'étude accompagné des conditions aux limites utilisées. Une condition limite de type pression-inlet est utilisée à l'entrée de la tuyère primaire où sera imposée la valeur de la pression totale  $P_1$ . Au niveau de l'aspiration du flux secondaire, une section annulaire équivalente, accompagnée d'une condition de type pression-inlet est utilisée. La valeur de la pression atmosphérique sera fixée à cette entrée secondaire. Une condition de type pression-outlet est fixée à la sortie du diffuseur correspondant à un refoulement à la pression atmosphérique. Une condition de non glissement (vitesse nulle) est imposée aux parois et le transfert de chaleur aux parois n'est pas pris en compte. Le maillage utilisé est composé d'environ 50000 éléments de type quadrilatère. Les équations Navier Stokes sont résolues à l'aide du solveur pression-based, avec couplage pression-vitesse et selon un schéma de discrétisation au second ordre.

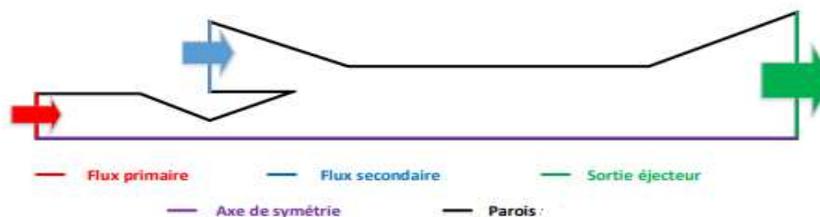


Figure 3: Domaine d'étude et conditions aux limites

## 2.3. Modélisation de la turbulence

La modélisation de la turbulence reste un problème majeur dans les simulations des écoulements supersoniques. La turbulence de l'écoulement est prise en compte dans notre étude par des modèles RANS [5]. Deux modèles ont été testés dans un premier temps : le modèle  $k-\epsilon$  Standard et le modèle  $k-\omega$  SST. Pour ces deux modèles, une intensité de turbulence de 5% est spécifiée aux entrées de fluide primaire et secondaire le cas échéant.

Une approche par lois de paroi standard (standard wall functions), associée à une valeur de  $y^+$  voisine de 30 pour la première maille, a été utilisée.

La figure 4 compare les distributions de la pression statique sur l'axe de l'éjecteur, obtenues avec ces deux modèles, dans le cas d'un fonctionnement de l'éjecteur avec flux induit. On constate de fortes différences entre ces distributions de pression. Il apparaît que pour la pression  $P_1$  considérée ( $P_1 = 3,5$  bar), la simulation réalisée avec le modèle  $k-\omega$  SST prédit l'installation d'un régime d'écoulement supersonique dans l'éjecteur. Ce régime est caractérisé par la formation de deux trains de chocs, le premier en sortie de tuyère primaire, le second à l'entrée du diffuseur. La simulation menée avec le modèle  $k-\varepsilon$  Standard prédit quant à elle un régime mixte d'écoulement. Dans ce cas, l'écoulement redevient subsonique dans la chambre de mélange. Or les essais expérimentaux réalisés par Bouhanguel (2013) [4] sur cette configuration d'éjecteur ont confirmé l'installation du régime supersonique pour la pression  $P_1 = 3,5$  bar.

Dans la suite de cette étude, les simulations seront donc réalisées avec le modèle  $k-\omega$  SST.

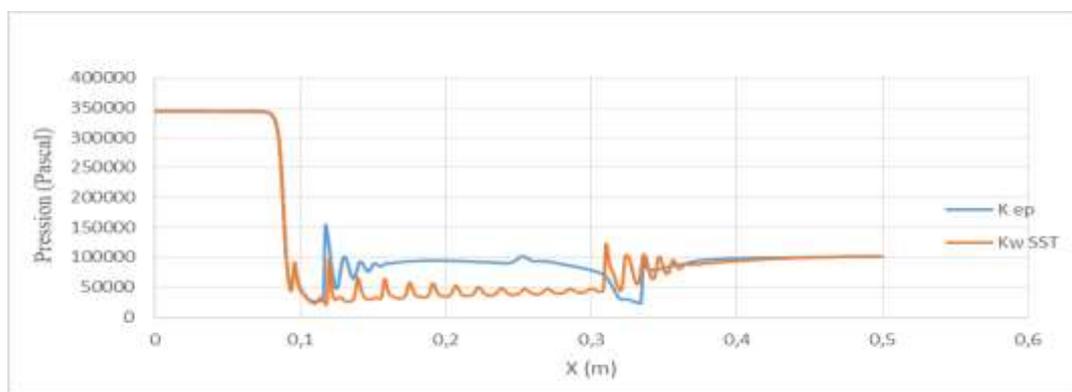


Figure 4: Distribution axiale de la pression – Comparaison des modèles de turbulence ( $P_1 = 3,5$  bar)

### 3. Résultats et discussion

Les deux modes de fonctionnement de l'éjecteur (avec et sans flux) sont étudiés, pour différentes valeurs de la pression génératrice primaire  $P_1$  comprises entre 2 et 5 bar.

Le processus de recompression est analysé à travers les distributions axiales de la pression et les visualisations de la structure de choc.

#### 3.1. Fonctionnement sans flux induit ( $U = 0$ )

Les figures 5 et 6 concernent le fonctionnement de l'éjecteur sans flux induit. La figure 5 compare les distributions de la pression statique le long de l'axe de l'éjecteur pour des pressions génératrices 2, 3, 4 et 5 bar. Ces distributions montrent que le processus de recompression qui prend place dans la tuyère secondaire est caractérisé par de fortes fluctuations de la pression. Ces fluctuations correspondent à la formation de chocs obliques au sein de l'écoulement.

Pour  $P_1 = 2$  bar, on observe un choc dans le divergent de la tuyère primaire. Ce choc provoque le désamorçage du régime supersonique dans la tuyère primaire.

Pour les pressions  $P_1$  supérieures à 2 bar, le jet débouche de la tuyère primaire à vitesse supersonique et se désamorce ensuite dans la chambre de mélange par le biais d'un système de recompression par chocs obliques successifs.

La figure 6 regroupe les champs des iso-Mach issus des simulations CFD pour les pressions génératrices comprises entre 2 à 5 bar. Ces iso-Mach sont représentés avec la même échelle afin de faciliter l'analyse de l'évolution de l'écoulement avec la pression génératrice. Cette figure permet la visualisation de l'écoulement dans l'éjecteur et en particulier de la structure de chocs. Elle confirme notamment la formation d'un choc droit dans la tuyère primaire pour une pression  $P_1 = 2$  bar. Pour les pressions  $P_1$  comprises entre 2,5 et 4 bar, ce choc droit laisse place à une succession de chocs obliques en sortie de tuyère primaire, conduisant au désamorçage du régime supersonique. Lorsque  $P_1$  dépasse 4 bar, l'écoulement reste supersonique sur la majeure partie de la chambre de mélange, avant de se désamorcer à travers un second train de chocs qui commence à se former avant l'entrée du diffuseur.

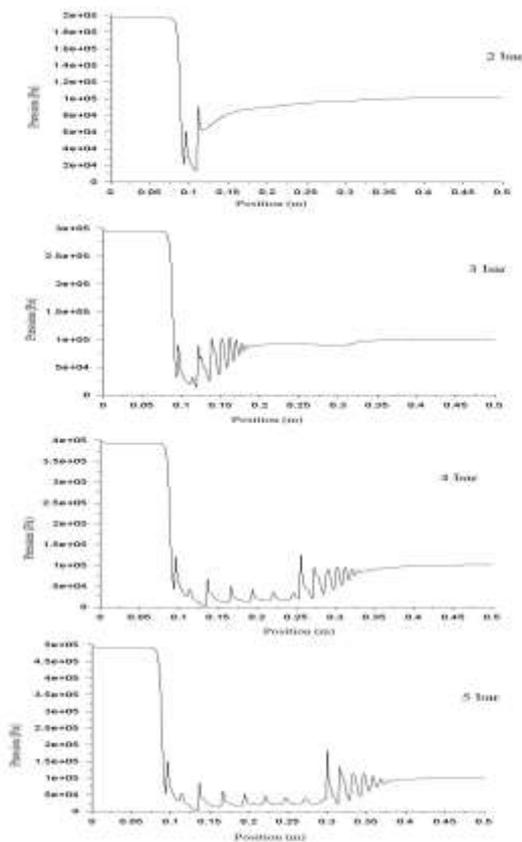


Figure 5: Distributions axiales de la pression pour différentes valeurs de  $P_1$  ( $U = 0$ )

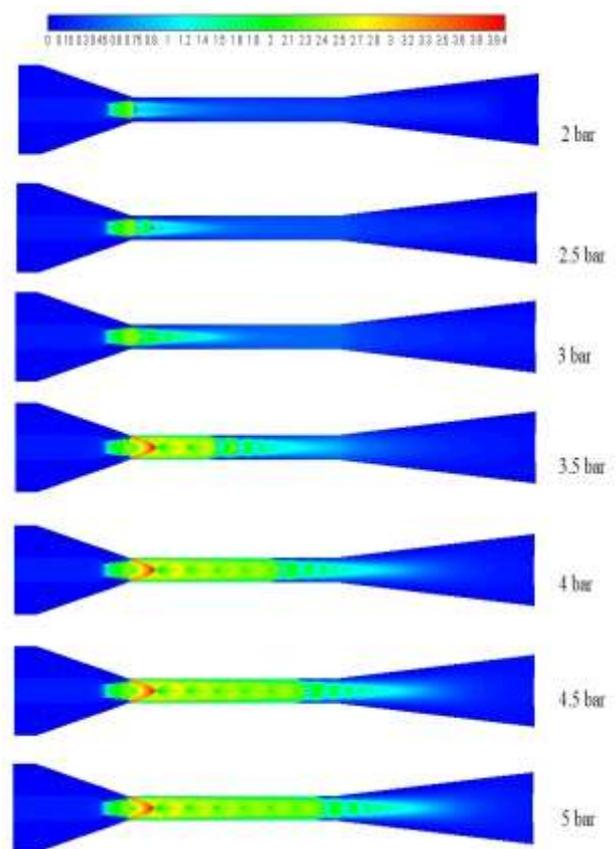


Figure 6: Evolution des Iso-Mach avec la pression  $P_1$  ( $U = 0$ )

### 3.3. Fonctionnement avec flux induit ( $U > 0$ )

Les figures 7 et 8 concernent le fonctionnement de l'éjecteur avec flux induit. Pour ce fonctionnement également, on constate que la recompression s'effectue à travers une succession de chocs. Il apparaît clairement sur ces figures que le régime supersonique s'installe dans la tuyère secondaire pour des pressions  $P_1$  supérieures à 3,5 bar. Cette pression correspond donc à la transition du régime mixte vers le régime supersonique. Ce régime est caractérisé par un écoulement qui reste supersonique tout le long de la chambre de mélange. Le désamorçage du régime supersonique au régime subsonique s'effectue dans le diffuseur, par le biais d'un second train de choc.

### 3.4. Analyse des performances de l'éjecteur

Les critères de performance d'un éjecteur peuvent varier suivant son application et son mode de fonctionnement. Dans le cas d'un fonctionnement avec flux induit, le critère essentiel est le débit secondaire aspiré. Pour un éjecteur opérant sans flux induit, c'est la pression d'aspiration  $P_2$  qui permet de caractériser les performances de l'éjecteur.

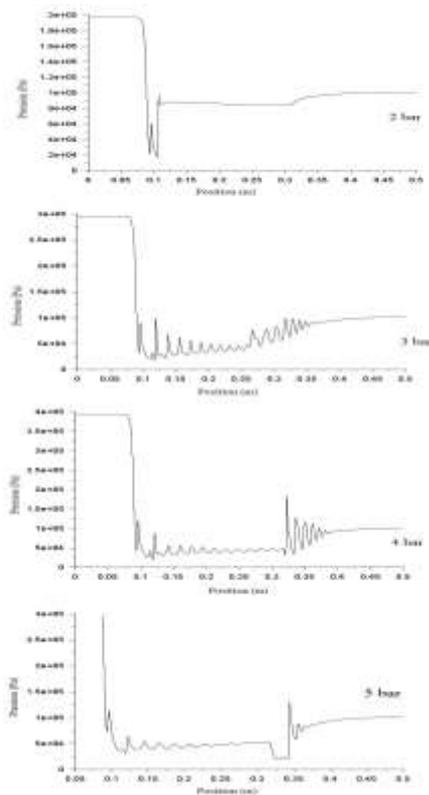


Figure 7: Distributions axiales de la pression pour différentes valeurs de  $P_1$  ( $U > 0$ )

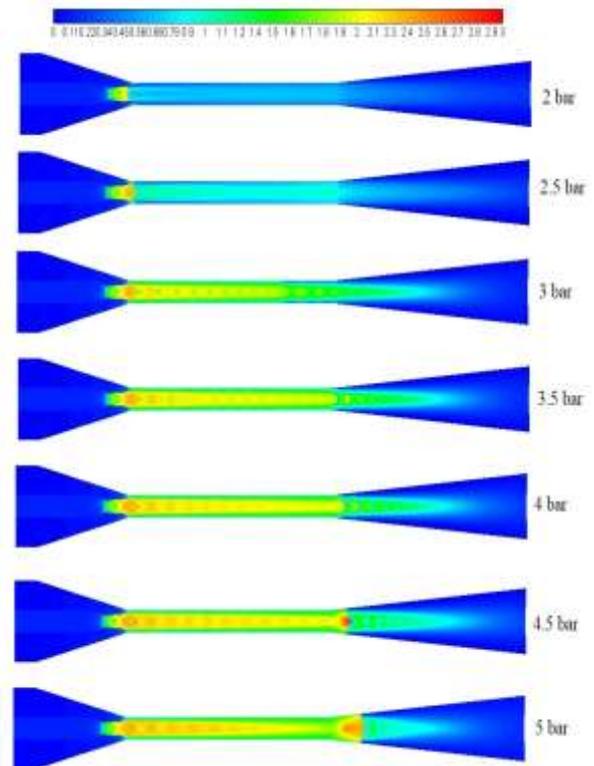


Figure 8: Evolution des Iso-Mach avec la pression  $P_1$  ( $U > 0$ )

La figure 9 compare les évolutions du débit induit en fonction de la pression génératrice primaire  $P_1$ , obtenues numériquement et expérimentalement. Les valeurs expérimentales sont issues de travaux menés sur banc d'essai par Bouhanguel [4]. On peut noter un bon accord entre les mesures et nos résultats numériques, l'écart maximal n'excédant pas 14% de la valeur mesurée expérimentalement. Dans les deux cas, le débit induit  $m_2$  augmente avec la pression d'alimentation  $P_1$  jusqu'à une valeur maximale atteinte expérimentalement pour  $P_1 = 3,5$  bar et numériquement pour  $P_1 = 4,5$  bar. Cette pression correspond à l'amorçage du régime supersonique dans la tuyère secondaire et donc à la transition entre le régime mixte et le régime supersonique. Cette figure révèle l'existence de conditions optimales pour l'entraînement de flux secondaire correspondant à cette zone de transition.

La figure 10 est relative à un fonctionnement sans flux induit. Elle compare les évolutions numériques et expérimentales de la pression d'aspiration  $P_2$  en fonction de la pression primaire  $P_1$ . L'évolution de la pression d'aspiration avec la pression d'alimentation  $P_1$  confirme les résultats obtenus précédemment avec flux induit. On observe en effet, tant numériquement qu'expérimentalement, l'apparition d'une valeur minimale de la pression  $P_2$  pour une pression génératrice primaire  $P_1 = 3,5$  bar correspondant aux conditions d'amorçage de la tuyère secondaire.

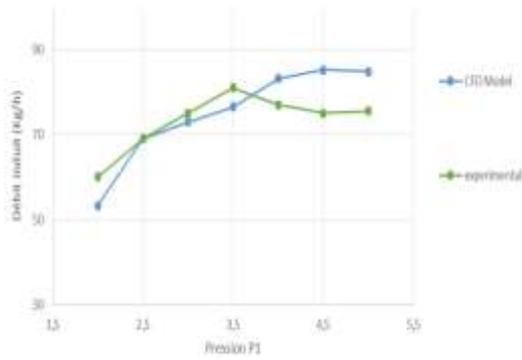


Figure 9: Evolution du débit aspiré avec la pression  $P_1$  ( $U > 0$ )

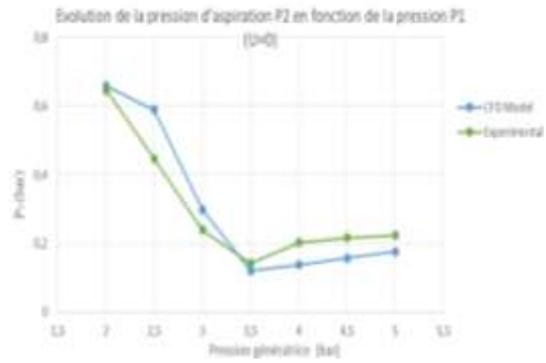


Figure 10 : Evolution de la pression d'aspiration  $P_2$  en fonction de la pression  $P_1$  ( $U = 0$ )

### 3.5. Analyse de la position de la tuyère primaire

La position de sortie de la tuyère primaire NXP est définie comme la distance entre la sortie tuyère primaire et l'entrée de la chambre de mélange. Cette position est un paramètre géométrique sensible qui influe sur les performances de l'éjecteur en affectant à la fois le taux d'entraînement et la pression d'aspiration. Certaines études dans la littérature semblent montrer que le fait de déplacer la section de sortie de la tuyère primaire loin en amont de l'entrée de la chambre de mélange permet d'améliorer les performances en augmentant le taux d'entraînement. D'autres études expérimentales [6,7] montrent qu'il existe une position optimale qui donne le meilleur COP d'un cycle de réfrigération par éjecto-compression. Suivant Nehdi et al. (2011) [7], cette position optimale est comprise un intervalle allant de -10 mm jusqu'à 20 mm. Dans cette présente étude, des simulations numériques sont réalisées en modifiant la position de sortie de la tuyère primaire (NXP). Les résultats obtenus ont permis d'établir les courbes données sur les figures 11 et 12 qui présentent l'effet de la position de la tuyère primaire sur les performances de l'éjecteur. Les deux figures semblent mettre en évidence une valeur optimale de NXP comprise entre 5 et 10 mm conduisant à l'aspiration maximale. La figure 13 présente l'effet de la position de la tuyère primaire NXP sur la pression d'aspiration (mesurée au niveau de la chambre de tranquillisation secondaire) en fonctionnement sans flux induit et pour la pression  $P_1$  optimale de 3,5 bar. On constate une nette dégradation des performances d'aspiration lorsque NXP dépasse 10 mm.

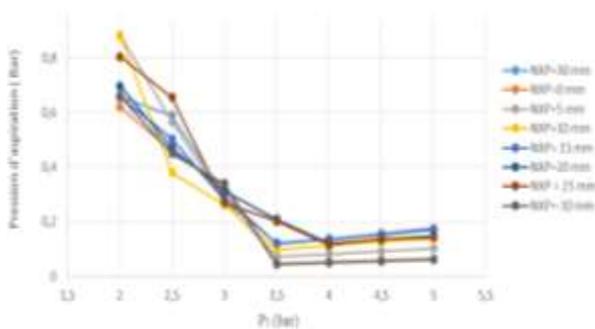


Figure 10: Evolution de la pression d'aspiration avec  $P_1$  pour différentes valeurs de NXP ( $U = 0$ )

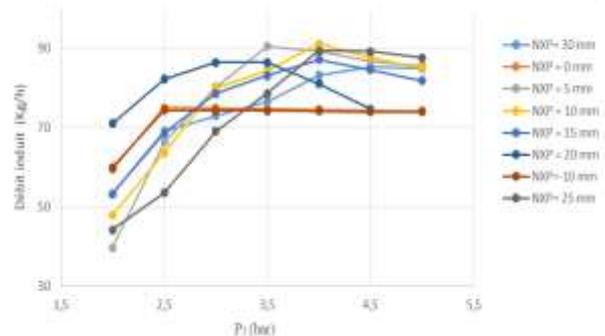


Figure 11: Evolution du débit induit avec  $P_1$  pour différentes valeurs de NXP ( $U > 0$ )

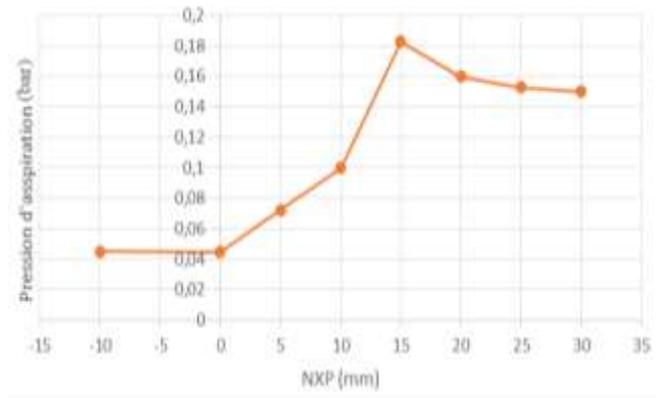


Figure 12: Effet de la position de la tuyère primaire (NXP) sur la pression d'aspiration ( $U = 0$ ,  $P_1 = 3,5$  bar)

## 4. Conclusion

Cette étude a pour objectif d'analyser le processus de recompression qui prend place dans un éjecteur fonctionnant avec ou sans flux induit. Elle est conduite numériquement, grâce au développement d'un modèle CFD axisymétrique, et s'intéresse principalement aux distributions axiales de la pression et aux iso-Mach permettant de visualiser la structure de choc.

Des tests sur le choix du modèle de turbulence le mieux adapté ont été réalisés. Il a ainsi été montré que le modèle k-oméga-SST était bien adapté pour prédire la structure de choc.

Les résultats numériques obtenus à partir du modèle 2D axisymétrique sont très encourageants. Les performances de l'éjecteur en termes d'aspiration et d'entraînement de flux secondaire ont été déterminées numériquement et comparées aux données expérimentales. La forte influence du régime d'écoulement au sein de l'éjecteur sur les performances a été confirmée.

L'influence de la position de la tuyère primaire (facteur géométrique NXP) sur les performances de l'éjecteur a également été étudiée. Il a été montré que le fait de positionner la section de sortie de la tuyère primaire proche de l'entrée de la chambre de mélange permet d'obtenir les meilleures performances.

## Références

- [1] Bourhan M. Tashtoush. A comprehensive review of ejector design, performance, and applications. *Applied Energy* 240 (2019) 138–172.
- [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] Bouhanguel A. Etude numérique et expérimentale de l'interaction entre deux écoulements compressibles dans un éjecteur supersonique. *PhD thesis, Université de Franche-Comté*, 2013.
- [5] Wilcox D.C., Turbulence modeling for CFD, 2nd edn. DCW Industries, 1998.
- [6] Eames, I. W., Aphornratana, S. and Sun, D. W. The jet-pump cycle—a low cost option powered by waste heat. *J. Heat Recovery Systems and Combined Heat and Power*, 1995, 15(8), 711–721.
- [7] Nehdi, E., Kairouani, L., Tounsi, N. Simulation of an ejector used in refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration*, 34 (2011), 1657-1667.