

Étude du comportement d'écoulement supersonique dans une tuyère bidimensionnelle et axisymétrique

Said SELLAMI¹, Omar KHOLAI^{2*}

¹Département de Génie Mécanique, Université Constantine 1, Algérie, sellamisaid1@gmail.com

²Laboratoire Ingénierie des Transports et Environnement, Université Constantine 1, Algérie, kholai.omar@gmail.com

Résumé – Le déplacement d'un fluide à l'intérieur des tuyères propulsives implique l'existence de phénomènes physiques notables, ces phénomènes sont très complexes et peuvent influencer directement sur les performances et le rendement de la tuyère. L'objectif de la présente étude est de donner un aperçu général sur le comportement physique d'écoulement compressible à haute vitesse dans une tuyère convergente-divergente axisymétrique. Le fluide utilisé est un gaz supposé parfait. Le système d'équations régissant cet écoulement, est résolu à l'aide de la méthode des volumes finis, avec un schéma de discrétisation totalement implicite, implémentée dans le logiciel FLUENT. Les résultats des simulations numériques montrent clairement les phénomènes qui découlent de cet écoulement.

Mots Clés : Tuyère, Convergent-Divergent, Onde de Choc, Écoulements Compressibles.

Nomenclature

| | |
|--|---|
| c_p chaleur spécifique pression constant | R_c le rayon du cercle de raccordement |
| c_v chaleur spécifique volume constant | u, v les composantes de vitesse suivant (x,y) |
| E l'énergie totale | X_{col} l'abscisse du col de la tuyère |
| e l'énergie interne par unité de masse | XL la longueur de la tuyère |
| M la masse molaire | $Y_{entrée}$ le rayon d'entrée de la tuyère |
| Ma nombre de Mach | Y_{sortie} le rayon de sortie de la tuyère |
| p la pression statique | Y_{col} rayon du col de la tuyère |
| r constant des gaz | ρ la masse volumique |

1. Introduction

Cette étude présente le comportement physique de l'écoulement compressible et turbulent dans une tuyère convergente-divergente, axisymétrique. Cette étude est effectuée par une simulation numérique en utilisant le logiciel FLUENT.

L'écoulement est caractérisé par une très grande vitesse (régime supersonique), et à très haute température, ce qui donne naissance aux ondes de choc au niveau du col de la tuyère. L'existence des ondes de chocs dans ce type d'écoulement produit des fortes pertes de charge qui influent directement sur la poussée de l'engin. Ces phénomènes accompagnant les écoulements supersoniques sont très nuisibles aux structures solides de la tuyère. La résolution de ces problèmes, nécessitent une forte demande de la part des industriels et des études de recherches approfondies, que ce soient analytiques, numériques ou expérimentales, et quelque soient le type d'écoulements (stationnaires, compressibles externes ou internes), pour mieux ficeler ses complexités. R. Haouia et al [1] ont présenté les résultats d'un écoulement de gaz à haute température dans une tuyère axisymétrique en régime hypersonique. Ils ont utilisé un mélange gazeux composé de cinq espèces chimiques (O_2 , N_2 , NO , O , N). Les équations aux dérivées partielles stationnaires, (équations d'Euler), qui régissent cet écoulement, sont résolues avec un schéma explicite en utilisant la méthode numérique des volumes finis et deux

modèles cinétiques de Zeldovich à (3 jusqu'à 17 réactions chimiques). Les auteurs ont utilisé un maillage de 150 nœud selon l'axe X et 10 nœud selon le rayon Y. Ils ont obtenu des résultats très intéressants dans les deux cas de modèles cités ci-dessus. A.Nebbache [2] a mis en évidence le phénomène de décollement dans une tuyère asymétrique, où le gaz d'essai est supposé comme un gaz parfait. Le système d'équations régissant cet écoulement est résolu à l'aide de la méthode des volumes finis totalement implicite de type prédicteur-correcteur avec un schéma de Mac - Cormack. Le modèle de turbulence utilisé est (k- ω). Le travail de l'auteur est basé sur deux configurations : La première configuration se compose de (une tuyère principale, un caisson et une tuyère secondaire à col amovible), avec un maillage de (236×200). La seconde configuration sans caisson et est composée (d'une tuyère principale et des domaines notés "Jet" et "Vent"). Plusieurs maillages (quatre maillage) ont été testés afin d'étudier l'indépendance du maillage. Les résultats obtenus ont été comparés dans les deux configurations. Le même auteur [3] a étudié numériquement, le décollement d'un écoulement turbulent dans une tuyère axisymétrique tronquée, où le gaz d'essai est de l'azote supposé parfait. Le système d'équations régissant cet écoulement est résolu à l'aide de la méthode des volumes finis avec un schéma totalement implicite de type prédicteur-correcteur de Mac-Cormack. Le domaine d'intégration de cette étude numérique est constitué, de trois parties distinctes : la tuyère, le jet et le domaine inférieur. Trois maillages ont été utilisés pour étudier l'indépendance du maillage. E.Mahfoudi et all [4] ont travaillé sur l'analyse physique et la simulation numérique de l'écoulement turbulent décollé dans une tuyère supersonique à contour idéal tronquée, la turbulence est modélisée par une approche statistique (RANS) en coordonnées généralisées, avec l'utilisation du modèle (SST-Menter). Le système d'équations régissant cet écoulement est résolu à l'aide de la méthode des volumes finis en maillage structuré. L'intégration en temps est réalisée par le schéma numérique totalement implicite de type prédicteur-correcteur de Mac-Cormack. M.Y. Bouzid et R. Dizene [7] ont étudié par une simulation numérique bidimensionnelle le comportement des écoulements compressibles et fortement turbulents à travers une tuyère supersonique convergente-divergente, avec l'utilisation de quatre modèles de turbulence intégrés au système des équations de Navier-Stokes moyennées par la méthode statistique de Favre.

2. Etablissement des Équations

Nous supposons dans cette étude l'écoulement d'un gaz parfait dans une tuyère adiabatique, bidimensionnel. L'écoulement est supposé inviscide, ce qui néglige l'influence des forces de frottement, ainsi que de toute force de volume. L'écoulement est de plus supposé isentropique, leurs équations fondamentales peuvent être données par les équations d'Euler : l'équation de conservations de masse, l'équation de conservation de quantité de mouvement et l'équation de conservation de l'énergie. La formulation mathématique du problème physique dans le repère cartésien est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E + p)u}{\partial x} + \frac{\partial (\rho E + p)v}{\partial y} = 0 \right. \quad (4)$$

L'énergie totale est exprimée comme suit :

$$E = e + \frac{u^2}{2} \quad (5)$$

Le gaz est parfait, alors e par unité de masse est :

$$e = c_v T \quad (6)$$

La pression du mélange est obtenue par l'équation d'état :

$$p = \rho r T \quad (7)$$

Où $\frac{R}{M}$. et la température du mélange est calculée à partir de l'équation d'énergie (4).

3. Domaine de calcul

La première étape dans tout modèle de CFD est la création d'une géométrie qui représente l'objet à étudier, elle est suivie par la génération d'un maillage qui peut être structuré ou non structuré. Une fois ce maillage achevé, les paramètres et les variables d'entrée du modèle sont spécifiés, le logiciel peut alors résoudre les équations du modèle dans chaque volume du maillage jusqu'à la convergence. La géométrie de la tuyère ainsi que le maillage sont créés par le logiciel "Gambit" 2.2.30. Plusieurs méthodes permettent la création de cette géométrie, soit on se base sur des géométries prédéfinies, soit il suffit d'entrer les coordonnées des différents points (x,y) en 2D, de créer les limites et enfin de créer la surface. La géométrie étudiée est une tuyère composée d'un convergent, d'un col et d'un divergent (Figs 1 et 2), parcourue par un écoulement compressible, turbulent et instationnaire. Le convergent et le divergent sont raccordés au col par des arcs de cercle à fin d'assurer la continuité du profil de la tuyère. On note que cette géométrie a été déjà utilisée par R.Haouia & all [1].

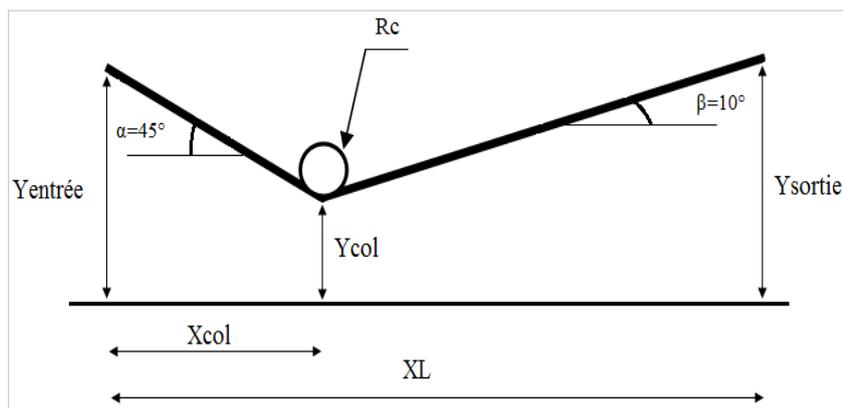


Figure 1 : Géométrie de la tuyère

Le choix du maillage est très important pour la convergence des calculs, notamment au niveau du col, où le maillage devrait être très serré. Le maillage que nous avons utilisé dans cette étude se compose de 300 nœuds selon l'axe (x) et 100 nœuds selon le rayon (y).

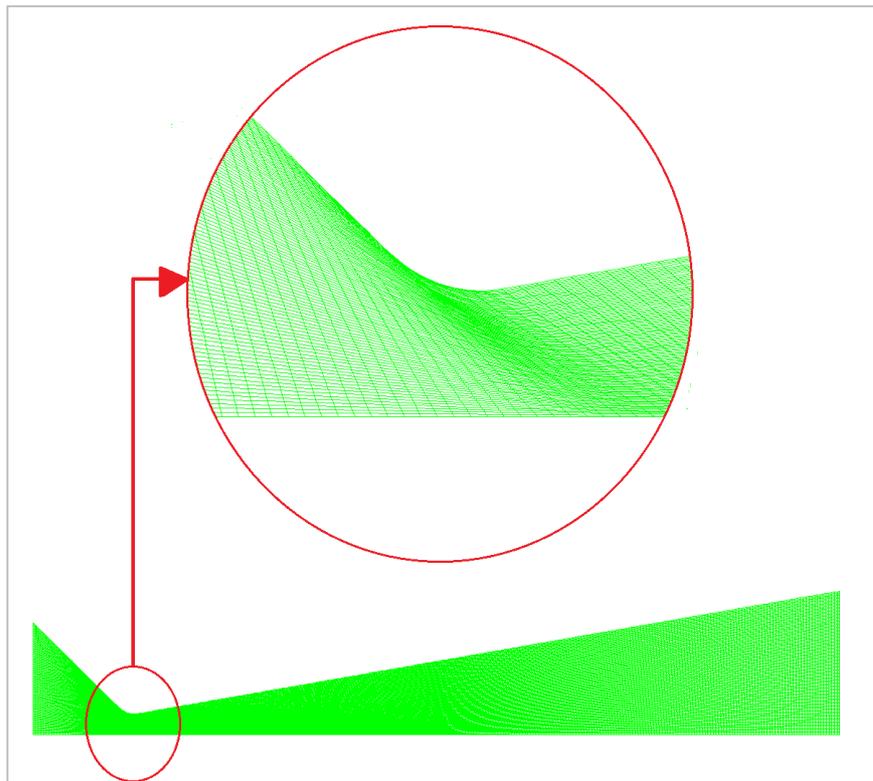


Figure 2 : Maillage la tuyère (300x100)

4. Les conditions aux limites

On a considéré que les conditions de notre étude sont similaires aux conditions l'expérience réalisée par R. Haouia et all [1], il s'agit d'un écoulement dans une tuyère de soufflerie à choc destinée essentiellement à l'étude d'écoulements hypersoniques autour de véhicules spatiaux. Donc c'est un écoulement d'air dans une tuyère de Laval aux conditions génératrices (à l'entrée de la tuyère) une pression de 100 bar et une température de 6000 K, l'air traverse la tuyère, s'accélère le long de celle-ci et s'éjecte à grande vitesse à la sortie du divergent de la tuyère : la température diminué jusqu'à la valeur de 500 K et le nombre de Mach étant supérieure à 1.

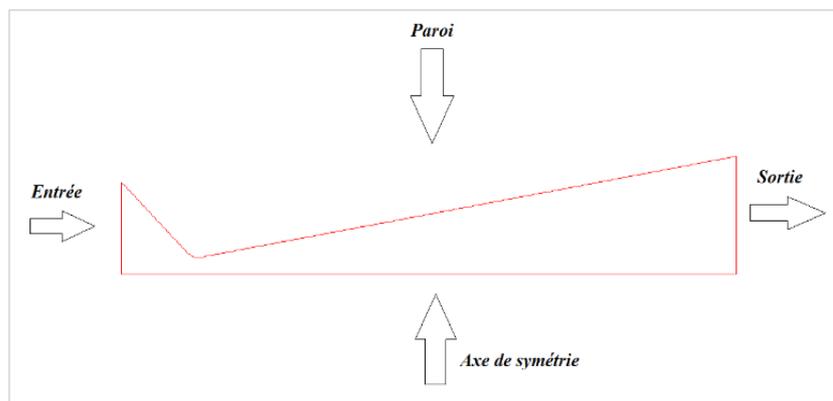


Figure 3 : Domaine de calcul

5. Validation des Résultats

Avant de commencer les simulations avec le code FLUENT pour trouver la structure de l'écoulement d'air à l'intérieure de la tuyère convergente divergente, il est nécessaire de valider les résultats obtenus avec ce code. La

validation est faite, en comparant les résultats du FLUENT avec les résultats numériques de R.Haouia et al [1]. Les profils comparés du Nombre de Mach et de la Température dans la tuyère supersonique, montrés sur les figures 4 (a et b), sont acceptable et en bon accord.

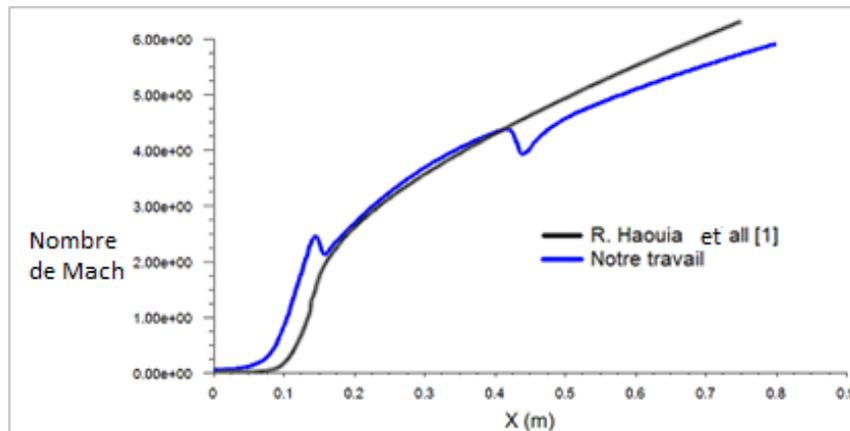


Figure 4 (a) : Profils de Nombre de Mach entre Notre étude et celui de R.Haouia et al [1]

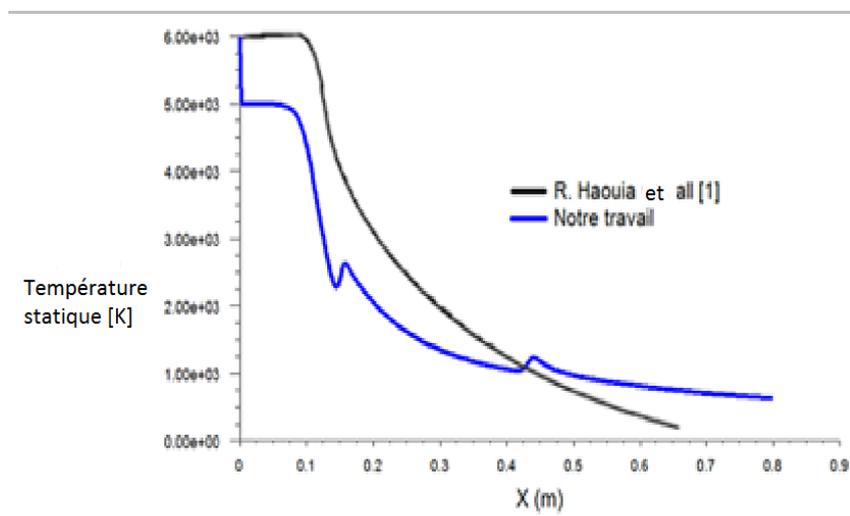


Figure 4 (b) : Profils de Température entre Notre étude et celui de R.Haouia et al [1]

6. Résultats et interprétation

On considère que le régime d'écoulement est supersonique dans une tuyère convergente-divergente, les résultats présentés ont été obtenues après 55000 itérations, le temps de calcul prend plusieurs heures.

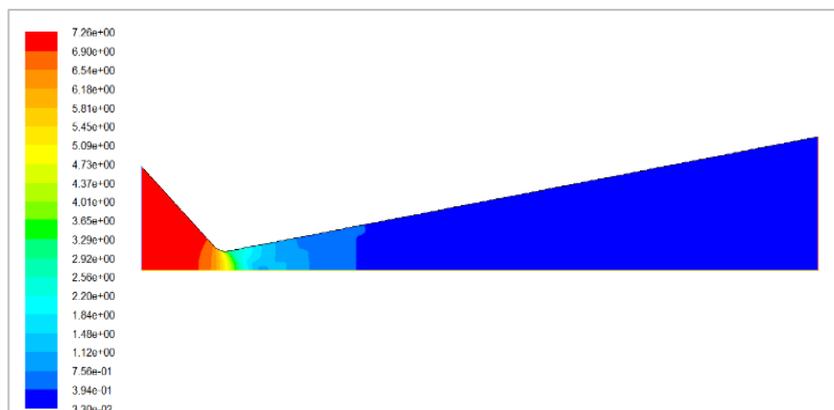


Figure 5 (a) : Champs de la masse volumique [kg/m^3]

La figure 5(a) et 5(b) représente les iso masse volumique ainsi que sa courbe d'évolution. On observe dans ces figures que le profil de la masse volumique prend deux chemins différents, le premier chemin se trouve depuis l'entrée de la tuyère jusqu'à son col, la masse volumique dans cette partie reste presque constante à sa valeur maximale. Le deuxième chemin se caractérise par une chute rapide au voisinage du col de la tuyère, puis, la masse volumique subit une brusque petite augmentation puis elle continue sa diminution jusqu'à la sortie de la tuyère, à cause du caractère compressible de l'écoulement.

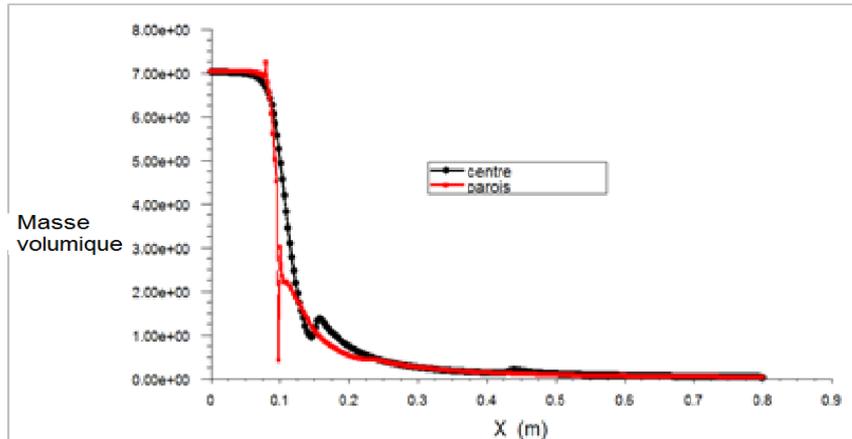


Figure 5 (b) : évolution de la masse volumique au centre et à la paroi de la tuyère [kg/m^3]

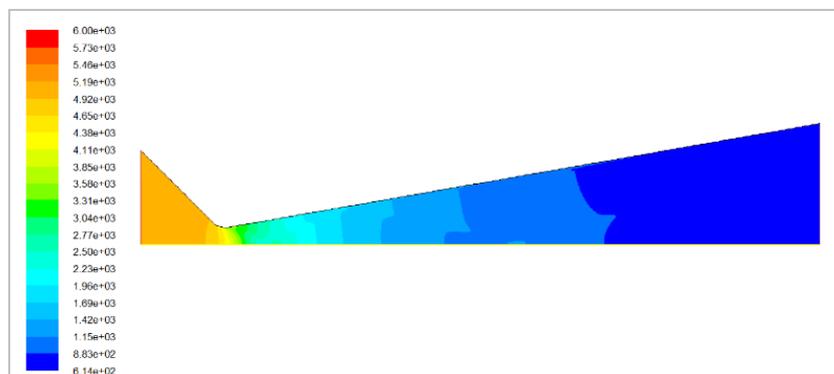


Figure 6 (a) : Champs de Température en [K]

La figure 6 (a) et (b) montre respectivement la distribution de température ainsi que sa variation selon la direction axiale au centre et près de la paroi de la tuyère. On constate que, le profil de la température au sein de la tuyère subit trois phases principaux de décroissance, la première phase est stable sous la forme d'une ligne droite, elle se situe au niveau du convergent jusqu'à le col de la tuyère. La deuxième phase de décroissance est une diminution brusque de température au niveau du col et la dernière phase se trouve dans le divergent, elle continue sa diminution jusqu'à les lèvres de la tuyère, avec des petites brusques augmentations à l'entrée du divergent ($x=0.175\text{m}$) et l'autre au milieu de ce dernier ($x = 0.45\text{m}$). D'autre part la variation de température pariétale est presque constante dans le convergent jusqu'au col, puis le profil subit une progressive diminution jusqu'à la sortie de la tuyère. Cette chute de l'énergie thermique dans le divergent est transformée en énergie cinétique.

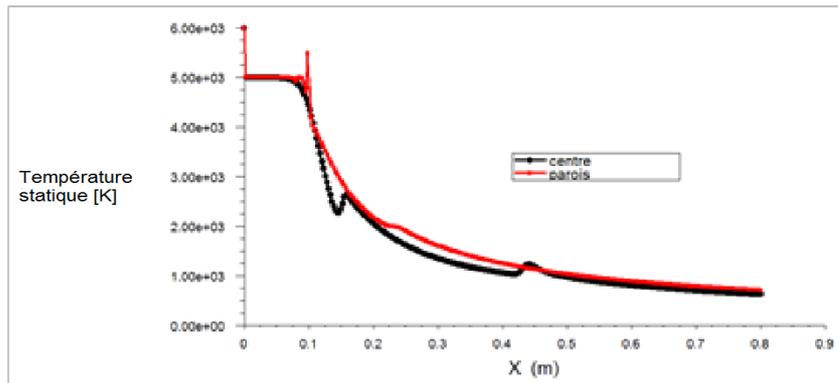


Figure 6 (b) : L'évolution de la Température au centre et à la paroi de la tuyère [K]

Les iso-valeurs ainsi que l'évolution du nombre de mach au sein (centre et paroi) de la tuyère sont représentés dans la figure 7(a) et 7(b) respectivement. On observe que, le régime subsonique à l'entrée de la tuyère reste presque stable ou invariable jusqu'à le premier contact du point de tangence au niveau du convergent. Le nombre de mach dans cette région est strictement inférieur à un, puis elle se suit par une brusque augmentation au voisinage du col de la tuyère. Dans cette zone le régime devient transsonique vu son nombre de mach, comme il y a une petite brusque diminution au centre de la tuyère, à l'entrée de la zone du divergent ($x=0.15m$), la valeur du nombre de mach au sien de la tuyère continue à augmenter jusqu'à la sortie de la tuyère où elle atteint une valeur maximal égale à 6, dans cette zone le régime de l'écoulement est dit hypersonique. Les mêmes observations pour l'évolution du nombre de mach pariétal sauf la perturbation au voisinage du col dues au frottement entre le fluide et la paroi. Ainsi le profil convergent-divergent de la tuyère permet d'accélérer les gaz d'une vitesse subsonique à une vitesse supersonique (hypersonique).

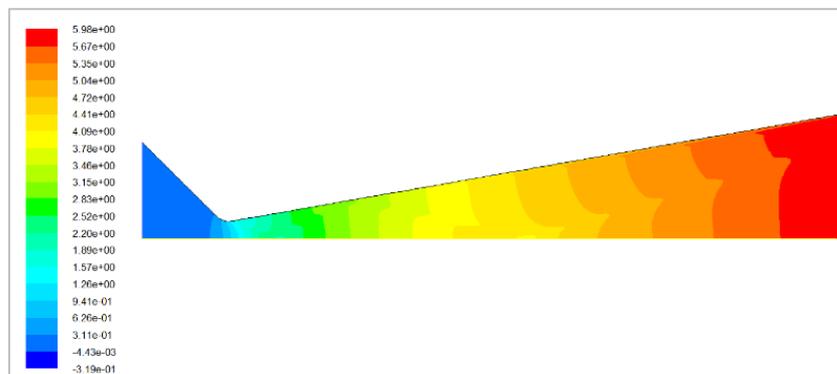


Figure 7 (a) : Distribution du nombre de Mach

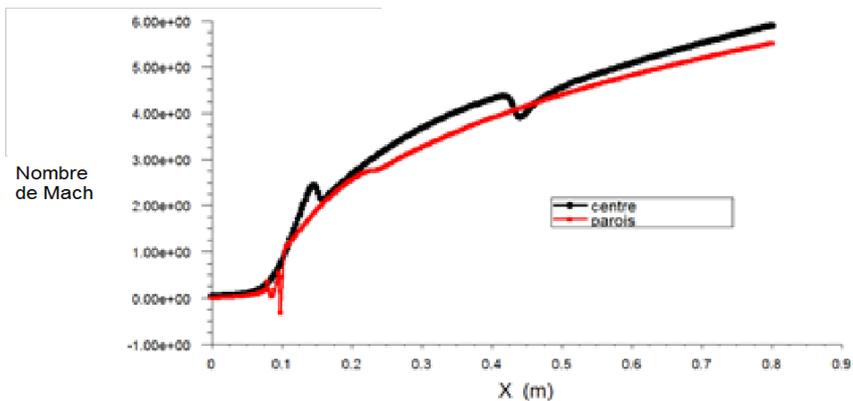


Figure 7 (b) : Evolution du nombre de Mach au centre et à la paroi de la tuyère

7. Conclusion

Lorsqu'un gaz s'écoule dans une tuyère convergente –divergente, quel que soit sa géométrie, plusieurs phénomènes complexes se manifestent. Ces phénomènes dépendent de caractéristiques physiques telles que la vitesse et la température et même aussi des propriétés thermo physiques comme la conductivité et la viscosité du fluide. Les changements de régimes au sein des écoulements des gaz dans les tuyères sont en général traités du point de vue macroscopique. La présence de ces instabilités de la structure hydrodynamique à l'intérieur de l'écoulement produit généralement à une perte de poussée et une forte perte de charge dans la tuyère.

Références

1. R. Haouia, A. Gahmousse, and D. Zeitoun, "Écoulement hors d'équilibre chimique et vibrationnel dans une tuyère hypersonique axisymétrique, " papier, accepté le 19 octobre 2000, 2001 Editions scientifiques et médicales Elsevier SAS.
2. A. Nebbache, "Modélisation d'écoulement en tuyère plane et bidimensionnelle, " 19^{ème} Congrès Français de Mécanique, Marseille, 24-28 août 2009.
3. A. Nebbache, "Aérodynamique d'un écoulement en tuyère idéale tronquée, " 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, pp. 787-795, Grenoble, 27-31 août 2007.
4. E. Mahfoudi, A. Gahmousse, and K. Talbi, "Etude numérique de l'écoulement compressible turbulent dans une tuyère supersonique, " Revue des énergies renouvelables Vol. 16 N°2 (2013) 285-296, 2013.
5. E. Mahfoudi, A. Gahmousse, A. Harizi, K. Talbi, and A. Hadjadj, "Simulation Numérique De L'écoulement Compressible Supersonique Application aux Tuyères Propulsives à Combustible liquide Hydrogène, " Revue des énergies renouvelables Vol. 15 N°3 (2012) 365-372, 2012.
6. E. Mahfoudi, "Contribution à l'étude des profils de tuyères en écoulements supersoniques visqueux par la méthode des volumes finis, " Thèse de doctorat en sciences de l'université Constantine 1, 2014.
7. M.Y. Bouzid, and R. Dizene, "Modélisation des écoulements dans les tuyères étude comparative de modèles de turbulence, " 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, Troyes, Septembre 2005.
8. A. Hadjadj, "Analyse physique et simulation numérique des écoulements compressibles, applications aux tuyères de propulseur, " Thèse de doctorat, Université de Rouen, 1997.
9. S. Dubos, "Simulation des grandes échelles d'écoulements turbulents supersoniques, " institut national des sciences appliquées de Rouen, 20 septembre 2005.
10. Y. PERROT, "Etude, mise au point et validation de modèles de turbulence compressible, " institut national des sciences appliquées de Rouen, 19 décembre 2006
11. L. Thierry, "Etude numérique d'un écoulement gazeux dans une tuyère convergente divergente - technique TVD, " Rapport de stage de 4^{ème} année, " institut national des sciences appliquées de Rouen, juin-octobre 1993.