

# Visualisations expérimentales et numériques des instabilités dans un éjecteur air –air supersonique

A. BOUHANGUEL<sup>a</sup>, V. LEPILLER<sup>b</sup>, P. DESEVAUX<sup>c</sup>, M. DANDANI<sup>d</sup>,  
A. GHEZAL<sup>e</sup>

a. SPE-UMR 6134, Université de Corse, Ajaccio, France, [bouhanguel@univ-corse.fr](mailto:bouhanguel@univ-corse.fr)

b. Femto-st-UMR 6174, Univ.de Franche-Comté, France [valerie.lepiller@univ-fcomte.fr](mailto:valerie.lepiller@univ-fcomte.fr)

c. Femto-st-UMR 6174, Univ. de Franche-Comté, France [philippe.desevaux@univ-fcomte.fr](mailto:philippe.desevaux@univ-fcomte.fr)

d. LMFTA, USTHB, Alger, Algérie, [moundir.dandani@gmail.com](mailto:moundir.dandani@gmail.com)

e. LMFTA, USTHB, Alger, Algérie, [abdghezal@yahoo.fr](mailto:abdghezal@yahoo.fr)

## Résumé :

*L'écoulement qui prend place dans un éjecteur supersonique met en jeu de nombreux processus complexes. Il peut être notamment le siège d'instabilités qui peuvent être détectées et visualisées grâce à l'utilisation d'un éclairage pulsé lors de visualisations expérimentales de l'écoulement et par des simulations CFD 3D instationnaires avec modélisation LES.*

## Abstract :

*The flow that takes place in a supersonic ejector involves many complex processes. It may especially be the seat of instabilities that can be detected and visualized through the use of a pulsed light in experimental flow visualizations and 3D unsteady CFD simulations using LES modeling.*

**Mots clefs : Ejecteur, Supersonique, Instabilités, Laser tomography, CFD**

## 1 Introduction

Les éjecteurs sont des appareils que l'on rencontre dans de nombreuses applications (aéronautique, génie des procédés, réfrigération solaire, vide, ..). Ces appareils sont constitués en général de deux tuyères coaxiales. Le jet supersonique délivré par la tuyère primaire crée une dépression dans la seconde tuyère qui peut être mise à profit pour créer le vide (fonctionnement sans flux induit) ou aspirer et entraîner un flux induit (fonctionnement avec flux induit). L'interaction entre les deux flux est complexe et met en œuvre de nombreux processus complexes (chocs, turbulence, mélange, voire condensation). La majorité des études sur ces appareils sont des analyses globales destinées à caractériser les performances de ces systèmes. Les analyses locales, plus rares, permettant une analyse plus fine des phénomènes mis en jeu dans l'écoulement. La visualisation de l'écoulement, par des techniques expérimentales ou numériques, permet d'obtenir de précieuses informations quant au processus de recompression par chocs [1], de mélange [2], de condensation [3] et s'avère très utile pour la validation de simulations numériques [4]. Toutefois, ces visualisations sont souvent obtenues

avec des éclairages longs ou par des simulations en stationnaire ce qui masque les éventuelles instabilités de l'écoulement. Ces instabilités, qui peuvent jouer un rôle prépondérant sur les performances de l'éjecteur, notamment sur sa capacité de mélange [5]. L'objectif de ce papier est de montrer que ces instabilités peuvent être détectées et examinées grâce à l'utilisation d'un éclairage pulsé pour les visualisations expérimentales de l'écoulement et par le développement d'un modèle CFD 3D instationnaire avec modélisation des grande échelles de turbulence (LES).

## 2 Conditions d'expérimentation

L'éjecteur 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  $120^\circ$  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.

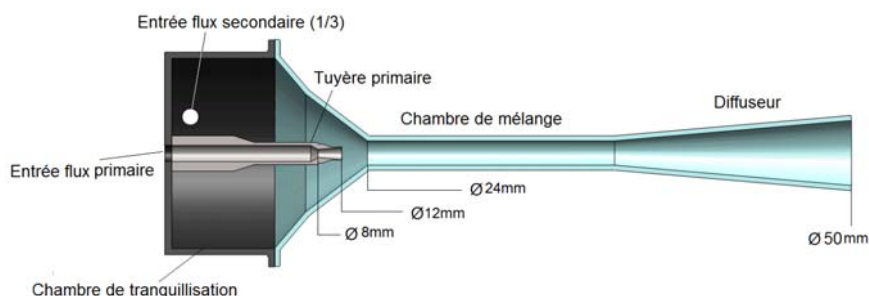


FIG. 1 – Géométrie de l'éjecteur étudié

La visualisation de l'écoulement dans la chambre de mélange est obtenue par tomographie laser pulsé. La source lumineuse utilisée est un laser Nd-YAG double en fréquence (532 nm) émettant des pulses laser de 15 ns et de 100 mJ. L'écoulement est illuminé par une nappe de lumière remontant l'écoulement. L'observation se fait perpendiculairement à l'axe de l'éjecteur au moyen d'une caméra CCD synchronisée au laser. La simulation numérique est menée sur le code CFD ANSYS Fluent. Le maillage du domaine comprend 4 millions d'éléments. Le pas de temps varie entre  $0,10 \mu\text{s}$  et  $1 \text{ ms}$  afin d'évaluer l'influence de ce paramètre temporel sur la détection des instabilités. Des conditions de pression sont imposées aux entrées et à la sortie de l'éjecteur. La turbulence de l'écoulement est modélisée par l'approche LES. Le schéma de discrétisation utilisé est du type Bounded Central Differencing, avec une discrétisation spatiale du 3<sup>ème</sup> ordre. Le filtrage est obtenu par le modèle de Smagorinsky-Lilly. Le niveau de résolution est également fortement lié à la finesse du maillage. La grille de maillage utilisée est constituée d'éléments volumiques compris entre  $2,2 \cdot 10^{-9}$  et  $4,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$ .

## 3 Résultats

La figure 2 présente des visualisations de l'écoulement dans la chambre de mélange (sur environ 200 mm après la section de sortie de la tuyère motrice) obtenues lorsque l'éjecteur fonctionne en régime mixte. Ce régime est caractérisé par la présence d'un jet supersonique en sortie de tuyère motrice et par un flux induit qui reste subsonique dans la tuyère secondaire. La figure 2a montre une

visualisation obtenue par tomographie laser pulsé. Cette visualisation met en évidence les instabilités qui apparaissent dans la chambre de mélange lors de l'interaction entre les flux primaire et secondaire. Ces instabilités sont particulièrement fortes dans la région où le processus de mélange entre les deux flux est très actif. La figure 2b donne une représentation des iso-Mach subsoniques obtenus par simulation LES. La région d'écoulement supersonique apparaît en blanc sur cette image. La simulation LES rend compte des fluctuations de l'écoulement, notamment à l'extrémité du jet supersonique. Dans cette région, le processus de mélange, gouverné par les structures turbulentes, est très actif et la frontière entre les flux supersonique et subsonique devient instable. On observe également que ces fluctuations provoquent la désintégration du jet supersonique en petites régions d'écoulement supersonique qui sont rapidement dissipées avant la fin de la chambre de mélange. La figure 3 est relative à un fonctionnement de l'éjecteur en régime pleinement supersonique. Dans ce cas, le mélange formé par les flux primaire et secondaire est supersonique sur la totalité de la chambre de mélange et décélère jusqu'à une vitesse subsonique à travers une structure de chocs à l'entrée du diffuseur. La visualisation des iso-Mach subsoniques obtenues par simulation LES montre l'apparition de fluctuations dans le diffuseur. Là aussi, les instabilités sont concentrées dans la région située en fin d'écoulement supersonique. Le passage de l'écoulement supersonique à subsonique s'accompagne d'une séparation au sein de la couche limite et de contraintes de cisaillement fortes qui provoquent ces instabilités. Les simulations LES s'avèrent encourageantes. Elles ont permis de détecter des fluctuations de l'écoulement dans la chambre de mélange et dans le diffuseur. Toutefois, cette approche complexe mérite encore beaucoup d'attention avant de déboucher sur un modèle numérique fiable pouvant être appliqué par exemple à l'étude du mélange dans les éjecteurs.

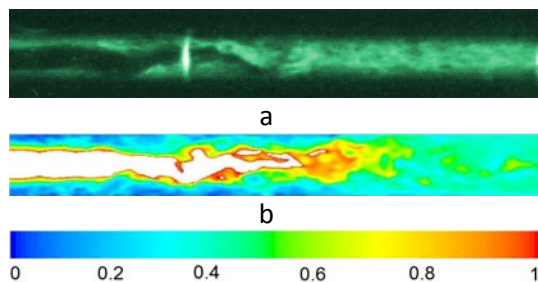


FIG. 2 – Visualisations de l'écoulement dans la chambre de mélange de l'éjecteur fonctionnant en régime mixte :  
a- Tomographie laser pulsée, b-Champ des iso-Mach subsoniques (simulation LES)

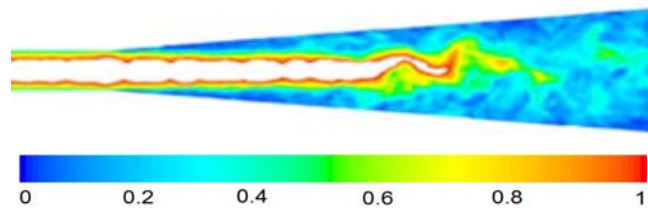


FIG. 3 – Champ des iso-Mach subsoniques (simulation LES) le long du diffuseur de l'éjecteur fonctionnant en régime pleinement supersonique

## Références

- [1] Desevaux P., Mellal A. and Alves de Sousa Y., Visualization of secondary flow choking phenomena in a supersonic air ejector, *Journal of Visualization*, 7, 249-256, 2004.
- [2] Yang X., Long X., and Yao X., Numerical investigation on the mixing process in a steam ejector with different nozzle structures, *Int. J. Therm. Sci.* 56, 95-106, 2012.
- [3] Marynowski T., Desevaux P. and Mercadier Y., Experimental and numerical visualizations of condensation process in a supersonic ejector, *Journal of Visualization*, 12, 251-258, 2009.
- [4] Desevaux P., Bouhanguel A., Girardot L. and Gavignet E., On the use of laser tomography techniques for validating CFD simulations of the flow in supersonic ejectors, *Int. J. Fluid Mech. Res.* 40, 60-70, 2013.
- [5] Murakami E. and Papamoschou D., Experiments on Mixing Enhancement in Dual-Stream Jets, *AIAA Paper 2001-0668*, 2001.