

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université SAAD DAHLEB de Blida
Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales



Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : propulsion spatiale

Thème

**ETUDE NUMERIQUE DE LA TUYERE MLN
SUPERSONIQUE ASYMETRIQUE CIRCULAIRE**

Réalisé par

Me^{lle}. DRARENI Chaimaa

Me^{lle}. MACHI Ahlem

Promoteur

M^f. ABADA Omar

2021-2022

Remerciement

Premièrement et avant tout, nous remercions « ALLAH » de nous avoir accordé le succès de l'accomplissement de ce modeste travail et nous lui demandons de nous guider à des grades supérieurs.

Nous tenons à exprimer toute nos reconnaissances à notre promoteur de mémoire, Monsieur ABADA Omar. Nous le remercions de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Nous tenons à remercier également Mr BEKHTI Ahmed pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail, pour ses remarques avisées, pour son aide précieuse et pour tout le temps qu'il nous a consacré.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches.

Nous remercions également toute l'équipe pédagogique de l'institut d'aéronautique et des études spatiales

On tient à exprimer nos profondes gratitude et reconnaissance à toutes nos familles et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Qu'ils soient vivement remerciés.

Dédicaces

A ma très chère mère « Belkacem Fadila »

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père « Mohammed »

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A mon très cher frère « Abdenour » et mes belles sœurs « Asmaa » et « Sarah »

Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.

Aux oiseaux de la famille « Ayoub » et « Ishak »

Que dieu vous accorde santé, longue vie et succès, et vous protège pour vos parents.

A ma grand-mère, mes oncles et mes tantes. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant. Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

Sans oublier mon binôme « Ahlem » pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

DRARENI Chaimaa

Dédicaces

Je dédie cet humble travail avec grand amour et fierté:

A ceux qui ont rendu mon existence bien possible, a ceux qui ont sacrifié leur vie pour mon bonheur ma sœur et ma sœur ainsi ma sœur jusqu'à la fin Machi Adada Ce travail est spécialement pour toi.

A ceux qui sont les plus proche de moi, qui ont toujours partagé ma mère, ma nièce aussi ma seule compagne au monde Alicia Laidi et son père Faycel Laidi.

À celle qui m'a aidé et qui continue de m'aider, à celle qui, par leur amitié, par leurs orientations, leur soutien et leurs commentaires, m'ont souvent poussé à éclaircir et à approfondir beaucoup de points ici traités en particulier ma copine avec qui j'ai élaboré ce travail Drareni Chaimaa.

A tous mes compagnons dans la vie, m'ont soutenu lors de ma défaite mes chers amis noms par nom et personne par personne.

MACHI AHLEM

Résumé

L'objectif de ce travail est la conception et l'analyse numérique d'une nouvelle forme de tuyère supersonique à détente centrée (MLN).

La méthode utilisée est basée par l'application de la définition d'une ligne de courant dans l'espace à partir d'une tuyère axisymétrique. L'intérêt de cette nouvelle forme de tuyère 3D asymétrique est d'améliorer les performances d'une tuyère axisymétrique en l'occurrence son nombre de mach de sortie M_s , sa masse et son coefficient de poussée C_f . le calcul des paramètres thermodynamique (pression, température, densité et nombre de mach) est effectué. Les résultats seront comparés avec les résultats de simulation des logiciels FLUENT et ceux d'OPENFAOM.

Mots-clés

Méthode des caractéristiques, Prandtl Mayer, ANSYS, MLN.

ABSTRACT

The objective of this work is the design and the numerical analysis of a new form of supersonic nozzle with centered expansion (MLN).

The method used is based on the application of the definition of a streamline in space from an axisymmetric nozzle. The advantage of this new asymmetric 3D nozzle shape is to improve the performance of an axisymmetric nozzle, in this case its output Mach number M_s , its mass and its thrust coefficient C_f . the calculation of the thermodynamic parameters (pressure, temperature, density and Mach number) is performed. The results will be compared with the simulation results of the FLUENT software and those of OPENFAOM.

Key words

ملخص

الهدف من هذا العمل هو التصميم والتحليل العددي لشكل جديد من الفوهة الأسرع من الصوت مع التمدد المركزي (MLN). تعتمد الطريقة المستخدمة على تطبيق تعريف الانسيابية في الفضاء من فوهة متناظرة المحور يتمثل اهتمام هذا الشكل الجديد من الفوهة ثلاثية الأبعاد غير المتماثلة في تحسين أداء الفوهة ذات المحور المحوري، وفي هذه الحالة يكون رقم إخراجها Ms ، يتم حساب المعلمات الديناميكية الحرارية (الضغط ودرجة الحرارة والكثافة ورقم الماك)، كتلتها ومعامل الدفع لها C_f . ستتم مقارنة النتائج بنتائج محاكاة برنامج FLUENT ونتائج OPENFOAM.

الكلمات المفتاحية

Prandtl Mayer، ANSYS، MLN، طريقة الخصائص،

Table des matières

Remerciement.....	I
Dédicaces.....	II
Dédicaces.....	III
Résumé.....	IV
Table des matières.....	VI
Liste des figures.....	X
Liste des tableaux.....	XIV
Nomenclature.....	XV
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES TUYERES SUPERSONIQUES 4	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Définition de la tuyère.....	5
I.3 Présentation d'une tuyère supersonique.....	5
I.4. Applications des tuyères supersoniques:.....	6
I.4.1 Moteurs fusée :	6
I.4.2 Moteurs avions de combats :	7
I.4.3 Soufflerie :	8
I.5. Les différentes configurations des tuyères supersoniques.....	8
I.5.1 Les tuyères conventionnelles:	9
I.5.2 Tuyères adaptées en altitude :.....	11
I.5.3. Tuyères innovantes :	16
I.6 Fonctionnement réel de la tuyère supersonique :.....	17
I.6.1Forme géométrique d'une tuyère supersonique:.....	17
I.6.2 Les différents régimes d'écoulement.....	18
I.7. Les paramètre de performances	20
I.8. Conclusion :	22
CHAPITRE II : CONCEPTION DE LA TUYERE CIRCULAIREASYMÉTRIQUE DANS Y+ 23	
II.1. Introduction	23
II.2. Conception de la tuyère asymétrique circulaire dans Y+.....	23
II.3. Résultat de la conception de la tuyère asymétrique.....	28

II.3.1. Contour de la tuyère asymétrique circulaire dans Y^+	28
II.3.2. Effet de la température génératrice T_0 sur le contour de la tuyère.....	30
II.4. Effet du nombre de Mach de sortie M_5 sur le contour de la tuyère	31
CHAPITRE III : EQUATIONS FONDAMENTALES	34
III.1 Introduction :	34
III.2 Le modèle physique :.....	34
III.2.1 Hypothèses:.....	35
III.3 Classification des gaz:	35
III.4 Formulation mathématique du gaz parfait:	36
III.4.1 Relations thermodynamique:.....	36
III.4.2 Equations fondamentales:	38
III.4.3 Relation de la dynamique des gaz:	39
III.5 L'entropie en fonction du nombre de Mach:	42
III.6 Effet de variation de section sur l'écoulement [16]:.....	43
III.7 Paramètres thermodynamique à haute température :	45
III.7.1 Equation adiabatique :	45
III.7.2 Equation de la vitesse sonore en fonction de la température :.....	47
III.7.3 la vitesse en fonction de température :	48
III.7.4 Nombre de mach en fonction de température :.....	49
III.7.5 Formule de la masse volumique en fonction de la température :.....	49
III.7.6 La pression en fonction de température :.....	50
III.7.7 la formule de la section en fonction de température :	51
III.8 procédure de calcul pour le gaz à haute température :.....	52
III.8.1 Polynôme d'interpolation de $C_p(T)$:.....	53
III.8.2 Intégration de la chaleur spécifique $C_p(T)$:.....	54
III.8.3 L'erreur relative de modèle gaz parfait :.....	55
III.9 Conclusion	56
CHAPITRE IV : Simulation Numérique par ANSYS.....	53
IV.1. Introduction	53
IV.2. Simulation Ansys-fluent	54
IV.2.1. le modèle ANSYS Workbench	55
IV.2.2. Architecture du logiciel FLUENT.....	55
IV.2.3. Procédure de résolution numérique par « Fluent »	56
IV.3. simulation de la tuyère MLN.....	57

IV.3.1 Géométrie	57
IV.3.2 Maillage.....	58
IV.3.4 Schéma de convergence	60
IV.4.1. Géométrie	61
IV.4.2 Maillage.....	62
IV.5.1 Géométrie	65
IV.5.2. Maillage.....	66
IV.5.3. Configuration	67
CHAPITRE V : SIMULATION NUMERIQUE PAR OPENFOAM.....	68
V.1. Introduction Générale OpenFOAM.....	68
V.2. Tuyère MLN.....	69
V.2.1 Importation du maillage	69
V.2.2 Choix de solveur.....	69
V.2.3 Lancement du calcul	84
V.3. Tuyère a détente centré circulaire dans Y+	85
V.3.1. Importation du maillage	85
V.3.2. Le choix de solveur.....	86
V.3.3. Lancement de calcul	90
V.4. tuyère à détente centré circulaire dans Y+ après correction.....	91
V.4.1. importation de maillage.....	91
V.4.2. Choix de solveur.....	91
V.4.3. Lancement de calcul	96
CHAPITRE VI : RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	97
VI -1. Introduction	97
VI -2.Résultats sur la tuyère à détente centré axisymétrique.....	97
VI -2-1.Variation des paramètres de l'écoulement le long de la tuyère	97
VI.3.Résultats sur la tuyère à détente centré circulaire dans Y+	106
VI.3-1.Variation de paramètres de l'écoulement dans la tuyère.....	108
VI.4. Résultats sur la tuyère à détente centré asymétrique circulaire dans Y+ après correction ...	115
VI.4.1. la variation des paramètres d'écoulement dans la tuyère	116
CONCLUSION GENERALE	124
Références	126

Liste des figures

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES TUYERES SUPERSONIQUES

Figure I-1 : tuyère de Laval.....	4
Figure I-2 : schéma d'une tuyère convergent-divergent (de Laval).....	6
Figure I-3 : Tuyère propulsive d'un moteur fusée.	6
Figure I-4 : Tuyère d'une soufflerie supersonique.	8
Figure I-5 : Tuyère conique.....	9
Figure I-6 : Tuyère annulaire.	11
Figure I-7 : Tuyère à double galbe.....	12
Figure I-8 : Tuyère à détente centrée	13
Figure I-9 : Tuyère double col.....	14
Figure I-10 : Tuyère type bouchon.....	15
Figure I-11 : Tuyère type détente-déviation	16
Figure I-12 : Tuyère à chevrons.....	17
Figure I-13 : Organisation de l'écoulement en régime de sous-détente.	19
Figure I-14 : régime d'écoulement supersonique sur détente.....	20
Figure II-1 : Section de sortie arbitraire avec différentes dispositions.....	24

CHAPITRE II : CONCEPTION DE LA TUYERE ASYMETRIQUE CIRCULAIRE PLACEE DANS Y^+

Figure II-2 : Choix de la section de sortie d'une tuyère tridimensionnelle dans la zone d'écoulement uniforme	24
Figure II-3 : scrétisation de la section de sortie de la tuyère tridimensionnelle et numérotation des nœuds choisis.....	25
Figure II-4 : Forme en profil de la tuyère passant par un point de la section de sortie	26
Figure II-5 : Eléments finis placés entre deux stations successives de la tuyère 3D..	27
Figure II-6 : Tuyère circulaire dans y^* avec et sans raffinement du nombre de sections insérées longitudinalement NL et du nombre de points insérés transversalement NT pour $MS=3,00$	29
Figure II-7 : Variation des coefficients de masse et de poussée des formes de la tuyère circulaire dans Y^+ asymétriques en fonction de la température T_0 pour $MS=3,00$	31
Figure II-8 : Formes des tuyères 3D de forme circulaire pour différentes valeurs du nombre de Mach de sortie MS pour $T_0=2000$ K.....	33

CHAPITRE III : EQUATIONS FONDAMENTALES

Figure III-1 : Géométrie d'une tuyère MLN.	34
--	----

Figure III-2 : Entropie comme fonction de mach.	42
Figure III-3 : Volume du fluide limité par la paroi de la tuyère et les deux sections.	43

CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE PAR ANSYS

Figure IV-1 : les principales étapes d'ANSYS Fluent.....	56
Figure IV-2 : Étape de la résolution numérique par Fluent	57
Figure IV-3 : la géométrie de la tuyère sur Design Modeler	58
Figure IV-4 : maillage finale de la tuyère axisymétrique	59
Figure IV-5 : Vérification du critère d'orthogonalité.....	59
Figure IV-6 : Schéma de convergence pour tuyère axisymétrique	61
Figure IV-7 : la géométrie de la tuyère sur Design Modeler	62
Figure IV-8 : maillage finale de la tuyère	62
Figure IV-9 : Vérification du critère d'orthogonalité.....	63
Figure IV-10 : la géométrie de la tuyère sur Désigne Modeler.....	65
Figure IV-11 : maillage finale	66
Figure IV-12 : Vérification du critère d'orthogonalité.....	66
Figure IV-13 : schéma de convergence.....	67

CHAPITRE V : SIMULATION NUMERIQUE PAR OPENFOAM

Figure V-1 : importation de maillage fluent	69
Figure V-2 : Structure basique de dossier de cas pour la tuyère MLN	70
Figure V-3 : commande d'importation de maillage	71
Figure V-4 : création de dossier polymesh	71
Figure V-5 : page thermo physique	73
Figure V-6 : page de turbulence	74
Figure V-7 : maillage finale	74
Figure V-8 : page de vitesse U	77
Figure V-9 : page de pression P	78
Figure V-10 : page de température T	79
Figure V-11 : page de blockMesh.....	80
Figure V-12 : page de cotrolDict.....	81
Figure V-13 : page de fvShemas	82
Figure V-14 : page de fvSolution	83
Figure V-15 : commandes utilisés sur le terminal	84
Figure V-16 : calcul de simulation.....	84
Figure V-17 : dossiers créés à la fin de calcul	85
Figure V-18 :Les pages des variables calculés	85
Figure V-19 :Importation de maillage.....	86
Figure V-20 : Structure de cas.....	86
Figure V-21 : maillage finale	87
Figure V-22 : page de vitesse U	88

Figure V-23: page de pression P	88
Figure V-24: page de température T	89
Figure V-25: page de controlDict	90
Figure V-26: fichiers de simulation	91
Figure V-27: importation de maillage	91
Figure V-28: Structure de cas	92
Figure V-29: maillage finale	92
Figure V-30: page de vitesse U	93
Figure V-31: Page de pression P	94
Figure V-32: page de température T	94
Figure V-33: page de réglage controlDict	95
Figure V-34: fichiers créés à la fin de simulation	96

CHAPITRE VI : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Figure VI-1: Le nombre de mach sur Ansys	98
Figure VI-2 : Le nombre de mach sur OpenFOAM	98
Figure VI-3: Le nombre de mach obtenu numériquement	99
Figure VI-4: Les courbes de nombres de mach le long du contour de la tuyère	100
Figure VI-5: Les courbes de nombres de mach le long de l'axe de symétrie.....	100
Figure VI-6: La pression sur Ansys.....	101
Figure VI-7: La pression sur OpenFOAM	102
Figure VI-8: La pression obtenue numériquement.....	102
Figure VI-9 : Les courbes de rapport des pressions le long de la paroi de tuyère .	103
Figure VI-10: Les courbes de rapport des pressions le long de l'axe de symétrie .	103
Figure VI-11 : La température sur Ansys.....	104
Figure VI-12: La température sur OpenFOAM.....	104
Figure VI-13: La température obtenue numériquement.....	105
Figure VI-14: Les courbes de rapport des températures le long de la paroi de tuyère	105
Figure VI-15 : Les courbes de rapport des températures le long de l'axe de symétrie	106
Figure VI-16: les différentes configurations de la tuyère asymétrique circulaire dans Y+ pour Ms=3.00 et T0=300 k	108
Figure VI-17: Le nombre de mach sur Ansys	108
Figure VI-18: Le nombre de mach sur OpenFOAM	109
Figure VI-19: Les courbes de nombre de mach le long de la paroi de tuyère	110
Figure VI-20: Les courbes de nombre de mach le long de l'axe de tuyère	110
Figure VI-21 : La pression sur Ansys.....	111
Figure VI-22: La pression sur OpenFOAM	111
Figure VI-23: Les courbes de rapport des pressions le long de la paroi de tuyère	112
Figure VI-24 : Les courbes de rapport des pressions le long de l'axe de tuyère ...	112
Figure VI-25: La température sur Ansys.....	113
Figure VI-26: La température sur OpenFOAM.....	113

Figure VI-27: Les courbes de rapport des températures le long de la paroi de tuyère 114

Figure VI-28: Les courbes de rapport des températures le long de l'axe de tuyère 114

Figure VI-29: différentes configuration de la tuyère asymétrique circulaire dans Y+ après correction pour $M_s=3.00$ et $T_0=300$ k..... 116

Figure VI-30: Le nombre de mach sur Ansys 117

Figure VI-31: Le nombre de mach sur OpenFOAM 117

Figure VI-32: Les courbes de nombre de mach le long de la paroi de tuyère 118

Figure VI-33: Les courbes de nombre de mach le long de l'axe de tuyère 118

Figure VI-34: La pression sur Ansys..... 119

Figure VI-35: La pression sur OpenFOAM 119

Figure VI-36: Les courbes de rapport des pressions le long de la paroi de tuyère 120

Figure VI-37: Les courbes de rapport des pressions le long de l'axe de tuyère 120

Figure VI-38: La température sur Ansys 121

Figure VI-39 : La température sur OpenFOAM..... 121

Figure VI-40: Les courbes de rapport des températures le long de la paroi de tuyère 122

Figure VI-41: Les courbes de rapport des températures le long de l'axe de tuyère 122

Liste des tableaux

CHAPITRE II : CONCEPTION DE LA TUYERE ASYMETRIQUE CIRCULAIARE DANS Y^+

Tableau II-1 : Valeurs numériques de conception de la tuyère pour $MS = 2,00$ 32

Tableau II-2: Valeurs numériques de conception de la tuyère pour $MS = 3,00$ 32

Tableau II-3: Valeurs numériques de conception de la tuyère pour $MS = 4,00$ 33

Tableau II-4: Valeurs numériques de conception de la tuyère pour $MS = 5.00$ 33

CHAPITRE III : EQUATIONS FONDAMENTALES

Tableau III-1 : Table de variation de $C_p(T)$ et $\gamma(T)$ en fonction de la température pour l'air..... 52

Tableau III-2 : Coefficients du polynôme $C_p(T)$ 53

CHAPITRE VI : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Tableau VI-1: Les résultats numérique de la tuyère axisymétrique 99

Tableau VI-2 : Les résultats numérique de la tuyère circulaire 109

Tableau VI-3: Les résultats numérique de la tuyère circulaire après correction..... 117

Nomenclature

Symboles latins

C_f	:	Le coefficient de poussée
P_e	:	Pression à la sortie de la tuyère
N_L	:	Nombre sections insérées longitudinalement
N_T	:	nombre de points transversaux
P_0	:	Pression total
A	:	Section de tuyère
A^*	:	Section au col
V_e	:	Vitesse à la sortie de la tuyère
M	:	Nombre de mach
P_a	:	Pression ambiant
P	:	Pression statique
F	:	Force de poussée
\dot{m}	:	Débit
M	:	Nombre de mach
V_{eff}	:	Vitesse effective
I_s	:	Impulsion spécifique
P/P_0	:	Rapport de pression statique sur la pression initiale
T/T_0	:	Rapport de température sur la température initiale
L	:	longueur
P	:	la poussée
E	:	Energie
U	:	Energie interne
v	:	Volume
T	:	Température

\mathbf{V}	:	Vitesse
\mathbf{a}	:	Accélération de son
K_n	:	Nombre de Knudsen
R_e	:	Nombre de Reynolds
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu$	:	Constantes de modèle $k - \varepsilon$

Symboles grecs

λ	:	Facteur de perte de poussée
α	:	Angle de divergence de la tuyère
β	:	Angle formé par l'axe de la tuyère et la paroi intérieur
ρ	:	Masse volumique
C_p	:	La chaleur spécifique à pression constante
C_v	:	La chaleur spécifique à volume constant
γ	:	Rapport des chaleurs spécifiques
μ	:	Viscosité dynamique
τ_{ij}	:	Tenseur des contraintes visqueuses
δ_{ij}	:	Tenseur de Kroneker
ν	:	Viscosité cinématique
ε	:	Taux de dissipation de l'énergie cinétique
ω	:	Fréquence de turbulence
μ_t	:	Viscosité turbulente
$\sigma_\varepsilon, \sigma_h, \sigma_k$	:	Constantes de modèle $k - \varepsilon$

Acronyms

CFD	Computational Fluid Dynamics.
FP	Flux primaire
FS	Flux secondaire
DNS	Direct Numerical Simulation.

LES	Large Eddy Simulation
CAO	La conception et la génération des géométries en 3D/2D
HVAC	Heating, Ventilation and Air-Conditioning
RNG	Random number generators
RANS	Reynolds Average Navies Stokes
SST	Shear Stress Tensor
RSM	Reynolds Stress Model
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
PISO	Pressure-Implicit with Splitting of Operators
SIMPLEC	SIMPLE Consistent
MLN	Minimum Length Nozzle
HT	Haute Température
GP	Gaz Parfait
2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
OpenFOAM	Open-source Field Operation and Manipulation

Indices inférieurs et exposants

i, j	Coordonnées dans les directions x, y
t	Turbulent
–	Valeur moyenne
'	Fluctuation
*	Critique

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Un système propulsif est généralement un système qui accélère une matière pour fournir une force de poussée qui déplace un véhicule ou le fait tourner par rapport à son centre de masse. La tuyère est l'un des composants le plus important de ce moteur parce que son efficacité affecte considérablement les performances de ce dernier, Elle intervient dans beaucoup de structures telles que les missiles, les moteurs d'avions et dans la fabrication des souffleries supersoniques pour la modélisation et la réalisation expérimentale des écoulements supersoniques réels. Les concepteurs aérodynamiciens ont débuté les applications en 1935. A cette époque, toutes les études étaient basées sur les expériences. Le développement par ordinateur n'avait pas commencé.

Après quelques années, en parallèle avec les développements expérimentaux et numériques, les concepteurs ont pensé à améliorer les performances des tuyères de propulsion. Ils ont remarqué que les tuyères coniques délivrent certes une poussée, mais une perte considérable, vu l'inclinaison de la portion supersonique.

Donc si l'inclinaison de la tuyère à la section de sortie est nulle, la poussée délivrée par le moteur sera donc complètement utilisée pour la propulsion et sera par conséquent maximale. Ce problème sera réglé par la recherche d'une forme de tuyère donnant à la sortie un écoulement parallèle.

Pour les applications des moteurs fusés, la conception est basée sur deux facteurs essentiels qui sont : l'obtention d'une poussée maximale avec un poids le plus petit possible de la tuyère (longueur minimale). Il est connu que la masse de la tuyère contient une grande portion de la masse totale des missiles.

En jouant sur ces facteurs, plusieurs formes de tuyères ont été trouvées parmi lesquelles la tuyère à détente centrée (MLN) qui est l'objet de cette étude de plusieurs formes comme la tuyère carrée et la tuyère circulaire. Et chacune des formes a ces caractéristiques et ces performances.

L'objectif d'une tuyère est d'augmenter l'énergie cinétique du fluide qui la traverse, c'est-à-dire sa vitesse, en transformant son énergie interne c'est-à-dire sa température.

Le principe de fonctionnement d'une tuyère repose sur les propriétés des gaz lorsqu'ils circulent aux vitesses subsonique et supersonique. Lorsqu'un gaz circule à une vitesse subsonique dans un tuyau dont le diamètre se rétrécit, sa vitesse augmente. La vitesse du gaz ne peut toutefois pas dépasser celle du son (Mach 1). En effet en régime d'écoulement supersonique (vitesse supérieure à la vitesse du son) le comportement du gaz s'inverse : pour que sa vitesse augmente, il faut que le diamètre du tuyau augmente. Ce comportement des gaz repose sur le principe d'accélération des gaz décrit par l'équation d'Hugoniot

Alors l'objectif de cette étude, consiste à simuler et Analyser l'écoulement d'un gaz parfait une tuyère une seule galbe dont la tuyère de base est de forme MLN (Minimum nozzle light). La simulation est faite sur l'Ansys-fluent et OpenFoam. L'évaluation des paramètres thermodynamique (nombre de mach, pression statique, température statique ...) sont analysés et compares dans les deux logiciels.

Organisation du mémoire

Suite à cette introduction sur les tuyères supersoniques, l'étude de la problématique envisagée est réalisée en six chapitres, une conclusion générale et quelques références.

Le premier chapitre consiste à donner un historique du développement et présentation de la tuyère supersonique. Ainsi, les différents profils des tuyères et le fonctionnement théorique avec les différents régimes d'écoulement sont discutés.

Dans le deuxième chapitre on a essayé de développer une description sur notre tuyère, et la méthode de conception de cette dernière.

Le troisième chapitre consiste à présenter le simulateur OpenFOAM et ces composantes telle que ces avantages et ces inconvénients.

Dans le quatrième chapitre nous avons cité les étapes suivies pour élaborer la simulation dans Ansys-Fluent de la nouvelle forme des tuyères à détente centrée.

Dans le cinquième chapitre on a basé sur l'utilisation d'OpenFOAM et comment on a appliqué sur notre tuyère.

Le sixième chapitre qui représente le dernier chapitre est dédié à la présentation de toutes les résultats obtenus par le logiciel Ansys et OpenFoam, et l'interprétation des paramètres obtenue (le nombre de mach, la pression, et la température) et on finira par une comparaison entre les deux types de tuyère (MLN, et tuyère asymétrique circulaire).

Ce mémoire se termine par une conclusion générale qui reprend les objectifs du présent travail et les principaux résultats obtenus. Des perspectives pour la poursuite de cette étude sont proposées.

CHAPITRE I
GENERALITE SUR LES
TUYERES SUPERSONIQUE

Résumé

Le premier chapitre contient généralité sur les tuyères et les souffleries supersonique et les différents régimes d'écoulement, puis les différents profils des tuyères.

Aperçu

I.1. Introduction.

I.2. Définition de tuyère.

I.3. Présentation d'une tuyère supersonique.

I.4. Applications des tuyères supersoniques.

I.4.1 Moteurs fusée

I.4.2 Moteurs avions de combats

I.4.3 Soufflerie.

I.5. Les différentes configurations des tuyères supersoniques.

I.5.1 Les tuyères conventionnelles.

I.5.2 Tuyères adaptées en altitude

I.5.2.1. Les tuyères à décollement contrôlé.

I.5.2.2. Les tuyères bi-modes.

I.5.2.3 Tuyère auto-ajustables.

I.5.3. Tuyères innovantes.

I.6. Fonctionnement réel de la tuyère supersonique.

I.6.1 Forme géométrique d'une tuyère supersonique

I.6.2 Les différents régimes d'écoulement

I.7. Les paramètre de performances.

I.8. Conclusion

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES TUYERES SUPERSONIQUES

I.1. Introduction

D'un point de vue historique, depuis plusieurs années de nombreux chercheurs et ingénieurs travail pour le développement de la tuyère. **Gustaf de Laval** construisit en 1887 une petite machine à vapeur pour prouver que de tels appareils peuvent être fabriqués dans des dimensions réduites, et en 1890 il développe une tuyère permettant d'augmenter la vitesse de la vapeur entrant dans la turbine. On la connaît de nos jours sous le nom de tuyère de Laval et elle présente une importance particulière dans la conception de fusée, de turbine à vapeur et à gaz, ainsi que les machines frigorifiques et dans l'écoulement des fluides travers ces dernier [1].



Figure I-1 : tuyère da Laval

La forme générale du contour d'une tuyère, présente trois parties essentielles [2], la figure (I.2) :

- **Le convergent** : c'est la partie amont de la tuyère. Situé entre la chambre de combustion et le col, son rétrécissement contribue à l'accélération des gaz ou l'écoulement est subsonique.

- **Le col** : est la partie du canal d'écoulement des gaz qui a le plus petit diamètre et qui par le choix de ses dimensions, fixe le point de fonctionnement de moteur où l'écoulement atteint la vitesse du son.
- **Le divergent** : il augmente la vitesse d'éjection des gaz au cours de leur détente et améliore, de ce fait, leur effet propulsif où l'écoulement atteint des vitesses supersoniques.

I.2. Définition de la tuyère

Une tuyère est un canal où l'énergie cinétique d'un fluide est augmentée au cours d'une évolution adiabatique. Cette augmentation d'énergie entraîne une chute de pression et se réalise grâce à une modification appropriée de la section d'écoulement.

I.3 Présentation d'une tuyère supersonique

Une tuyère supersonique est une conduite de forme convergente-divergente qui a un profil spécifiquement étudié. Elle met en communication une chambre contenant un gaz comprimé avec un milieu extérieur d'évacuation. La chambre et le milieu extérieur sont à des pressions différentes pour permettre le mouvement du gaz. La tuyère supersonique a pour rôle d'accélérer les gaz d'une vitesse faible à l'entrée du convergent à une vitesse sonique au col puis à une vitesse supersonique à la sortie du divergent de la tuyère.

La forme de la tuyère permet de détendre les gaz. L'opération de détente transforme l'énergie potentielle du gaz en énergie cinétique. Tout le long de la tuyère, la vitesse du gaz augmente, cependant que sa pression et sa température diminue. La tuyère supersonique est appelée tuyère de Laval, elle est représentée dans la figure (I.2) [3].

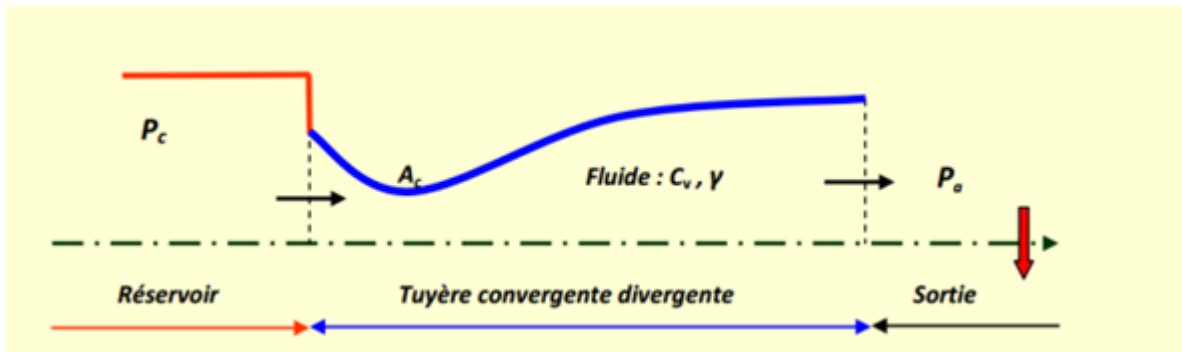


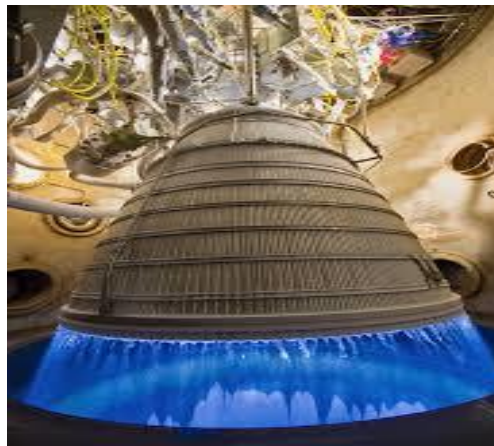
Figure I-2 : schéma d'une tuyère convergent-divergente (de Laval).

Selon la géométrie, on trouve des tuyères supersoniques planes ou axisymétriques. Les tuyères axisymétriques sont réalisées par la révolution d'une courbe autour de l'axe central. Les tuyères planes (2D) ont un profil variant dans le plan x-y, mais dont la largeur (plan z) reste constante [4].

I.4. Applications des supersoniques:

I.4.1 Moteurs fusée :

Dans le cas des propulsives pour les (figure I.3), elles force propulsive en faisant



tuyères

tuyères moteurs de fusées contribuent à la guider et accélérer

les gaz d'échappement produits par la combustion d'une manière à maximiser la vitesse de l'écoulement à la sortie, à vitesse supersonique dans le but d'obtenir une force de poussée. Notons ici que la structure d'un missile est constituée par la chambre de combustion et la tuyère constituant environ 70% de la masse totale d'une chambre propulsive.

Figure I-3: Tuyère propulsive d'un moteur fusée.

I.4.2 Moteurs avions de combats :

Le progrès majeur qui a été réalisé en aviation au cours de ce siècle, sans doute est l'avènement du vol supersonique, qui à ses débuts n'a d'ailleurs pas provoqué un changement d'attitude immédiat chez les constructeurs, car le souci primordial pour les premiers avions supersoniques militaires c'est d'assurer de bonnes conditions de vol subsonique ou transsonique de sorte que l'emploi d'un divergent était pratiquement proscrit pour éviter les régimes de sur détente à ces vitesses modérées. La rentabilité de tels projets n'est assurée que si les performances optimales sont obtenues de tous les éléments du moteur, dans tels projets le rôle assigné à la tuyère est définie de la façon suivante:

- assurer la détente optimale des gaz de combustion. C'est-à-dire, la poussée maximale du régime de la croisière. Ce problème est délicat, car la section de sortie doit être raccordée au maître couple du moteur; ou la structure de l'avion par carénage.
- assurer le blocage de l'écoulement aux divers régimes de fonctionnement par la variation de la surface au col en fonction du débit et des conditions de températures et de pression des gaz à évacuer.
- Au régime du vol intermédiaire, la tuyère ne doit pas provoquer des pertes de poussée trop élevées du fait de son inadéquation.
- contribuer au freinage de l'avion à la phase d'atterrissage et à l'atténuation de bruit.

I.4.3 Soufflerie :

Une soufflerie supersonique est une installation d'essais utilisée en aérodynamique dans le but de recréer des conditions de vol d'un appareil à des fins expérimentales en simulant des écoulements réels sur des prototypes à échelle réduite (profil d'aile, maquette d'avion...), qui sont fondés sur le principe de l'uniformité et l'analogie à l'air libre de l'atmosphère, du profil de vitesse ainsi que celui du nombre de Mach en sortie de tuyère. Cette dernière est l'élément indispensable de la soufflerie permettant de faire passer l'écoulement d'air à une vitesse supersonique.

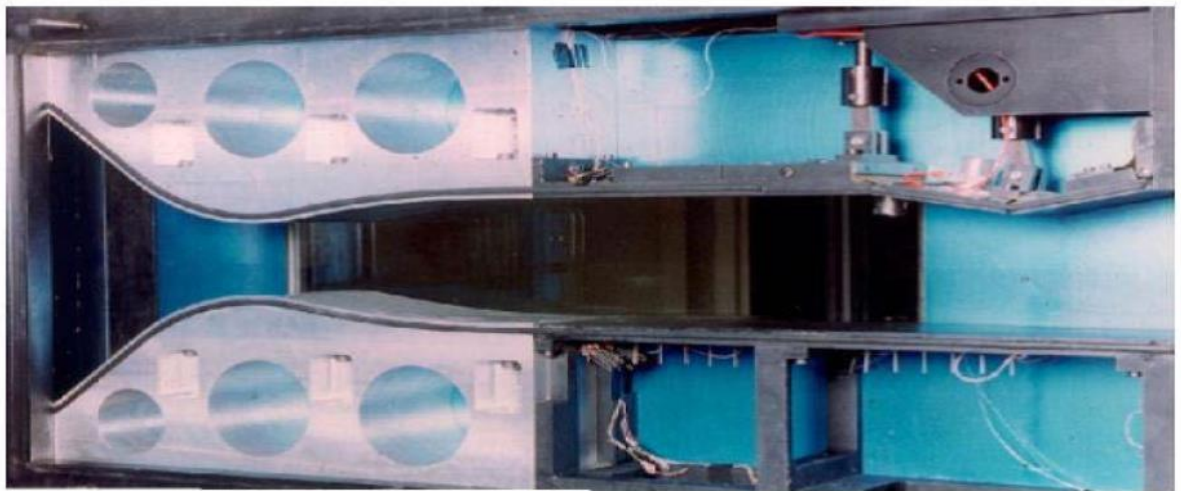


Figure I-4: Tuyère d'une soufflerie supersonique.

I.5. Les différentes configurations des tuyères supersoniques

Les tuyères sont des canaux d'éjection ayant pour rôle principal, de transformer l'énergie de pression « enthalpie », en énergie cinétique. Les profils de ces tuyères sont tels qu'ils se confondent avec une ligne de courant. Leur détermination se fait généralement par la méthode des caractéristiques [5].

Pour qu'une tuyère contribue de manière optimale l'accélération des gaz (tuyère adaptée), il est nécessaire qu'elle soit relativement longue induisant ainsi à l'alourdissement de la structure ce qui est préjudiciable aux performances globales. Cependant la poussée d'une tuyère n'est pas uniquement une image de taux

d'accélération des gaz dans la partie divergente mais aussi de la direction des gaz à la section des sorties, pour ce faire plusieurs configurations de tuyères ont vu le jour fondés sur le principe de l'uniformité et l'axialité de l'écoulement produisant à la sortie une pression égale à la pression ambiante. En outre chaque configuration a été conçue dans le but de répondre à des critères ainsi qu'à des besoins précis permettant d'en faire une classification selon différentes catégories:

I.5.1 Les tuyères conventionnelles:

➤ Tuyère conique :

C'est la configuration la plus simple d'une tuyère supersonique, elle fut largement utilisée pour la conception des premiers moteurs fusées où des méthodes de fabrication simple sont préférées, voir figure I.5. Néanmoins, elles sont encore employées pour équiper les petits moteurs propulsifs. Généralement ces tuyères présentent des angles de divergence entre 15 et 30° [6].

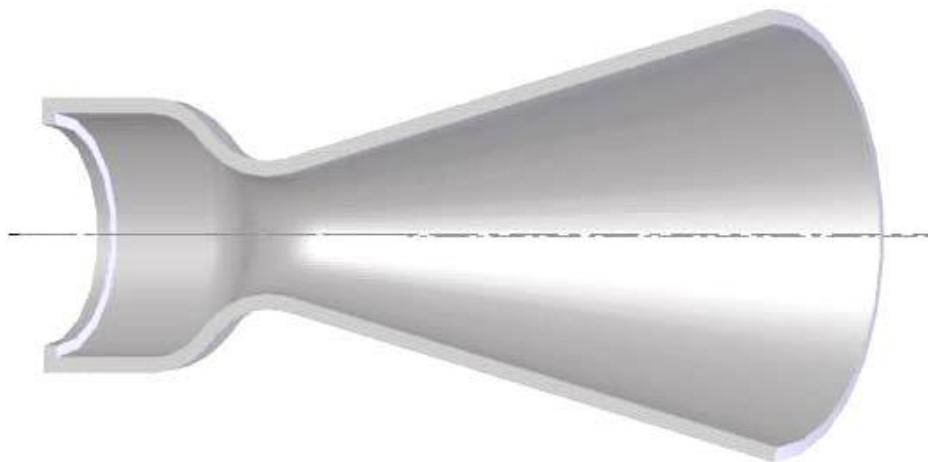


Figure I-5: Tuyère conique.

Cette configuration engendre une perte considérable de poussée due à la divergence de l'écoulement (direction non axiale) à la section de sortie, cette perte est quantifiée par Malin [7] qui a défini un facteur qui dépend de l'angle de divergence du cône :

$$\lambda = \frac{1 + \cos \alpha}{2} \tag{I.1}$$

Avec :

α : Angle de divergence de la tuyère

Le coefficient de poussée développé par ce type de tuyères est approximativement inférieur à 1.7% d'une tuyère idéal et est égal à [8]:

$$C_f = \frac{P_e A_e}{P_0 A^*} + \frac{1 + \cos \alpha}{2} \frac{\rho_e V_e^2 A_e}{P_e A_e} \quad (1.2)$$

Avec :

P_e : Pression à la sortie de la tuyère

P_0 : Pression total

A_e : Section de sortie de la tuyère

A^* : Section au col de la tuyère

ρ_e : Masse volumique des gaz d'éjection.

V_e : vitesse à la sortie de la tuyère

➤ **Tuyère à contour profilé :**

Vu la perte considérable de poussée engendrée par les tuyères coniques, une approche directe pour la conception d'une tuyère supersonique, en l'application de la méthode des caractéristiques, pouvant fournir une poussée optimale a été proposé par Guderley et hentsh [32] en 1955 pour pallier à ce problème du champ d'écoulement à la sortie de la tuyère.

Cette solution consiste à faire tourner le contour du divergent vers l'intérieur (près du col) pour ramener l'écoulement à une direction axiale afin de compenser la détente manquée. Le résultat de cette méthode est une tuyère développant une poussée optimale pour une valeur donnée de la section de sortie et de la longueur.

➤ **Tuyère annulaire :**

Dans les deux types de tuyères citées précédemment, les formes de sections au col et à la sortie sont circulaires et normaux à l'axe. La tuyère annulaire est

largement utilisée dans les turbomachines et diffère par ses contours en présentant des sections au col en forme d'anneau. Cet anneau est formé par un corps central au col et par une paroi externe qui définit le gabarit de la tuyère voir figure (I.6). Les gaz de combustion en aval de ce col se détendent au sein de ces anneaux et le long de la section divergente. Ce type de configuration induit toujours une perte de poussée du faite que le contour est de bordures coniques et que à la sortie, le gaz d'éjection n'est pas d'une direction axiale, dans ce cas, le facteur de perte de poussée est défini par la relation suivante:

$$\lambda = \frac{\frac{1}{2}(\sin \beta + \cos \alpha)^2}{(\alpha + \beta) \sin \beta + \cos \beta - \cos \alpha}$$

(I.3)

Avec :

α, β : Respectivement les angles formés par l'axe de la tuyère et la paroi extérieure, et l'axe de la tuyère et la paroi intérieure.



Figure I-6 : Tuyère annulaire.

I.5.2 Tuyères adaptées en altitude :

Les tuyères conventionnelles délivrent une certaine poussée, mais néanmoins avec des pertes de charges considérables dues à la non-axialité de l'écoulement dans le divergent à la sortie à cause des angles de déviations spécialement utilisées pour la détente des gaz. Afin d'optimiser ces pertes-là, les chercheurs ont modélisé une forme de tuyères donnant à la sortie un écoulement uniforme et parallèle et une réduction considérable des pertes de poussée.

I.5.2.1. Les tuyères à décollement contrôlé :

Elles sont proches de la tuyère profilée (Bell-Shape), elles comprennent :

➤ **Tuyère à double galbe :**

Formée par une jonction de deux tuyères à simple galbe au niveau d'un point dit d'inflexion, la tuyère à double galbe, appelée aussi tuyère à double cloche est l'une des tuyères innovantes utilisée généralement pour les navettes spatiales. Elle a l'avantage d'auto-adaptation de l'écoulement pour deux plages de fonctionnement (à basse et à haute altitude) par une simple inflexion du contour (sans activation mécanique) et un décollement du jet à basse altitude, fixé à la jonction de deux galbes c'est-à-dire stable et symétrique à l'inflexion[9]. Cependant, elle présente comme inconvénients une traînée d'aspiration supplémentaire à basse altitude et des charges latérales durant la transition entre les régimes.

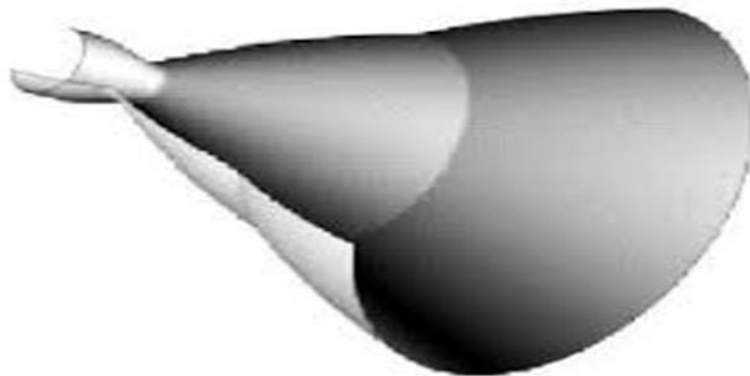


Figure I-7 : Tuyère à double galbe

➤ **Tuyère à zone d'expansion :**

La forme de la zone d'expansion de la partie divergente est un peu arbitraire. Typiquement, une forme d'arc circulaire de grand rayon est utilisée dans les souffleries. A la sortie de la tuyère, l'écoulement devient uniforme et parallèle à l'axe de révolution.

➤ **Tuyère à détente centrée :**

La tuyère est de type à détente centrée, si la zone d'expansion est contractée en un point, où la détente prend place à travers des ondes de Prandtl Meyer centrées et générées à partir du coin du col de la tuyère avec un angle initial Θ^* [9], [10,11] comme le montre la figure(I.8).

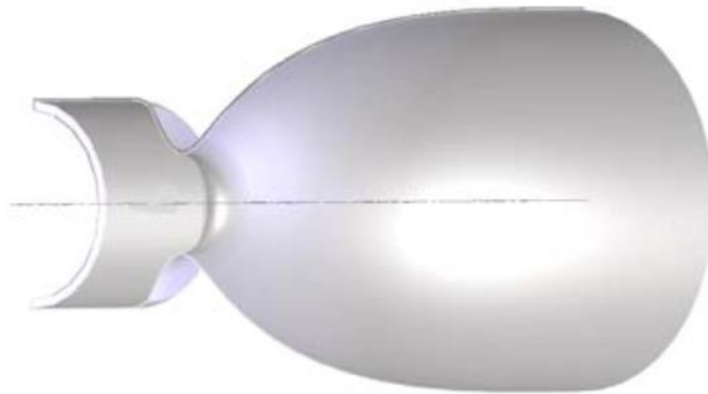


Figure I-8 : Tuyère à détente centrée

Dans ce type de tuyères on peut donner une valeur relativement importante à l'angle de divergence située près du col allant de 20 à 30°, pour donner une importante détente sans gêner l'axialité de l'écoulement à la sortie. La deuxième partie divergente tend à faire suivre l'écoulement dans la direction uniforme et parallèle [12]. Ces résultats sont ainsi justifiés numériquement par l'application de la méthode des caractéristiques en 1958, par Rao [13] qui a réussi à trouver une approche basée sur la prise en considération de la longueur de la tuyère, la pression ambiante ainsi les conditions d'écoulement au col comme paramètres pouvant donner une poussée maximale ainsi le contour de la paroi de la tuyère qui devra être défini.

I.5.2.2. Les tuyères bi-modes :

- **Tuyère double col (dual mode nozzle) :**

À basse altitude la chambre de poussée (chambre de combustion + tuyère) externe fonctionne avec la chambre de poussée interne en parallèle. Dans ce mode d'opération, le moteur a un col large qui produit un rapport de détente modéré. À une certaine altitude la chambre de poussée externe s'éteint et le moteur continue à fonctionner seulement avec la chambre de poussée interne. Avec cette configuration, l'écoulement de la chambre interne se détend et s'attache d'une manière

supersonique à la chambre externe en résultant un rapport de détente élevé pour le reste de la mission [14].

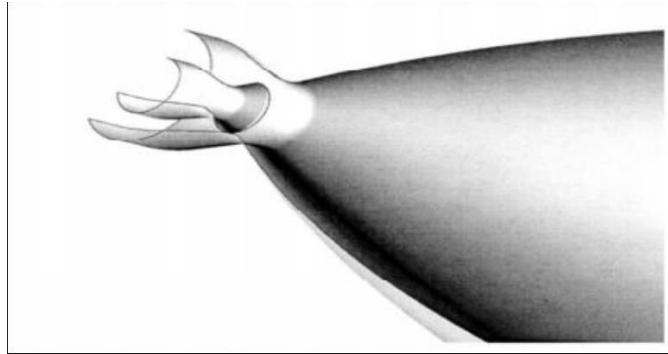


Figure I-9 : Tuyère double col.

I.5.2.3 Tuyère auto-ajustables :

Contrairement aux configurations précédemment présentées où le processus de détente de gaz est principalement influencé par le contour de la paroi à la section divergente de la tuyère, le processus de détente de ces gaz dans ce cas est directement ou indirectement régulé par la pression ambiante. L'écoulement des gaz dans ce cas s'ajuste donc de lui-même pour être conforme aux conditions extérieures. Ces tuyères sont classées en deux catégories :

- **Tuyère type bouchon**

Le col de ce type de tuyères possède la forme d'un anneau localisé au diamètre extérieur figure (I.10). L'écoulement est contrôlé par des ondes de détente provoquées par la déviation du bouchon dont la surface constitue le principal paramètre qui l'influence. Les gaz d'échappement subissent une détente de la pression de la chambre de combustion P_t jusqu'à la pression ambiante P_a . La pousse de ce type de tuyères est identique à celle de la tuyère convergente-divergente [5].

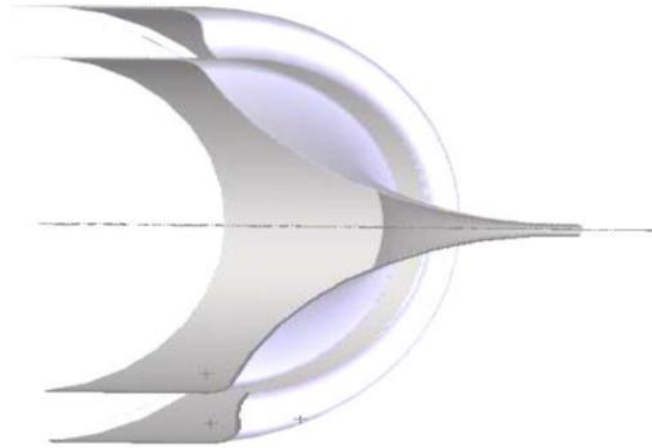


Figure I-10: Tuyère type bouchon.

- **Tuyère type détente-déviat**ion :

Dans ce type de tuyère une chambre de combustion compacte se positionne autour de la ligne centrale et présente un col annulaire au voisinage de cette dernière. Dans ce cas, les gaz se dirigent dans la direction de l'écoulement du bouchon central qui réalise une rotation de l'écoulement en expansion à une direction presque axiale. C'est pourquoi on la qualifie de tuyère à détente-déviat

Cette configuration permet l'obtention des bonnes performances même dans des conditions au-dessous de celles pour lesquelles elle a été initialement conçue. Les travaux expérimentaux sur de telles tuyères [5] ont montré qu'une utilisation d'angles de déviat

d'une valeur aussi importante que 40° pour des rapports de détentes bas n'entraîne que des pertes minimales de poussée (une perte de 1% a été enregistrée pour un angle de 30°).

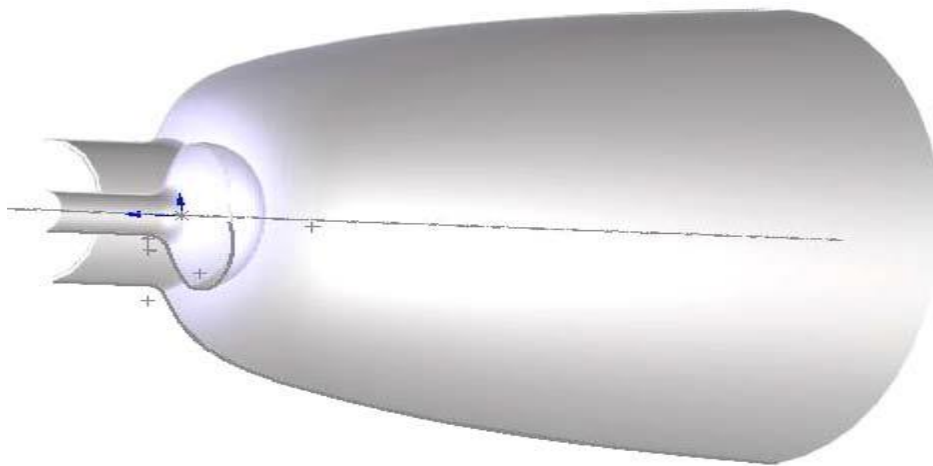


Figure I-11: Tuyère type détente-déviante

I.5.3. Tuyères innovantes :

- **Tuyère à section variable :**

La sortie de la tuyère est à section variable et constituée d'une multitude de volets qui, en se rapprochant ou en s'écartant, modifient le diamètre de la tuyère afin qu'elle soit «adaptée». Afin de se rapprocher le plus possible de la forme circulaire, les demi-volets sont réalisés par une multitude de petits volets, s'emboîtant les uns dans les autres. En général la commande de position est assurée par un anneau qui est tiré ou poussé (fermeture –ouverture) par des vérins répartis à la périphérie du canal de postcombustion. La pression et la vitesse du jet maintiennent plaqués les volets sur l'anneau de commande.

Un ergot de position interdit aux volets de descendre lorsque le moteur est arrêté.

- **Tuyère à chevrons (tuyères en dents de scie) :**

C'est une tuyère pour les turboréacteurs de type double flux d'air séparés, comportant :

- Une paroi interne à l'intérieur de laquelle circule un flux d'air primaire (FP) et qui comporte, à l'extrémité externe, des chevrons.

- Une paroi externe entourant au moins partiellement la paroi interne et le long de laquelle s'écoule un flux d'air secondaire (FS), la paroi externe étant mobile le long de la paroi interne. L'invention trouve des applications dans le domaine de l'aéronautique et en particulier, dans le domaine de la réduction des nuisances

sonores extérieures produites par les turboréacteurs d'un aéronef notamment lors de la phase de décollage.



Figure I-12: Tuyère à chevrons

- **tuyère orientable :**

C'est une tuyère articulée autour d'un ou deux axes comportant une partie fixe d'une part et de l'autre une partie pivotante et des vérins de commande permettant de déplacer la partie pivotante avec déformation de la structure annulaire élastique ce qui permet d'orienter l'axe de poussé.

I.6 Fonctionnement réel de la tuyère supersonique :

D'après plusieurs chercheurs, le changement de pression et de la section à la sortie d'une tuyère à un effet considérable sur le régime et le type d'écoulement dans les tuyères supersonique. Cela est bien expliqué ci-dessous :

I.6.1 Forme géométrique d'une tuyère supersonique:

Une des relations fondamentales que nous enseigne la théorie des écoulements monodimensionnels est la relation d'Hugoniot, qui exprime en absence de frottement,

la variation de la vitesse V du fluide le long de la tuyère en fonction du nombre de mach pour les deux régimes d'écoulements :

$$\frac{dA}{A} = (M^2 - 1) \frac{dV}{V}$$

(1.4)

Avec:

A: Section de la tuyère.

V: Vitesse d'écoulement.

M : Nombre de Mach

- Quand l'écoulement est subsonique $M < 1$, la section varie en sens inverse de la vitesse, lorsque la section diminue la vitesse augmente et vice versa.
- Dans le cas d'un écoulement supersonique $M > 1$, la vitesse varie dans le même sens que la section.
- Dans le cas où le nombre de Mach est égale à l'unité=1, la conduite présente un minimum ou un maximum de section seul le minimum convient.

1.6.2 Les différents régimes d'écoulement

Dans les écoulements réels, la tuyère comporte une couche limite qui est très sensible aux variations de pression, ce qui rend les phénomènes physiques dans la tuyère plus complexes. Lorsque le col de la tuyère est sonique, l'écoulement dans la tuyère dépend uniquement de la pression à la sortie de la tuyère notée P_s et de la pression du milieu ambiant P_a . En fonction de la différence entre ces deux pressions, on distingue trois cas :

- Si $P_s = P_a$, la tuyère est dite adaptée.
- Si $P_s > P_a$, la tuyère est dite sous-détendue.
- Si $P_s < P_a$, la tuyère est dite sur-détendue.
- **Le régime d'adaptation :**

Dans le cas du régime adapté, la détente du gaz est complètement accomplie dans la tuyère. Les gaz se détendent depuis la chambre jusqu'à la sortie de la tuyère. Dans ce cas, le jet de gaz à partir de la tuyère se détend exactement à la pression ambiante vu que la pression du milieu ambiant P_a est égale à la pression de sortie P_s [5], [3].

- **Le régime de sous-détente :**

Ce régime se concrétise lorsque la pression du milieu ambiant P_a est inférieure à la pression d'adaptation. Le fluide se décharge à une pression supérieure à celle de la pression extérieure parce que le rapport de section $\frac{A_s}{A^*}$ est petit par rapport à celui de la détente complète. La suite de la détente du gaz est réalisée à la sortie de la tuyère par un faisceau d'ondes de détente centré et attaché à la sortie. Vu que $P_s > P_a$ on observe à la sortie de la tuyère, un élargissement du jet supersonique [5], [3].

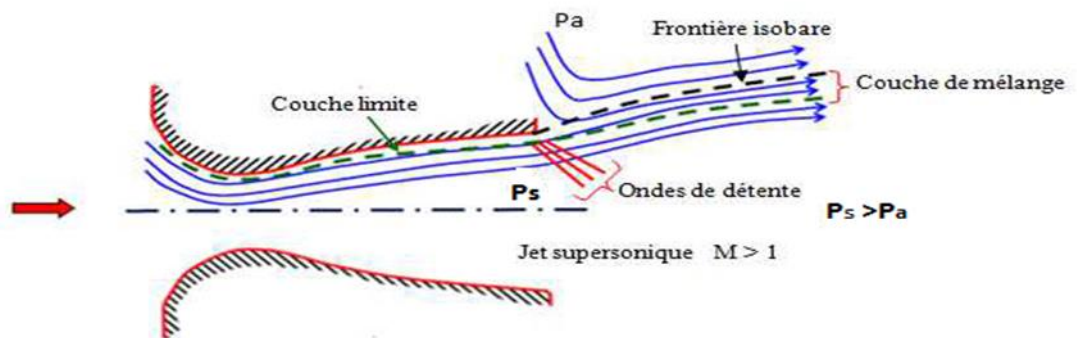


Figure I-13: Organisation de l'écoulement en régime de sous-détente.

- **Le régime de sur-détente :**

Ce régime se produit lorsque la pression du milieu ambiant P_a est supérieure à la pression d'adaptation de la tuyère. L'écoulement dans la tuyère est entièrement isentropique. Le rapport des sections A_s / A^* est plus grand que celui de la détente complète. Le fluide se détend en plus dans la tuyère et devra être comprimé à l'extérieur pour rendre la pression compatible avec la pression ambiante. Suivant

l'intensité du choc, nous pouvons distinguer deux cas : le régime de sur-détente avec décollement naissant et le régime de sur-détente avec décollement étendu.

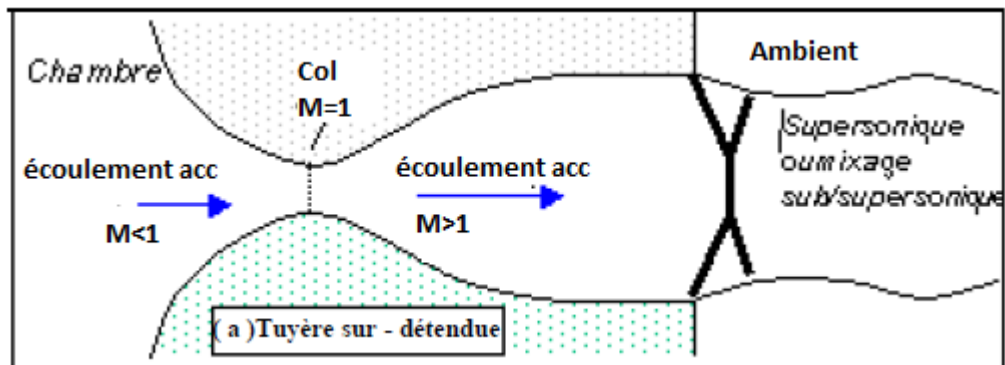


Figure I-14 : régime d'écoulement supersonique sur détente.

I.7. Les paramètres de performances

- **La force de poussée**

C'est la force délivrée par la tuyère elle est en fonction non seulement de la vitesse d'éjection des gaz et du débit qui la traverse, mais aussi de la différence entre la pression de sortie et ambiante. Elle est décrite par la relation (I.4) :

$$F = \dot{m}V_e + (P_e - P_a)A_e \quad (I.5)$$

Avec :

F : La poussée(N)

A_e : Section de sortie tuyère

\dot{m} : Débit massique (kg/s)

- **Le coefficient de poussée**

C'est une quantité adimensionnelle représentant le rapport de la force de poussée sur le produit de la pression génératrice :

$$C_f = \frac{F}{P_0 A^*} \quad (1.6)$$

Avec :

P_0 : Pression total

A^* : Section de sortie de la tuyère

- **La vitesse caractéristique :**

C'est la vitesse mesurée au niveau du col noté C^* . C'est un paramètre qui exprime les vitesses tout au long des conduites ou plus particulièrement dans les tuyères, il dépend de la nature du fluide et de sa température génératrice :

$$C^* = \frac{P_0 A^*}{\dot{m}} \quad (1.7)$$

- **La vitesse effective :**

C'est la vitesse réelle mesurée à la sortie d'une tuyère, elle est en fonction de la force de poussée générée par une tuyère adaptée et du débit qui la traverse :

$$V_{eff} = \frac{F}{\dot{m}} \quad (1.8)$$

- **L'impulsion spécifique:**

L'impulsion spécifique, notée I_s est définie comme le rapport de la poussée au produit du débit massique par l'accélération de la pesanteur :

$$I_s = \frac{F}{\dot{m}g} \quad (1.9)$$

Avec :

g : La gravité ($m.s^{-2}$)

- **Impulsion totale :**

L'impulsion totale, notée comme l'intégral de la poussée durant la totalité du temps de fonctionnement :

$$I_{totale} = \int_0^t F dt \quad (1.10)$$

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, les différents types des tuyères menés sur les différents paramètres qui influencent l'efficacité de cette dernière. L'étude bibliographique a montré que l'évolution des tuyères dépend principalement de sa géométrie.

Ce chapitre est suivi par une compréhension des théories et des lois fondamentales, concernant les écoulements des fluides compressibles dans un tuyère.

CHAPITRE II

CONCEPTION DE LA TUYERE CIRCULAIRE ASYMETRIQUE DANS Y^+

Résumé

Dans ce chapitre nous avons présenté les conceptions de la tuyère asymétrique circulaire à partir d'une tuyère axisymétrique, en utilisant la méthode des caractéristique dans le code de calcul Fortran.

Aperçu

CHAPITRE II

CONCEPTION DE LA TUYERE CIRCULAIRE DANS L'AXE Y+

II.1. Introduction

II.2. Conception de la tuyère asymétrique circulaire dans l'axe Y+

II.3. Résultat de la conception de la tuyère asymétrique

II.3.1. Contour de la tuyère asymétrique circulaire dans l'axe Y+

II.4. Effet du nombre de Mach de sortie MS sur le contour de la tuyère

CHAPITRE II : CONCEPTION DE LA TUYERE CIRCULAIRE ASYMETRIQUE DANS Y+

II.1. Introduction

Le but de la présentation de ce chapitre, est de concevoir et d'étudier la possibilité d'améliorer les performances d'une tuyère tridimensionnelle asymétrique par rapport à celle ayant une géométrie axisymétrique.

L'idée principale consiste à faire l'extension d'une tuyère axisymétrique vers la géométrie tridimensionnelle grâce à la définition d'une ligne de courant dans l'espace [18].

II.2. Conception de la tuyère asymétrique circulaire dans Y+

Après avoir obtenu l'écoulement en tous points internes du champ d'écoulement dans la tuyère axisymétrique, on peut procéder au dimensionnement de la tuyère 3D en appliquant l'idée de la définition d'une ligne de courant.

La conception commence par le choix de la section de sortie de la tuyère 3D à dimensionner. Plusieurs formes peuvent être choisies. Choisissons des sections ayant un plan de symétrie, d'autres ayant deux plans de symétries, ou qui n'ont aucune symétrie. La figure II.1 illustre quelques géométries de la section de sortie et leurs emplacements. La section du col sera de la même forme que la section de sortie, vu que l'écoulement à travers ces deux sections est 1D. Le rapport des sections reste toujours valable dans ce cas. Il est donné par les équations (II.1) et (II.2) respectivement pour les cas du modèle PG [4, 5] et le modèle HT [66, 69, 70] par :

$$\left(\frac{A_s}{A_*}\right)^2 = \frac{1}{M_s} \left[\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_s^2 \right) \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (\text{II.1})$$

$$\left(\frac{A_s}{A^*}\right)^2 = \text{Exp}\left(\int_{T_s}^{T^*} F_A(T) dT\right) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$F_A(T) = C_P(T) \left[\frac{1}{a^2(T)} - \frac{1}{2H(T)} \right] \quad (\text{II.3})$$

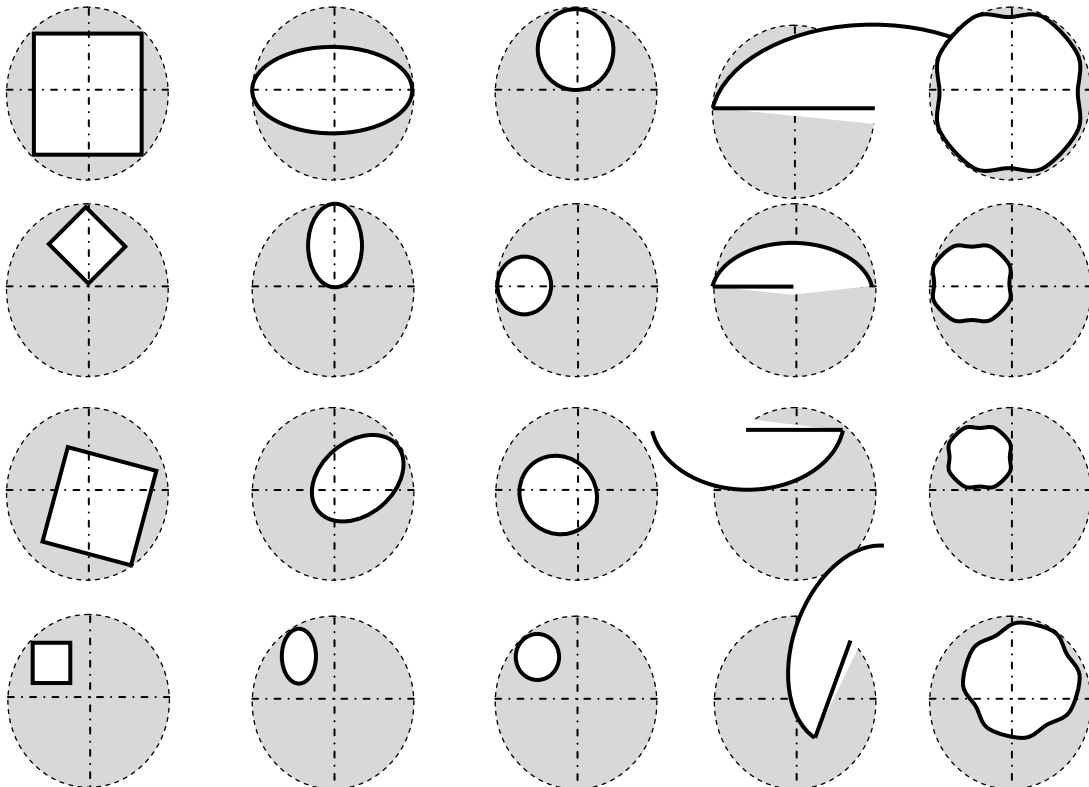


Figure II-1 : Section de sortie arbitraire avec différentes dispositions

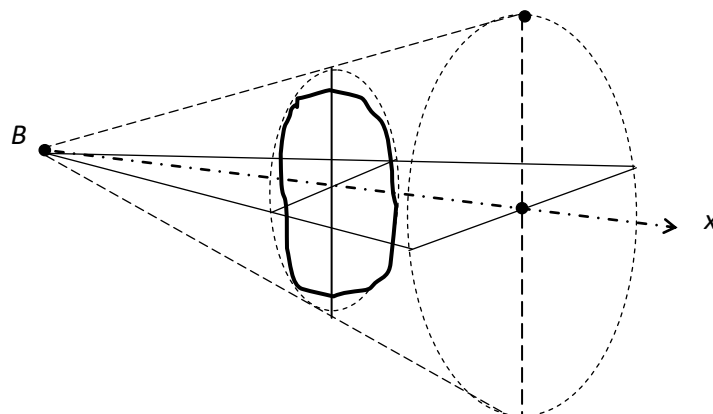


Figure II-2: Choix de la section de sortie d'une tuyère tridimensionnelle dans la zone d'écoulement uniforme

La deuxième étape consiste à diviser la section de sortie choisie en plusieurs points et de déterminer leurs positions ainsi que les paramètres ($\psi, P, T, \rho, M, \theta, x$) pour chacun de ses points (voir figure II.3)

Aux points i ($i=1,2, \dots, N_T$), on a :

$$\frac{y_i}{y^*}, \frac{z_i}{y^*}, \frac{\Psi_i}{a_0 y^*} \text{ \textbf{\AA} d\u00e9termin\u00e9es}$$

$$\frac{P_i}{P_0} = \frac{P_S}{P_0}, \frac{T_i}{T_0} = \frac{T_S}{T_0}, \frac{\rho_i}{\rho_0} = \frac{\rho_S}{\rho_0} \text{ \textbf{(Donn\u00e9es)}}$$

$$M_i = M_S, \theta_i = \theta_S = 0, \frac{x_i}{y^*} = \frac{x_{Station}}{y^*} \text{ \textbf{(Donn\u00e9es)}}$$

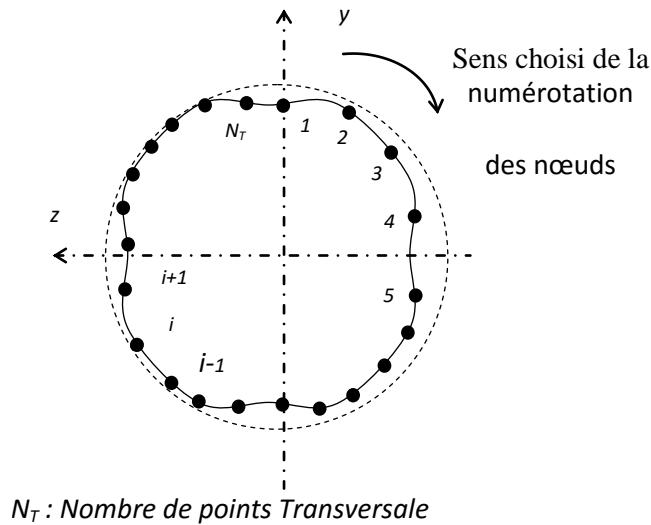


Figure II-3 : scr\u00e9tisation de la section de sortie de la tuy\u00e8re tridimensionnelle et num\u00e9rotation des n\u00f4uds choisis

Chaque point sur la section choisie poss\u00e8de sa propre valeur de ψ . Si deux points ou plus se trouvent \u00e0 la m\u00eame distance de l'axe de sym\u00e9trie, ils poss\u00e8dent la m\u00eame valeur de la fonction de courant.

La troisième étape consiste à diviser l'axe longitudinal en plusieurs stations y compris le col. Pour chaque points i ($i=1, 2, \dots, N_T$) de la section de sortie, la tuyère en vue de profil possède la forme présentée dans la figure II.4, mais avec une disposition différente des points.

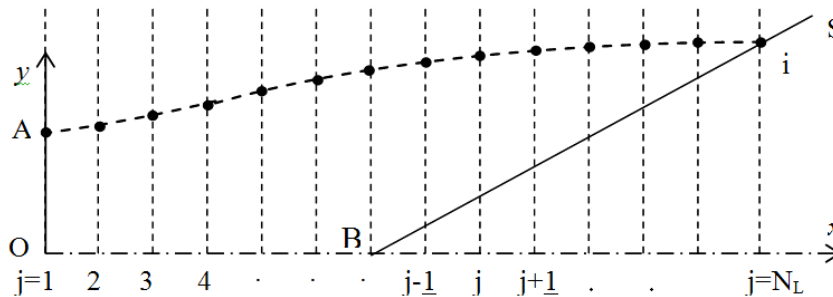


Figure II-4: Forme en profil de la tuyère passant par un point de la section de sortie

Tous les points qui se trouvent sur la courbe AS possèdent la même valeur de la fonction de courant, alors on a :

$$\psi_j = \psi_i \quad j = 1, 2, 3, \dots, N_L \quad (II.4)$$

En appliquons cette propriété, on peut déterminer la position (x, y, z) de chaque point j ($j=1, 2, 3, \dots, N_L$) de cette ligne de courant. En parallèle, il faut déterminer encore les propriétés (M, P, T, ρ, \dots) en ces points en appliquant les relations correspondantes pour chaque paramètre. Le nombre total de points à traiter est alors égal à $N_T \times N_L$.

La précision du calcul dépend du nombre de points N_T choisis sur la section de sortie transversalement et du nombre de stations insérées longitudinalement N_L . Une fois que la paroi de la tuyère 3D est déterminée, on passera au calcul de la masse et de la force de pression exercée par les gaz sur sa paroi interne. Entre deux stations successives, on obtient des cellules quadrilatères spatiales comme l'illustre la figure II.5.

On suppose que la tuyère est d'épaisseur constante et homogène. Le calcul de la masse et de la force de pression totale exercée sur la paroi interne de la tuyère sont reliés avec le calcul de l'aire de chaque quadrilatère et de la pression exercée sur la paroi de ce dernier. Le quadrilatère est présenté comme union de deux triangles

adjacents (voir figure II.5). On notera ici que la force de pression interpolée, exercée sur la paroi du triangle 123, n'est pas parallèle à celle exercée sur le triangle 134.

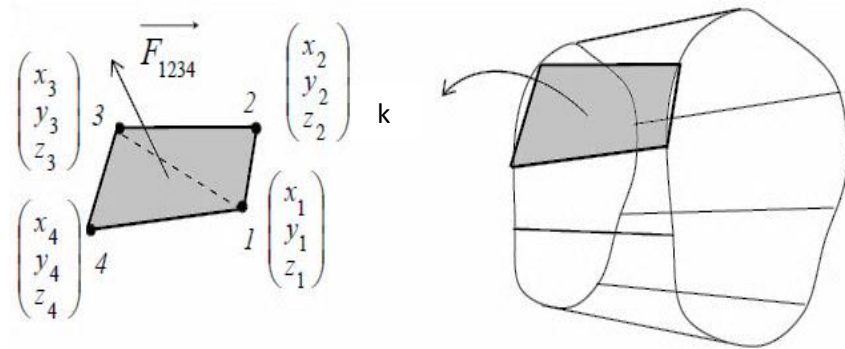


Figure II-5: Eléments finis placé entre deux stations successives de la tuyère 3D.

On note que les quatre nœuds ne se trouvent pas dans un même plan dans l'espace. En appliquant le produit vectoriel, on obtient la force exercée sur le quadrilatère et sa masse.

$$\frac{Masse}{\rho_M t_M A_*} = C_{Masse} = \sum_{k=1}^{(N_L-1)N_T} \frac{(A_{1234})_k}{A_*} \quad (II.5)$$

D'où la masse d'une tuyère 3D asymétrique est calculée de la manière suivante :

$$Masse = \rho_M t_M \sum_{k=1}^{(N_L-1)N_T} (A_{1234})_k = \rho_M t_M \sum_{k=1}^{(N_L-1)N_T} (A_{123} + A_{134})_k \quad (II.6)$$

Il est préférable que la masse de la structure de la tuyère tridimensionnelle soit calculée sous la forme normalisée par rapport à $\rho_M t_M$ comme le montre l'équation (II.7):

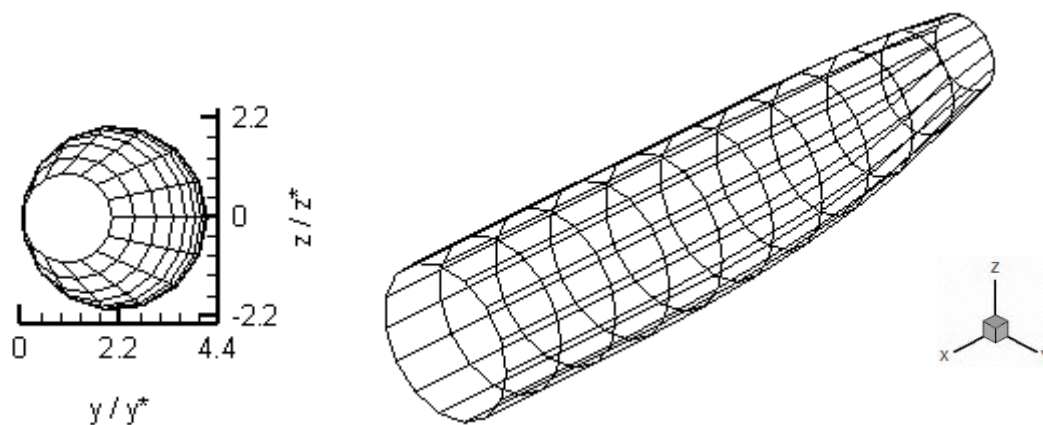
$$\frac{Masse}{\rho_M t_M} = \sum_{k=1}^{(N_L-1)N_T} (A_{123} + A_{134})_k \quad (II.7)$$

II.3. Résultat de la conception de la tuyère asymétrique

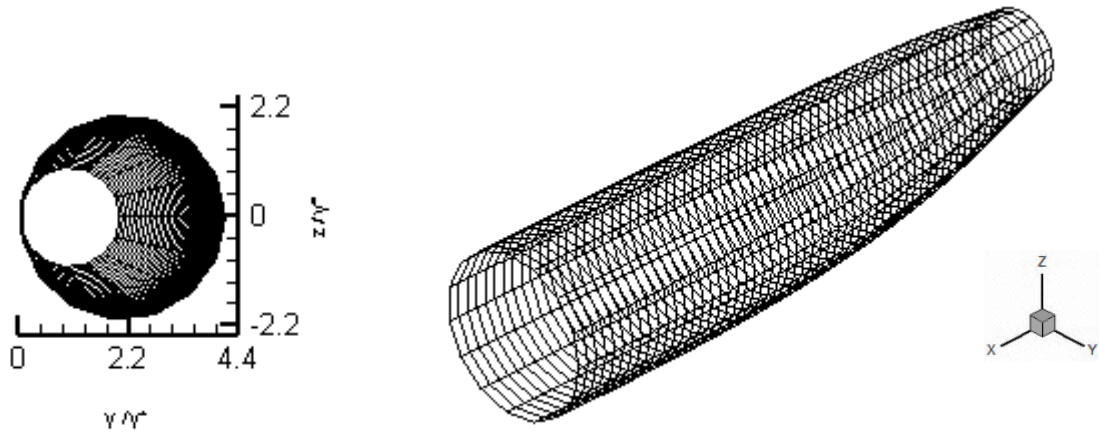
II.3.1. Contour de la tuyère asymétrique circulaire dans Y+

La figure II.6 représente une tuyère tridimensionnelle *MLN* ayant une section de sortie circulaire pour $T_0=2000K$ et $M_S=3,00$, qui donne un angle de détente au col $\theta^*=27,49$ degré. Cette figure contient deux présentations de tuyères circulaires. Une figure dans le plan (y, z) et l'autre dans le plan (x, y, z) afin de bien illustrer le dimensionnement d'une tuyère 3D et de montrer l'effet de raffinement du nombre de sections insérées longitudinalement N_L sur la conception. Pour le cas (a), on a pris $N_L=10$ et $N_T=15$, le cas (b) $N_L=60$ et $N_T=15$ et pour le cas (c) $N_L=10$ et $N_T=70$.

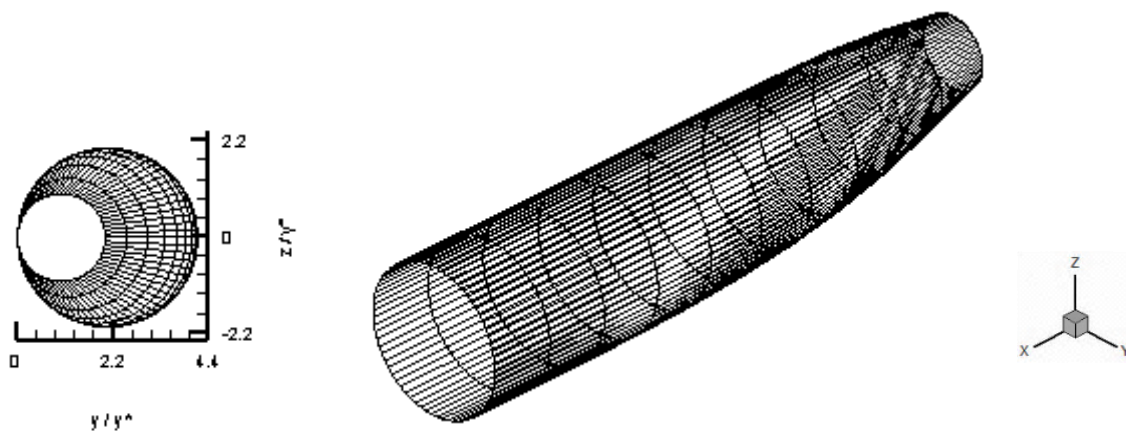
La forme de tuyère 3D *MLN* qu'on a présenté dans la figure II.6 possède toutes la même longueur, le même nombre de Mach de sortie pour $M_S=3,00$ et $T_0=2000$ K. C'est-à-dire qu'on trouve toujours dans toutes les tuyères les zones qui caractérisent une tuyère *MLN* entre autres la zone de Kernel, la zone de transition et la zone uniforme car la tuyère tridimensionnelle asymétrique est incluse dans la tuyère axisymétrique. Par contre, leurs masses et leurs coefficients de poussée respectifs sont différents.



(a) : $N_L=10$ et $N_T=15$



(b) : $N_L=60$ et $N_T=15$



(c) : $N_L=10$ et $N_T=70$

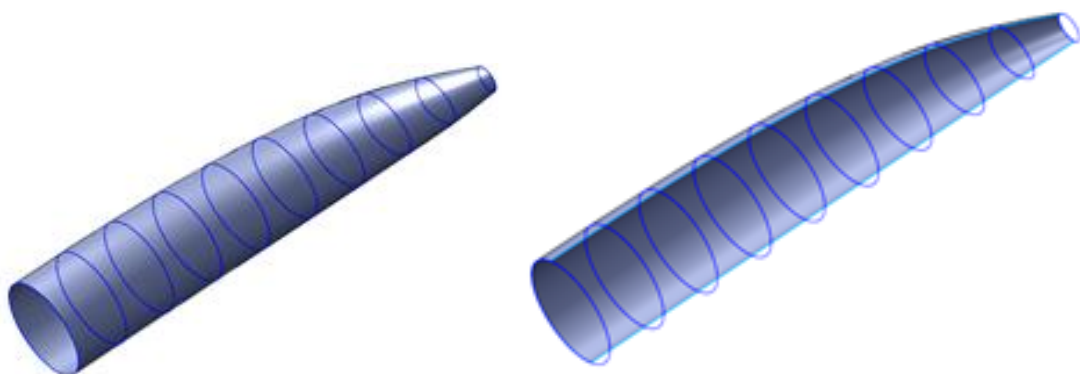
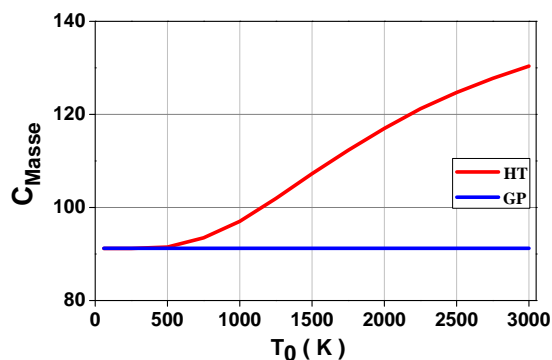


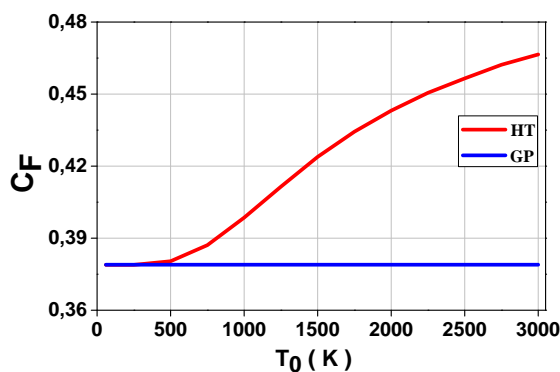
Figure II-6: Tuyère circulaire dans y^* avec et sans raffinement du nombre de sections insérées longitudinalement N_L et du nombre de points insérés transversalement N_T pour $MS=3,00$

II.3.2. Effet de la température génératrice T_0 sur le contour de la tuyère

La figure II.7 représente la variation à haute température des coefficients de masse et de poussée pour différentes formes de tuyères 3D. On voit bien que ses paramètres dépendent de M_S et T_0 . Plus la valeur du nombre de Mach est élevée, plus l'écart entre les deux modèles augmente, ce qui rend la nécessité de tenir en compte de la température génératrice T_0 . On remarque que les courbes de chaque figure représentant respectivement les résultats du modèle à haute température sont presque confondues jusqu'à $M_S=2.00$. Mais au-delà de cette valeur, elles commencent à être différentes au fur et à mesure que M_S et T_0 augmentent. Ce résultat s'interprète par la possibilité d'utiliser le modèle GP dans la conception des tuyères supersoniques tant que M_S est inférieure à 2,00 quel que soit la température génératrice T_0 , ou si $T_0 < 1000 K^\circ$ environ quel que soit M_S , comme mentionné auparavant.



(a) : Forme axisymétrique



(a) : Forme axisymétrique

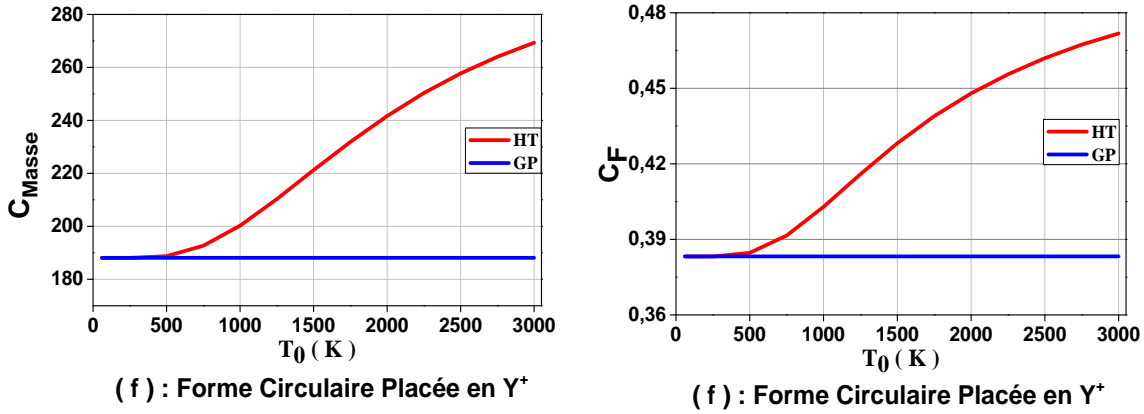
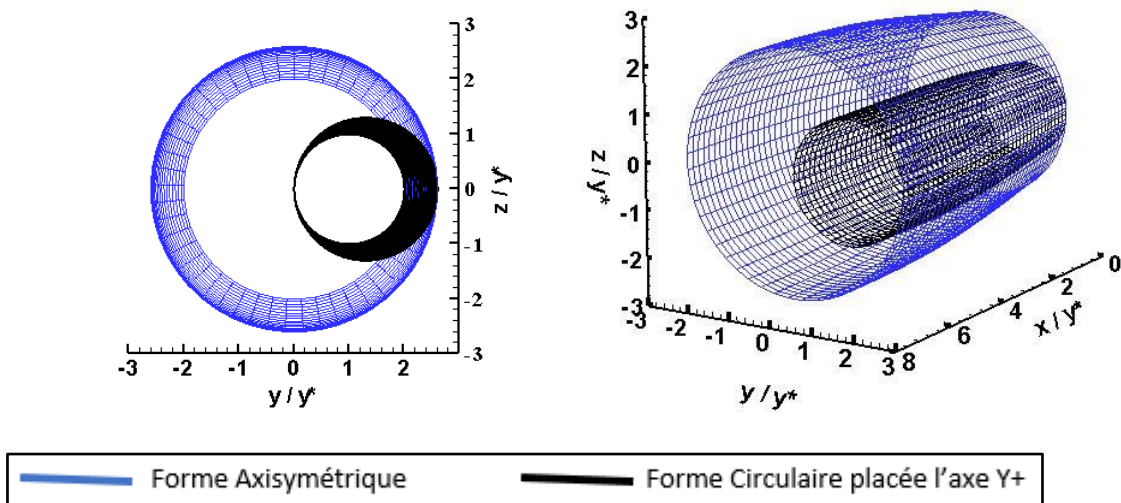


Figure II-7: Variation des coefficients de masse et de poussée des formes de la tuyère circulaire dans Y+ asymétriques en fonction de la température T_0 pour $M_S=3,00$

II.4. Effet du nombre de Mach de sortie M_S sur le contour de la tuyère

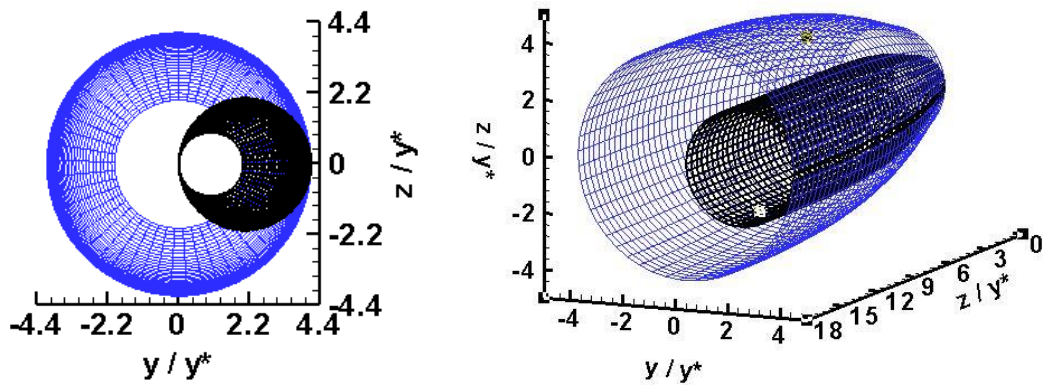
La figure II.8 (a-d) représente respectivement le dimensionnement d'une tuyère tridimensionnelle asymétrique de forme circulaire calculée pour $M_S=2,00$, 3,00, 4,00 et 5,00 avec $T_0=2000K$. Les valeurs numériques des paramètres du dimensionnement sont représentées aussi. Nous remarquons que le volume occupé par la tuyère 3D et la masse de la structure augmentent avec le nombre de Mach de sortie M_S . D'après les formes obtenues à partir des résultats numériques, on remarque que la différence d'un pas de un du nombre de Mach de sortie M_S , conduit à une augmentation de l'ordre de deux la longueur, la masse et le volume de la tuyère.



(a) : $M_S = 2.00$

Tableau II-1 : Valeurs numériques de conception de la tuyère pour MS = 2,00

	$\frac{L_d}{y^*}$	$\frac{L}{y^*}$	$\theta^*(\text{°})$	$\theta_{\max}(\text{°})$	M^*	C_{Masse}	C_F
axisymétrique	5.0948	16.7040	11.7187	15.4653	1.4951	29.6501	8.2148
C/Y^*	5.0948	16.7040	11.7188	15.4654	1.4951	29.6501	16.0557

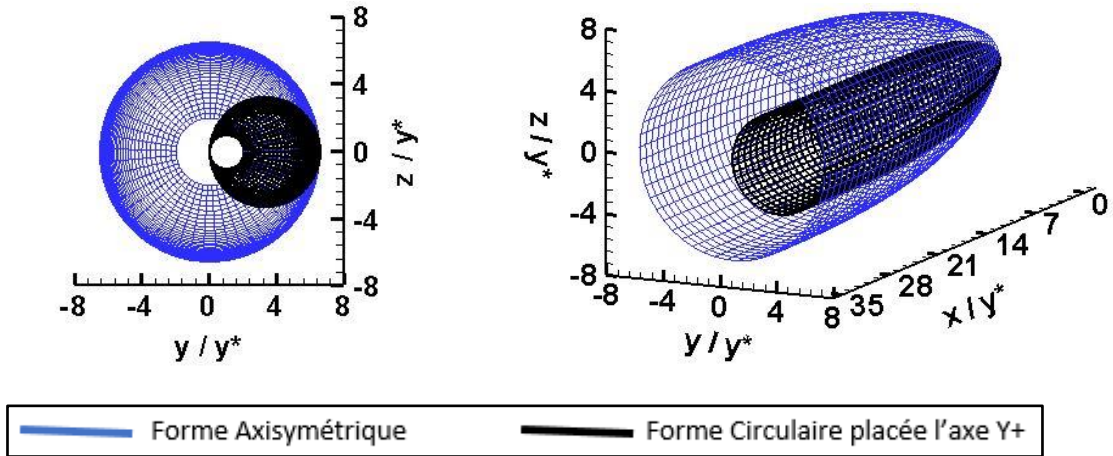


— Forme Axisymétrique — Forme Circulaire placée l'axe Y+

(b) : Ms = 3.00

Tableau II-2: Valeurs numériques de conception de la tuyère pour MS = 3,00

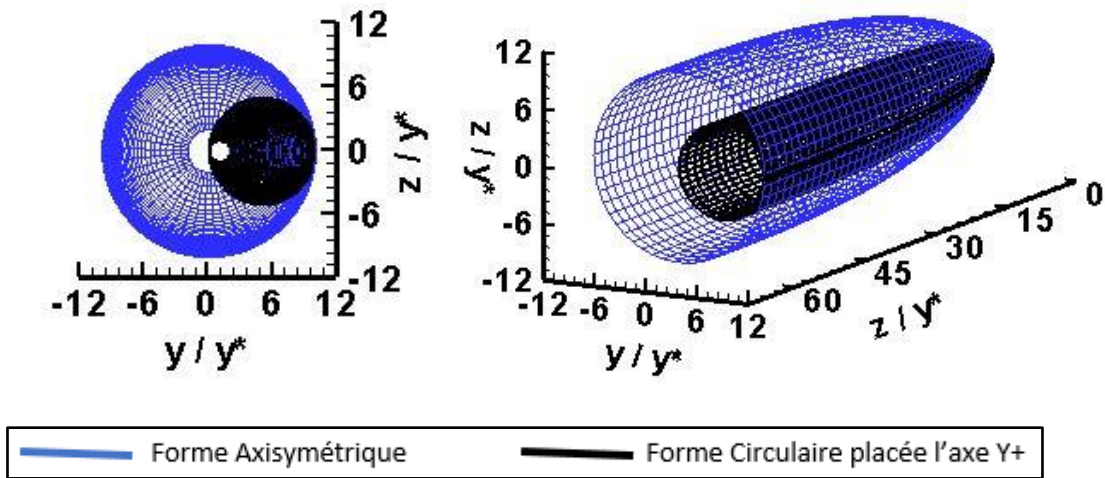
	$\frac{L_d}{y^*}$	$\frac{L}{y^*}$	$\theta^*(\text{°})$	$\theta_{\max}(\text{°})$	M^*	C_{Masse}	C_F
axisymétrique	2.6546	7.1561	5.7625	8.2556	1.2865	8.6246	6.1538
C/Y^*	2.6546	7.1561	5.7625	8.2556	1.2865	8.6246	10.8502



(c) : $M_s = 4.00$

Tableau II-3: Valeurs numériques de conception de la tuyère pour $M_s = 4,00$

	$\frac{L_d}{y^*}$	$\frac{L}{y^*}$	$\theta^*(^\circ)$	$\theta_{max}(^\circ)$	M^*	C_{Masse}	C_F
axisymétrique	8.3476	33.6496	16.1000	20.2334	1.6436	91.3618	10.0172
C/Y^*	8.3476	33.6496	16.1000	20.2334	1.6436	91.3618	19.7232



(d) : $M_s = 5.00$

Tableau II-4: Valeurs numériques de conception de la tuyère pour $M_s = 5.00$

	$\frac{L_d}{y^*}$	$\frac{L}{y^*}$	$\theta^*(^\circ)$	$\theta_{max}(^\circ)$	M^*	C_{Masse}	C_F
axisymétrique	12.6690	61.5405	19.2844	23.5151	1.7510	250.8189	11.7103
C/Y^*	12.6690	61.5405	19.8244	23.5151	1.7510	250.8189	23.2404

Figure II-8: Formes des tuyères 3D de forme circulaire pour différente valeur du nombre de Mach de sortie M_s pour $T_0=2000\text{ K}$

CHAPITRE III

EQUATIONS

FONDAMENTALES

CHAPITRE III

Equations Fondamentales

III.1 Introduction

III -2 Le modèle physique

III.2.1 Hypothèses

III.3 Classification des gaz

III.4 Formulation mathématique du gaz parfait

III.4.1 Relations thermodynamique

III.4.1.1 Le premier principe de la thermodynamique

III.4.2 Equations fondamentale

III.4.2.1 Equation de continuité

III.4.2.2 Equation de quantité de mouvement

III.4.2.3 Equation de l'énergie

III.4.2.4 Equation d'état du fluide

III.4.3 Relation de la dynamique des gaz

III.4.3.1 Grandeurs totales

III.4.3.2 Grandeurs critique

III.4.4 L'entropie en fonction du nombre de Mach

III.5 Effet de variation de section sur l'écoulement

III.6 Paramètres thermodynamique à haute température

III.6.1 Equation adiabatique

III.6.2 Equation da la vitesse sonore en fonction de la température

III.6.3 la vitesse en fonction de température

III.6.4 Nombre de mach en fonction de température

III.6.5 Formule de la masse volumique en fonction de la température

III.6.6 La pression en fonction de température

III.6.7 la formule de la section en fonction de température

III.7 procédure de calcule pour le gaz à haute température

III.8.1 Polynôme d'interpolation de $C_p(T)$

III.8.2 Intégration de la chaleur spécifique $C_p(T)$

III.8.3 L'erreur relative de modèle gaz parfait

III.8 Conclusion

CHAPITRE III : EQUATIONS FONDAMENTALES

III.1 Introduction :

Il existe de très nombreuses études concernant les écoulements des fluides dans les tuyères pour la résolution analytique ou numérique essentiellement la CFD (Computational Fluid Dynamics) est devenue un outil primordial dans le procédé de conception de ces premières dans le but d'optimisation et d'amélioration de l'efficacité technique. Le présent chapitre présente les équations fondamentales de l'écoulement des fluides sur lesquelles sont basés tous les codes CFD. Il est important de comprendre les phénomènes physiques d'écoulement des fluides et la façon dont ils sont modélisés dans les CFD.

III.2 Le modèle physique :

Le modèle physique à étudier est une tuyère MLN représenté sur la figure (III.1), est une enceinte cylindrique avec une longueur (L) et de rayon (r) qui varie en fonction de (x). La paroi extérieure de la tuyère est supposée adiabatique.

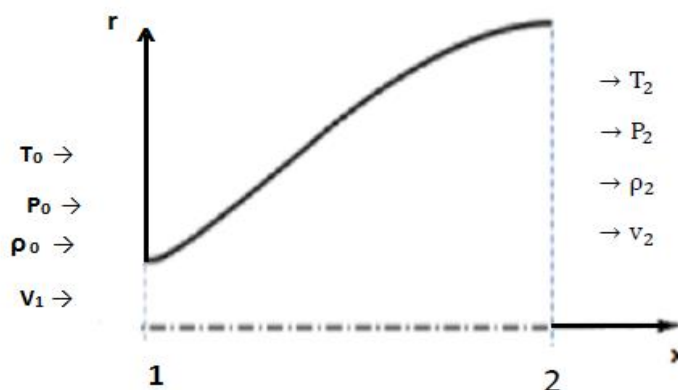


Figure III-1 : Géométrie d'une tuyère MLN.

L'étude approfondie des écoulements des fluides compressibles ne peut se faire sans faire intervenir la thermodynamique.

III.2.1 Hypothèses:

- **Écoulement adiabatique** : il n'y a pas d'échange de chaleur avec l'extérieur ($Q = 0$).
- **Fluide non pesant** : les problèmes à volume massique variable ne se posent pratiquement que pour les gaz à vitesse suffisamment élevée. Il est donc légitime de négliger les forces de gravité devant les forces de pression et les forces d'inertie.
- **Fluide parfait** : Le fluide est supposé tel que les contraintes de viscosité sont nulles. En fluide parfait, la vitesse est uniforme dans une section droite de l'écoulement, alors qu'en réalité, il existe un profil de vitesse, la vitesse étant nulle à la paroi et maximale au centre.
- **Écoulement permanent** : aucune grandeur physique ne dépend du temps.

Les écoulements isentropiques unidirectionnels compressibles de fluides parfaits se rencontrent notamment quand on envisage des écoulements dans des conduites ou des écoulements externes dans des tubes de courant élémentaires. On peut citer notamment le cas de la tuyère convergente-divergente sans onde de choc, ni transferts de chaleur ou frottements ou l'écoulement autour d'un profil d'aile d'avion en dehors de la couche limite.

III.3 Classification des gaz:

Pour reformer ces différents types de gaz, pour l'air on a [15] :

- A la température ambiante l'air est essentiellement caloriquement parfait.
- Lorsque la température augmente aux environs de 1000°K , l'air considéré caloriquement imparfait par ce que l'excitation de l'énergie de vibration est très importante.
- Si la température augmente de plus en plus, au-dessus de 2500°K , les réactions chimiques auront lieu, et l'air devient un mélange d'un gaz parfait chimiquement réactif.

- Lorsque la température baisse, si elle est en dessous de la température ambiante et si la pression dépasse les 1000 atmosphères, les forces intermoléculaires vont s'exprimer, et l'air est considéré comme un gaz réel.

III.4 Formulation mathématique du gaz parfait:

III.4.1 Relations thermodynamique:

Toute propriété thermodynamique intensive peut être exprimée en fonction de deux propriétés thermodynamiques intensives au maximum.

III.4.1.1 Le premier principe de la thermodynamique:

Si un system matériel fermé et limité par une surface fermée, sans échange de travail et de chaleur. Si le system reçoit un travail et une chaleur dans une transformation qui l'amène de l'état 1 à l'état 2, le premier principe de la thermodynamique s'écrit :

$$\mathbf{E_{t1} - E_{t2} = (W-Q)_{1,2}}$$

(III.1)

Pour un cycle réversible : $\Delta E = 0$.

E_t désigne l'énergie totale du system qui se décompose ainsi : $E_t = U + E_c + E_p$ d'où U est l'énergie interne, E_c est l'énergie cinétique, et E_p l'énergie potentielle qui être associé aux force de pesanteur, W désigne le travail et Q l'énergie calorifique échangés avec l'extérieur.

Pour une transformation infinitésimale

$$dU = \delta W + \delta Q$$

(III.2)

Si de plus le système considéré ne possède pas une énergie cinétique et une énergie potentielle le premier principe devient :

$$\Delta U = W + Q$$

(III.3)

Pour un système ouvert le 1^{er} principe devient :

$$(U_2 - U_1) + (E_{p,2} - E_{p,1}) + (E_{c,2} - E_{c,1}) = W + Q$$

Tell que : $W = W' + W''$

Ou W : est le travail total.

W' : est le travail échangé entre le système et l'extérieur.

$W'' = (P_1V_1 - P_2V_2)$ est le travail des forces de pression dû au fluide.

On obtient donc :

$$(U_2 - U_1) + (E_{p,2} - E_{p,1}) + (E_{c,2} - E_{c,1}) = W' + (P_1V_1 - P_2V_2) + Q$$

$$(U_2 + P_2V_2) - (U_1 + P_1V_1) + (E_{p,2} - E_{p,1}) + (E_{c,2} - E_{c,1}) = W' + Q$$

Sachant que l'enthalpie : $H = U + PV$

(III.4)

L'équation précédente devienne :

$$(H_2 - H_1) + (E_{p,2} - E_{p,1}) + (E_{c,2} - E_{c,1}) = W' + Q$$

Ou sous la forme :

$$\Delta H + \Delta E_p + \Delta E_c = W' + Q$$

(III.5)

L'expression du travail des forces de pression :

$$W = \int_1^2 -Pdv$$

(III.6)

Partons de la définition de l'enthalpie :

$$H = U + PV \rightarrow dh = dU + PdV + VdP$$

On dérive l'équation (III.5) :

$$dH = -PdV + \delta q - (dE_p + dE_c) + PdV + VdP$$

$$dH + dE_p + dE_c = \delta q + VdP$$

Ou bien sous forme intégrale :

$$\Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p + Q + \int VdP$$

(III.7)

III.4.2 Equations fondamentales:

Les équations fondamentales du mouvement d'un fluide sont essentiellement les équations de conservations qui découlent des lois fondamentales de la dynamique. Dans la réalité, on ajoute à ces équations de conservation, l'équation d'état du gaz considéré [16,17].

III.4.2.1 Equation de continuité:

L'équation de continuité est une conséquence de la conservation de la masse du fluide. Pour un fluide stationnaire on obtient alors l'équation de continuité sous la forme conservative :

$$\text{div}(\rho V) = 0$$

(III.8)

III.4.2.2 Equation de quantité de mouvement:

Pour un fluide parfait en écoulement permanent et en négligeant les forces de volumes, elle est donnée par :

$$dP + \rho V dV = 0$$

(III.9)

III.4.2.3 Equation de l'énergie:

Pour un gaz parfait en écoulement permanent isentropique et en l'absence du travail des forces extérieures (travail des forces internes est nul), et en négligeant l'énergie potentielle, l'équation d'énergie s'écrit [18] :

$$h + \frac{v^2}{2} = 0$$

(III.10)

Avec :

$$h = C_p T$$

III.4.2.4 Equation d'état du fluide :

Cette équation caractérise l'état thermodynamique d'un fluide. Elle n'a une forme simple que dans le cas des gaz parfaits. Elle s'écrit [19] :

$$P = \rho r T$$

(III.11)

Avec P , ρ et T la pression, la masse volumique et la température absolue du gaz. r est la constante du gaz considéré. Elle est calculée à l'aide de relation **de Mayer** :

$$C_p - C_v = r$$

(III.11.a)

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

(III.11.b)

Pour l'air : $r = 287.1029 \text{ J / (kg .K)}$

III.4.3 Relation de la dynamique des gaz:

Les équations isentropiques présentées ici sont dérivées des équations de conservations.

III.4.3.1 Grandeurs totales:

Par définition, une grandeur totale est la grandeur qu'aurait une particule fluide si elle était ralentie de manière adiabatique jusqu'à une vitesse nulle.

Les équations isentropiques sont présentées sous forme de rapport entre une valeur totale et sa valeur statique.

D'après l'équation de la conservation de l'énergie (III.10), on obtient [16] :

$$C_p T + \frac{V^2}{2} = C_p T_0$$

(III.12)

D'où :

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{V^2}{2C_p T} = 1 + \frac{V^2}{2 \frac{\gamma R}{\gamma-1} T} = 1 + \frac{V^2}{\frac{2a^2}{\gamma-1}}$$

(III.13)

On introduit la relation de nombre de mach $M = \frac{V}{a}$ dans l'équation (III.13) pour obtenir le rapport isentropique de la température :

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2$$

(III.14)

Et d'après la relation (II.14) on obtient le rapport isentropique de la pression :

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

(III.15)

Aussi à partir de la relation (III.15) on trouve le rapport de la masse volumique :

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

(III.16)

Et pour le rapport de sections on a :

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

(III.17)

Avec :

A^* : Section du col.

Les équations isentropiques donnent également une relation entre la section de passage disponible et le nombre de Mach.

III.4.3.2 Grandeurs critiques:

On s'intéresse maintenant au comportement du fluide lorsque le régime de l'écoulement devient sonique $M=1$. La section de la tuyère supersonique dans laquelle ce régime est atteint est appelée section critique (col) et on dit que l'écoulement se trouve dans les conditions critiques.

On définit une grandeur critique comme la grandeur qu'aurait une particule fluide si elle était accélérée de façon adiabatique jusqu'à des conditions soniques $M=1$. Cet état est désigné par « * ».

La conservation de l'énergie, pour un écoulement isentropique, entre deux états 1 et 2 peut s'écrire [16]:

$$\frac{a_1^2}{\gamma-1} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{a_2^2}{\gamma-1} + \frac{V_2^2}{2}$$

(III.18)

Si on considère que $V_2 = 0$, on obtient la grandeur totale :

$$\frac{a_0^2}{\gamma-1} = \frac{a^2}{\gamma-1} + \frac{V^2}{2}$$

(III.19)

Donc la vitesse du son critique est définie par :

$$\frac{a^2}{\gamma-1} + \frac{V^2}{2} = \frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)} a^{*2}$$

(II.20)

Si l'on prend $M = 1$ dans les équations des rapports des grandeurs totales (III.14), (III.15) et (III.16), on trouve les rapports des grandeurs critiques :

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{\gamma+1}$$

(III.21)

$$\frac{p^*}{p_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

(III.22)

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

(III.23)

III.5 L'entropie en fonction du nombre de Mach:

La figure (III.2) montre l'entropie spécifique du fluide comme une fonction du nombre de mach de conduit, pour écoulement subsonique ou supersonique.

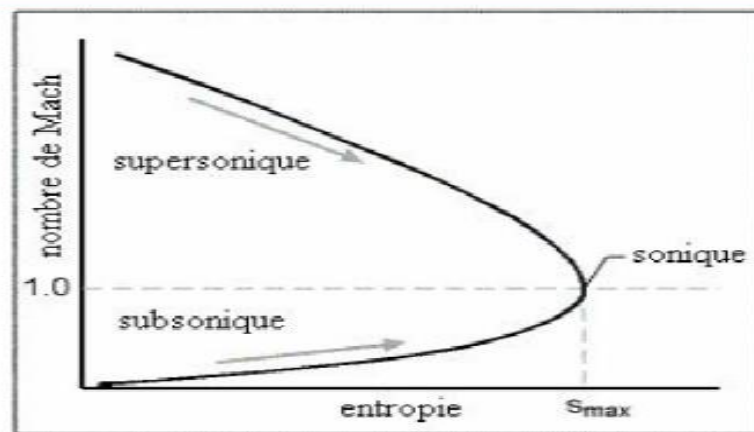


Figure III-2 : Entropie comme fonction de mach.

On voit que quand la longueur de conduit est augmentée, le nombre de mach approche de l'unité. Si la condition sonique existe à la sortie de conduit, l'écoulement devient étranglé. Figure (III.2) montres aussi l'écoulement ne peut pas passer de subsonique a supersonique ou vice versa, pour la simple raison qu'on ne peut pas violer la seconde loi de thermodynamique.

III.6 Effet de variation de section sur l'écoulement [16]:

Pour étudier l'effet d'un changement de section, nous reprenons les équations de bilan de masse et de quantité de mouvement :

❖ Continuité :

$$\rho V A = cte$$

(III.24)

Sous forme différentielle :

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dV}{V} = 0$$

(III.24.a)

$$\frac{dP}{\rho} + VdV = 0$$

(III.25)

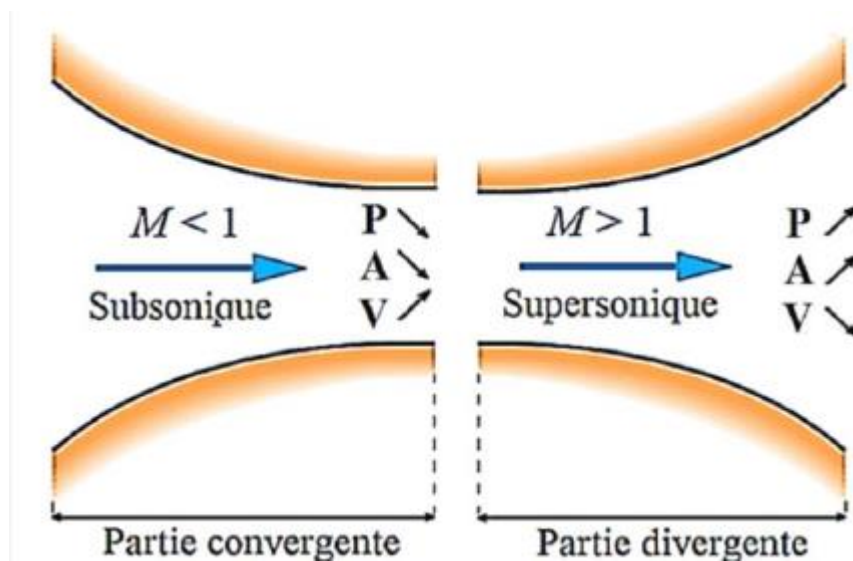


Figure III-3 : Volume du fluide limité par la paroi de la tuyère et les deux sections.

On peut noter d'autre part que :

$$\frac{dP}{\rho} = \frac{dP}{d\rho} \frac{d\rho}{\rho} = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s \frac{d\rho}{\rho}$$

(III.26)

Puisque l'écoulement est isentropique.

On sait d'autre part que la célérité sonore locale est définie par :

$$a^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s$$

(III.27)

On peut donc écrire :

$$\frac{dP}{\rho} = a^2 \frac{d\rho}{\rho}$$

(III.28)

Introduisant cette relation dans l'équation de bilan de quantité de mouvement, on a finalement :

$$a^2 \frac{d\rho}{\rho} + V^2 \frac{dV}{V} = 0$$

(III.29)

Ou encore :

$$\frac{d\rho}{\rho} = -M^2 \frac{dV}{V}$$

(III.30)

Cette relation montre le lien entre nombre de mach et variation relative de la densité. Pour faibles nombres de mach ($M \in [0.1, 0.2]$), les variations de densité peuvent être négligées. Par contre, pour des nombres de mach élevés les variations de densité deviennent considérables et ne peuvent plus être négligées.

On introduit le nombre de mach $M = \frac{V}{a}$ on obtient une relation qui relie la vitesse et la section :

$$\frac{dA}{A} + (1 + M^2) \frac{dV}{V} = 0$$

(III.31)

Cette relation est appelée équation d'**Hugoniot**. Elle relie les variations de vitesse et de section au nombre de mach.

Interprétation :

- Si $M < 1$ (écoulement subsonique) la vitesse varie en sens inverse de la section.
- Si $M > 1$ (écoulement supersonique) la vitesse varie dans le même sens que la section.
- Si $M = 1$ (écoulement sonique) $dA = 0$ c'est-à-dire l'aire est minimale ce qui correspond au col.

III.7 Paramètres thermodynamique à haute température :

III.7.1 Equation adiabatique :

D'après les relations de Maxwell :

$$dU = C_v dT + \left(T \frac{\partial P}{\partial T} \Big|_v - P \right) dV$$

On le remplace dans l'équation (III.3), donc :

$$dQ = C_v dT + T \frac{\partial P}{\partial T} \Big|_v dV$$

Pour une transformation adiabatique $\delta Q = 0$

Alors : $C_v dT + T \frac{\partial P}{\partial T} \Big|_v dV = 0$

(III.32)

Donc : $\left(\frac{\partial C_v}{\partial V} \right)_T = \left(\frac{\partial(L-P)}{\partial T} \right)_v$

$$\left(\frac{\partial C_v}{\partial V} \right)_T = \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_v - \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v$$

(III.32.a)

Et pour un processus réversible $dQ = T dS$

$$\text{Alors : } \begin{cases} dS = \frac{C_v}{T} dT + \frac{L}{T} dV \\ dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T dV \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} \frac{C_v}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_v \\ \frac{L}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T \end{cases}$$

$$\text{Donc : } \left[\frac{\partial \left(\frac{c_v}{T} \right)}{\partial V} \right]_T = \left[\frac{\partial \left(\frac{L}{T} \right)}{\partial T} \right]_v \longrightarrow \frac{1}{T} \left(\frac{\partial c_v}{\partial V} \right)_T = \frac{\left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_v T - L}{T^2} = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_v - \left(\frac{L}{T^2} \right)$$

En simplifiant par T :

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial V} \right)_T = \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_v - \left(\frac{L}{T} \right)$$

(III.32.b)

En comparant (III.25.a) et (III.25.b) on obtient :

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v = \frac{L}{T}$$

Donc on trouve que :

$$\begin{cases} L = T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \\ V = \frac{1}{\rho} \\ dV = -\frac{\delta \rho}{\rho^2} \end{cases}$$

(III.33)

Le rapport de chaleur spécifique pour le régime supersonique est donné par la relation suivante :

$$c_v = \frac{c_p}{\gamma}$$

(III.34)

En remplace la relation (III.33) et (III.34) dans la relation (III.32) on obtient :

$$\frac{c_p}{\gamma} dT + rT \frac{dV}{V} = 0$$

$$\frac{c_p}{\gamma} dT - \frac{rT}{\rho} d\rho = 0$$

Et d'après la relation de MAYER (III.11.a) on a :

$$\gamma(T) = \frac{c_p(T)}{c_p(T) - r}$$

Pour un gaz parfait la relation devient :

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dT}{T[\gamma(T)-1]}$$

(III.35)

III.7.2 Equation de la vitesse sonore en fonction de la température :

La vitesse sonique ou vitesse de son est la vitesse de propagation de l'onde de pression infinitésimale dans un fluide. Elle est généralement exprimée comme [22] :

$$a^2 = \left(\frac{dp}{d\rho}\right)_{s=cte}$$

(III.36)

On dérive l'équation de la continuité (III.24) ça nous donne :

Donc :
$$d(\rho V A) = 0$$

Peut aussi s'écrire :
$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} + \frac{dA}{A} = 0$$

Et d'après l'équation de gaz parfait (III.9) donc l'équation différentielle de l'état de gaz parfait s'écrit :

$$\frac{dP}{d\rho} = \rho r \frac{dT}{d\rho} + rT$$

(III.37)

D'après la relation (III.28) on trouve :

$$\frac{dT}{d\rho} = \frac{T[\gamma(T)-1]}{\rho}$$

On remplace cette égalité dans l'équation (III.30), on aura :

$$\frac{dP}{d\rho} = \rho r \frac{T[\gamma(T)-1]}{\rho} + rT$$

Alors :
$$a^2(T) = \frac{dP}{d\rho} = rT[\gamma(T)] - rT + rT$$

$$a^2 = \left(\frac{dP}{d\rho}\right)_s = \gamma(T)rT$$

(III.38)

La relation de la vitesse du son, qui reste toujours valable pour le modèle haute température sauf qu'il faut tenir compte de la variation du rapport $\gamma(T)$.

$$a = \sqrt{\gamma(T)rT}$$

$$da = \frac{r[\gamma(T)dT + Td\gamma(T)]}{2\sqrt{rT\gamma(T)}}$$

Donc finalement :

$$\frac{da}{a} = \frac{1}{2} \left[\frac{d[\gamma(T)]}{\gamma(T)} + \frac{dT}{T} \right]$$

(III.39)

Cette relation présente la différentielle de la vitesse du son en fonction de la température pour un gaz à Haute Température.

III.7.3 la vitesse en fonction de température :

Si l'écoulement est adiabatique, on a alors l'équation de conservation de l'énergie sous la forme :

$$h + \frac{v^2}{2} = cte \quad \text{ou} \quad C_p T + \frac{v^2}{2} = cte$$

(III.40)

On dérive l'équation précédente on obtient :

$$C_p dT + VdV = 0$$

(III.40.a)

D'où :

$$VdV = -C_p dT$$

On intégrant cette relation l'état générateur et un état quelconque on obtient :

$$\int_{v_0}^v V dV = - \int_{T_0}^T C_p dV$$

On a la condition à la sortie de chambre de combustion $V_0 \approx 0$ et T_0 donc l'intégrale devient :

$$V^2 = -2 \int_{T_0}^T C_p(T) dV$$

(III.41)

On pose :

$$H(T) = - \int_{T_0}^T C_p(T) dV$$

(III.42)

On fait l'égalité entre l'équation (III.34) et (III.35) on trouve que :

$$V^2 = 2H(T)$$

(III.43)

On divise la relation (III.40.a) par V^2 et remplaçons (III.43) dans le résultat pour obtenir la forme différentielle de la vitesse de l'écoulement en fonction de température.

$$\frac{dV}{V} = - \frac{C_p(T)}{2H(T)} dT$$

(III.44)

III.7.4 Nombre de mach en fonction de température :

Le rapport de la vitesse V à la vitesse du son a , c.-à-d. $M = \frac{V}{a}$, est appelé nombre de Mach.

On remplace la vitesse par sa valeur, on trouve la relation suivante :

$$M = \frac{\sqrt{2H(T)}}{a}$$

(III.45)

III.7.5 Formule de la masse volumique en fonction de la température :

La forme différentielle de l'équation de Bernoulli est définie par [23] :

$$\frac{dP}{P} + VdV = 0$$

(III.46)

On remplace la relation de la vitesse de son (III.36) dans la relation précédente, on trouve :

$$a^2 \frac{d\rho}{\rho} + VdV = 0$$

On a $M = \frac{V}{a}$ donc on remplace par sa valeur, on obtient :

$$\frac{d\rho}{\rho} = -M^2 \frac{dV}{V}$$

(III.47)

Finalement :

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{c_p(T)}{\gamma(T)r T} dT$$

(III.48)

On pose :

$$F_\rho(T) = \frac{c_p(T)}{\gamma(T)r T} = \frac{c_p(T)}{a^2(T)}$$

Donc l'équation (III.41) devient :

$$\frac{d\rho}{\rho} = F_\rho(T) dT$$

(III.49)

En intégrer la formule (III.42) entre l'état générateur et l'état concerné on trouve :

$$\frac{d\rho}{\rho} = \exp\left(-\int_{T_0}^T F_\rho(T) dT\right)$$

(III.50)

III.7.6 La pression en fonction de température :

D'après la loi de gaz parfait (III.10) on trouve la forme différentielle suivant :

$$\frac{dP}{P} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T}$$

(III.51)

Avec :

$$\frac{p}{P_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{T}{T_0}$$

On remplace la relation (III.49) dans la formule différentielle de gaz parfait, on trouve :

$$\frac{dP}{P} = \left(F_\rho(T) + \frac{1}{T} \right) dT$$

(III.52)

La forme différentielle de la pression en fonction de la température pour le gaz à haute température.

III.7.7 la formule de la section en fonction de température :

La différentielle de l'équation de conservation de la masse est donnée par la relation :

$$\frac{dA}{A} = - \left(\frac{dV}{V} + \frac{d\rho}{\rho} \right)$$

En remplaçant $\frac{dV}{V}$ et $\frac{d\rho}{\rho}$ par leurs expressions précédentes :

$$\frac{dA}{A} = - \left(- \frac{c_p(T)}{2H(T)} dT + \frac{c_p(T)}{\gamma(T)r T} dT \right)$$

On obtient la relation suivante :

$$\frac{dA}{A} = F_A(T) dT$$

(III.53)

Avec :

$$F_A(T) = C_p(T) \left[\frac{1}{2H(T)} - \frac{1}{a^2(T)} \right]$$

L'intégration de l'équation (III.46) entre l'état de col A^*, T^* et un état quelconque du divergent nous donne le rapport de section supersonique suivant :

$$\frac{A}{A^*} = \exp \left[\int_T^{T^*} F_A(T) dT \right]$$

(III.54)

Le calcul de l'intégrale se fait numériquement à cause de complexité de fonction.

III.8 procédure de calcul pour le gaz à haute température :

La table (III.1) suivante représente la variation de la chaleur spécifique Cp et le rapport γ, pour l'air à une pression élevée qui sont données en fonction de température [23] :

Tableau III-1 : Table de variation de Cp (T) et γ (T) en fonction de la température pour l'air.

T(k°)	Cp(j/kgk)	γ(T)	T(k°)	Cp(j/kgk)	γ(T)			
55.538	1001.104	1.402	833.316	1107.19	1.35	2111.09	1256.81	1.29
				2	0	4	3	6
.....	.....	.....	888.872	1119.07	1.34	2222.20	1263.41	1.29
				8	5	5	0	4
222.20	10001.101	1.402	944.427	1131.35	1.34	2333.31	1270.09	1.29
5				6	0	6	7	2
277.76	1002.885	1.402	999.983	1141.36	1.33	2444.42	1273.47	1.29
1				5	6	7	6	1
305.53	1004.675	1.400	1055.53	1151.65	1.33	2555.53	1276.87	1.29
8			8	8	2	8	7	0
333.31	1006.473	1.399	1111.09	1162.20	1.32	2666.65	1283.75	1.28
6			4	2	8	0	1	8
361.09	1008.281	1.398	1166.65	1170.28	1.32	2777.76	1287.22	1.28
4			0	0	5	1	4	7
388.87	1011.923	1.396	1222.20	1178.50	1.32	2888.87	1290.72	1.28
2			5	9	2	2	1	6
416.65	1015.603	1.394	1277.76	1186.89	1.31	2999.98	1294.24	1.28
0			1	3	9	3	2	5
444.42	1019.320	1.392	1333.31	1192.57	1.31	3111.09	1297.78	1.28

7			6	0	7	4	9	4
499.98	1028.781	1.387	1444.42	1204.14	1.31	3222.20	1301.36	1.28
3			7	2	3	5	0	3
555.53	1054.563	1.374	1555.53	1216.01	1.30	3333.31	1304.95	1.28
8			8	4	9	6	7	2
611.09	1054.563	1.370	1666.65	1225.12	1.30	3444.42	1304.55	1.28
4			0	1	6	7	7	2
666.65	1067.077	1.368	1777.76	1234.40	1.30	3555.53	1308.58	1.28
0			1	9	3	8	0	1
722.20	1080.005	1.362	1888.87	1243.88	1.30			
5			2	3	0			
722.76	1093.370	1.356	1999.98	1250.30	1.298			
1			3	5				

III.8.1 Polynôme d'interpolation de $C_p(T)$:

L'interpolation des valeurs de C_p , en fonction de la température, est choisie par un polynôme de 9^{ème} degré. Ce choix est justifié par la petite valeur de l'erreur [24] obtenue entre les valeurs tabulées et les valeurs interpolées [25]. En outre, nous avons opté, pour l'écriture des fonctions $C_p(T)$ et $\gamma(T)$ pour le schéma de HORNER utilisé. Alors :

$$C_p(T) = a_1 + T(a_2 + T(a_3 + T(a_4 + T(a_5 + T(a_6 + T(a_7 + T(a_8 + T(a_9 + T(a_{10}))))))))))$$

(III.55)

Les coefficients $a_i (i = 1, 2 \dots 10)$ sont présentés dans le tableau (III.2) suivant :

Tableau III-2 : Coefficients du polynôme $C_p (T)$.

i	a_i
1	1001.1058
2	4.0661289×10^{-2}
3	$-6.3376997 \times 10^{-4}$
4	2.7474759×10^{-6}
5	$-4.0338459 \times 10^{-9}$

6		$3.0697736 \times 10^{-12}$
7		$-1.3509355 \times 10^{-15}$
8		3.472262×10^{-19}
9		$-4.8467531 \times 10^{-23}$
10		$2.8411878 \times 10^{-27}$

Après la présentation graphique de polynôme de $C_p(T)$ et la comparaison avec les valeurs données par le tableau de Peterson (III.1) nous remarquons qu'il y a un petit problème qui se pose durant l'interpolation de formule (III.55), une variation ondulée à basse température jusqu'à environ 240k°, au lieu d'avoir une fonction constante dans cette portion conformément aux valeurs de la table. À cet effet, une correction est introduite pour rapprocher les valeurs interpolées aux valeurs du tableau (III.1). Alors,

Si $T = \bar{T} = 240K^\circ$ la relation (III.48) devient :

$$\bar{C}_p = C_p(\bar{T}) = 10001.15868 \text{ j / (kg k}^\circ\text{)}$$

Donc pour la correction de la fonction $C_p(T)$, nous aurons deux cas de figures :

- ❖ Si $T < \bar{T}$ on utilise la correction suivante : $C_p(T) = \bar{C}_p$
- ❖ Si $T > \bar{T}$ on utilise la relation (II.55)

Concernant la détermination de la forme analytique de la fonction $C_p(T)$, on peut avoir plusieurs formes de polynômes par plusieurs procédures et méthodes [18,14]. Pour le choix de la bonne forme d'interpolation, il faut faire une étude sur les erreurs entre les valeurs du tableau (III.1) et les valeurs données par la substitution dans l'équation analytique du polynôme d'interpolation. L'interpolation choisie donne une erreur meilleure à $\varepsilon = 10^{-3}$.

III .8.2 Intégration de la chaleur spécifique $C_p(T)$:

Après l'interpolation de la fonction de la chaleur spécifique, on détermine la fonction d'enthalpie $H(T)$, par l'intégration de la fonction $C_p(T)$ dans l'intervalle $[T, T_0]$. Ainsi elle est en fonction de température totale T_0 et elle définit tant que $T < T_0$.

Remplaçons la relation (III.24) dans la relation (III.41) et écrivons le résultat obtenu de l'intégration sous la forme du schéma de Horner, on obtient :

$$H(T) = H_0 - [C_1 + T(c_2 + T(c_3 + T(c_4 + T(c_5 + T(c_6 + T(c_7 + T(c_8 + T(c_9 + T(c_{10})))))))))))]$$

(III.56)

Avec :

$$H_0 = T_0(c_1 + T_0(c_2 + T_0(c_3 + T_0(c_4 + T_0(c_5 + T_0(c_6 + T_0(c_7 + T_0(c_8 + T_0(c_9 + T_0(c_{10}))))))))))$$

(III.57)

Et : $c_i = \frac{a_i}{i}$ avec $(i = 1,2,3 \dots 10)$

Comme la fonction H(T) est obtenue à l'aide de fonction de $C_p(T)$ et comme ce dernier présente un problème lorsque $T < T_0$, il est nécessaire de corriger ce problème pour la fonction H(T) :

- ❖ Si $T_0 < \bar{T}$ donc : $H(T) = \bar{C}_p(T_0 - T)$
- ❖ Si $T_0 > \bar{T}$ on a deux cas :
 - Si $T > \bar{T}$ on utilise la formule (III.49) pour calculer H(T)
 - Si $T \leq \bar{T}$ on utilise la formule suivante : $H(T) = \bar{C}_p(\bar{T} - T_0) + H(\bar{T})$

III.8.3 L'erreur relative de modèle gaz parfait :

Définition : L'erreur relative est le quotient de l'erreur absolue à la valeur réel, l'erreur relative n'a pas d'unité, elle nous indique la qualité du résultat obtenu .Elle s'exprime généralement en pour cent [26].

Le modèle mathématique d'un gaz parfait en considère la chaleur spécifique et le rapport γ constants donne des résultats acceptables avec une certaine erreur pour des faibles températures. D'après cette étude, on peut remarquer une différence des relations données entre le modèle du gaz parfait et notre modèle développé. L'erreur donnée par le modèle du gaz parfait par rapport à notre modèle qui tiens compte de

la température génératrice peut être calculée pour chaque paramètre. Alors pour chaque couple (T_0, M) , l'erreur relative ε peut être évaluée par la relation suivante [20]:

$$\varepsilon_{param\acute{e}tre}(T_0, M) = \left| 1 - \frac{param\acute{e}tres\ GP(T_0, M)}{param\acute{e}tre\ HT(T_0, M)} \right| \times 100$$

(III.58)

On désigne par le mot paramètre tous les paramètre thermodynamique (T, P, A, ρ , le débit) noté dans ce chapitre.

Dans les applications aérodynamiques, généralement les auteurs acceptent une erreur inférieure à 5 % [16]. L'erreur maximale commise entre les erreurs données par les paramètres peut être évaluée pour donner une erreur globale des résultats du phénomène physique.

III.9 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons traité des notions de base, ainsi que les équations gouvernantes l'écoulement des fluides parfait et à haute température.

Le chapitre suivant sera dédié à la présentation de la méthode numérique et les variations des équations mises en œuvre dans le solveur numérique. Ainsi que, les différents modèles de turbulence et la modélisation de l'écoulement près des parois.

CHAPITRE IV

SIMULATION NUMÉRIQUE

PAR ANSYS

Résumé

Dans ce chapitre nous allons présenter le logiciel ANSYS-Fluent et ces composants et nous allons aborder des notions concernant le maillage ces types et ces utilisations. Ainsi nous avons appliqué les étapes de ce logiciel sur nos tuyères.

Aperçu

Chapitre VI

Simulation Numérique par ANSYS

IV.1. Introduction

IV.1. Simulation Ansys-fluent

IV.1.1. le modèle ANSYS Workbench

IV.1.2. Architecture du logiciel FLUENT

- A. Le processeur : Design Modeler et ANSYS Meshing
- B. Le solveur Fluent
- C. Le post-processeur CFD post

IV.1.3. Procédure de résolution numérique par « Fluent »

IV.2. simulation de la tuyère MLN

IV.2.1 Géométrie

IV.2.2 Maillage

IV.2.3 Configuration

IV.2.4 Schéma de convergence

IV.4. Simulation de la tuyère a détente centré circulaire placée dans Y+

IV.4.1. Géométrie

IV.4.2 Maillage

IV.4.3 Configuration

- solveur
- conditions aux limites
- Critère de convergence

IV.5. Simulation de la tuyère a détente centré asymétrique circulaire placée dans Y+ après correction

IV.5.1 Géométrie

IV.5.2. Maillage

IV.5.3. Configuration

CHAPITRE IV : Simulation Numérique par ANSYS

IV.1. Introduction

Les simulations numériques de la dynamique des fluides couramment connues la CFD (Computational Fluid Dynamics) sont devenues un outil privilégié d'investigation dans les sciences et les technologies. Elles ont pour but de reproduire par le calcul le comportement d'un système décrit par un modèle très souvent constitué d'équations aux dérivées partielles. Ces équations correspondent à la traduction mathématique de lois scientifiques. La simulation numérique renforce donc l'étude mathématique (analyse) de ces équations et de leur résolution numérique.

Les écoulements internes ont pour caractère particulier l'absence de conditions aux limites à l'infini, ce qui n'est pas le cas des écoulements externes. L'influence des parois se manifeste donc dans toutes les directions, sauf éventuellement aux sections d'entrée et de sortie du fluide. On trouve ces types d'écoulement particulièrement dans les systèmes de propulsion des avions et de fusées.

La détermination et l'identification des caractéristiques des écoulements internes dans les tuyères supersoniques constituent un cas d'étude très intéressant vue la complexité de modéliser l'écoulement interne qui passe du régime subsonique au régime supersonique, d'où les effets de compressibilité non négligeables. La diversité des géométries possibles entraîne évidemment une grande variété dans la structure des écoulements (choc, décollement de couche limites, zones de recirculation). Ces phénomènes sévères rendent difficiles les simulations numériques.

L'expérience alimente la simulation. Inversement, l'exploration des nombreuses solutions rendue possible par la simulation, permet d'observer ou de prévoir des comportements inattendus, donc fait progresser la connaissance.

Les écoulements de fluides, que ce soient des écoulements internes ou écoulements externes, en régime laminaire ou turbulent sont décrits par le système d'équations aux dérivées partielles (E.D.P). Ainsi, tous les phénomènes physiques sont régis par ce système formé d'équations : de continuité, de quantité de

mouvement et d'énergie qu'il convient de résoudre pour connaître les caractéristiques du champ thermique et du champ d'écoulement.

La phase de discrétisation c'est une étape de l'approche numérique se met en accord avec le choix de la méthode de discrétisation pour le modèle mathématique sélectionné, et comporte deux étapes :

-Discrétisation de l'espace (maillage)

-Discrétisation des équations

La discrétisation de l'espace consiste à mettre en place un maillage, avec lequel on remplace l'espace continue par un nombre fini de points où les valeurs numériques des variables seront déterminées. Une fois le maillage est défini les équations peuvent être discrétisé, ce qui nous permet de transformer les équations de forme différentielle ou intégrale à des équations algébriques discrètes, comportant les valeurs des inconnus qui sont reliées à chaque point du maillage.

IV.2. Simulation Ansys-fluent

L'analyse de l'algorithme numérique sélectionné, cette étape concerne l'analyse des qualités du schéma en termes de stabilité et de convergence.

L'un de cet outil utilisé est l'ANSYS **19** est un outil de conception assistée par ordinateur (**CAO**) qui permet la conception et la génération des géométries en 3D/2D et applique des simulations. Il permet de construire des surfaces et des volumes à partir d'une série de points définissant la géométrie de base. Une fois la géométrie construite, elle peut être exportée en différents formats vers le générateur de maillage et les solveurs pour faire les analyses ou les simulations. **ANSYS 19** est un logiciel de génie mécanique qui collabore à de nombreux différents types de logiciels utilisés dans différents domaines comme : Vibrations, mécanique des fluides, aérodynamique, transfert de chaleur et dynamiques. Pour notre étude, deux systèmes de composants **d'ANSYS 19** sont utilisés pour effectuer le calcul aérothermique ; GEOMETRY, ICEM CFD et un système d'analyse FLUENT. **FLUENT** est un solveur qui utilise un maillage non structuré 2D ou 3D (avec la méthode de volume fini). Ces maillages sont : soit des maillages triangulaires

(tétraédriques en 3D), soit des maillages structurés interprétés en format non structuré comme des rectangles (hexaèdres), pour une simulation de tous les écoulements compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques... sur les géométries industrielles. L'analyse en 2D ou 3D montre la capacité de FLUENT à simuler les caractéristiques de l'écoulement autour des tuyères supersonique. Ce problème est résolu en utilisant les équations d'Euler.

IV.2.1. le modèle ANSYS Workbench

ANSYS Workbench est une plateforme qui permet de réaliser toutes les différentes étapes de simulation dans une interface unique ce qui permet de gagner du temps et être plus productif.

IV.2.2. Architecture du logiciel FLUENT

Le code de calcul est un code commercialisé par le groupe ANSYS, l'un des pôles de compétences en mécanique des fluides les plus importants, il est largement utilisé dans l'industrie vu que son interface facilite son utilisation.

ANSYS Fluent est modélisé par la méthode des volumes finis, il est composé de trois éléments (le processeur, le solveur et le post-processeur) :

A. Le processeur : Design Modeler et ANSYS Meshing

Design Modeler permet de représenter la géométrie du système et spécifie le type du matériau (fluide ou solide) puis l'utilisation d'ANSYS Meshing pour effectuer le maillage qui sert à discrétiser le domaine et définir les frontières.

B. Le solveur Fluent

Le solveur Fluent se caractérise par une interface permettant de suivre l'état d'avancement du calcul, définir les conditions aux limites. Permet de définir numériquement les conditions opératoires (pression et gravité) dans lesquelles est effectuée la simulation, ainsi que la spécification des conditions aux limites et choisir le processus itératif.

C. Le post-processeur CFD post

Ce troisième et dernier élément nous permet d'afficher les résultats obtenus, on nous les présentant sous forme de champs de vecteurs, de contours, de lignes de courant ou encore de courbes de toutes les grandeurs calculées (vitesse, pression, température, Nombre de mach...etc.) Sur un segment, une section du domaine, ou sur tout le volume.

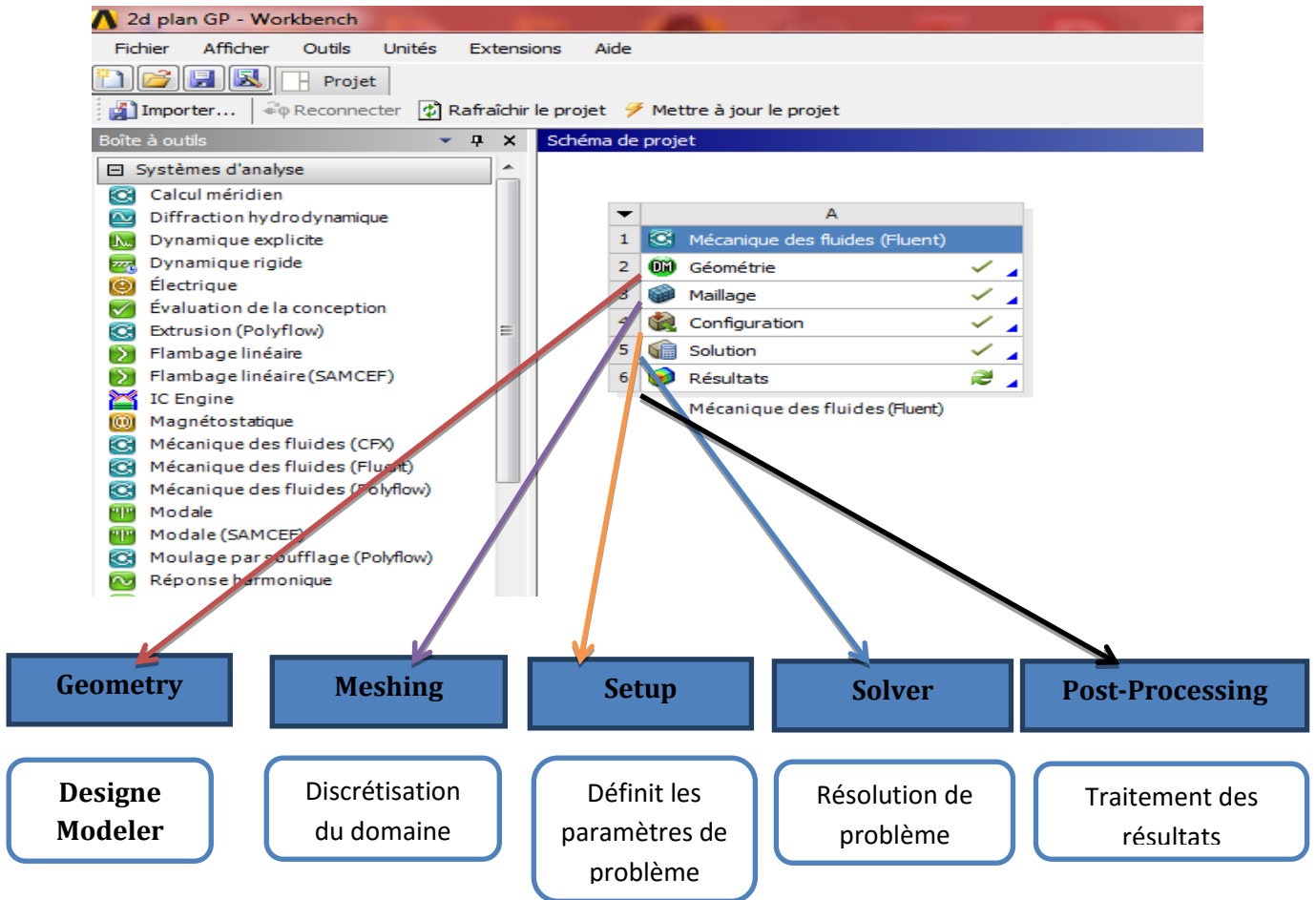


Figure IV-1: les principales étapes d'ANSYS Fluent

IV.2.3. Procédure de résolution numérique par « Fluent »

Une fois que la géométrie est créée et les frontières sont définies, on exporte le maillage pour pouvoir effectuer une résolution numérique et discrétiser des équations intégrales qui traduisent la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

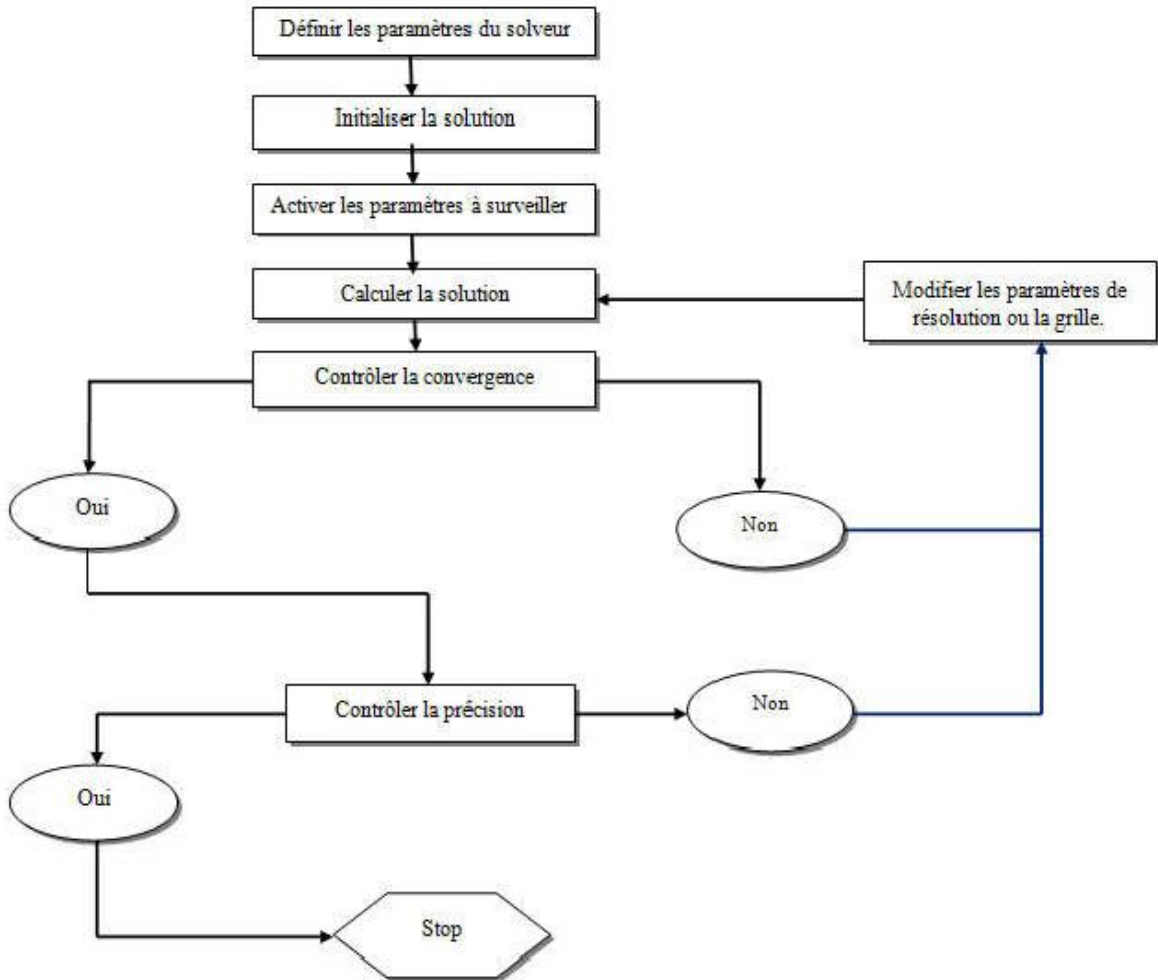


Figure IV-2: Étape de la résolution numérique par Fluent

IV.3. simulation de la tuyère MLN

IV.3.1 Géométrie

C'est une tuyère divergente de 8.35 m de longueur avec un rapport de section égale à 4.22. Les points de profile de cette tuyère sont obtenus à l'aide de logiciel Fortran. La géométrie a été dessinée dans Design Modeler.

Dans ce cas, notre géométrie est symétrique, seule la moitié supérieure sera dessinée sur Design Modeler.

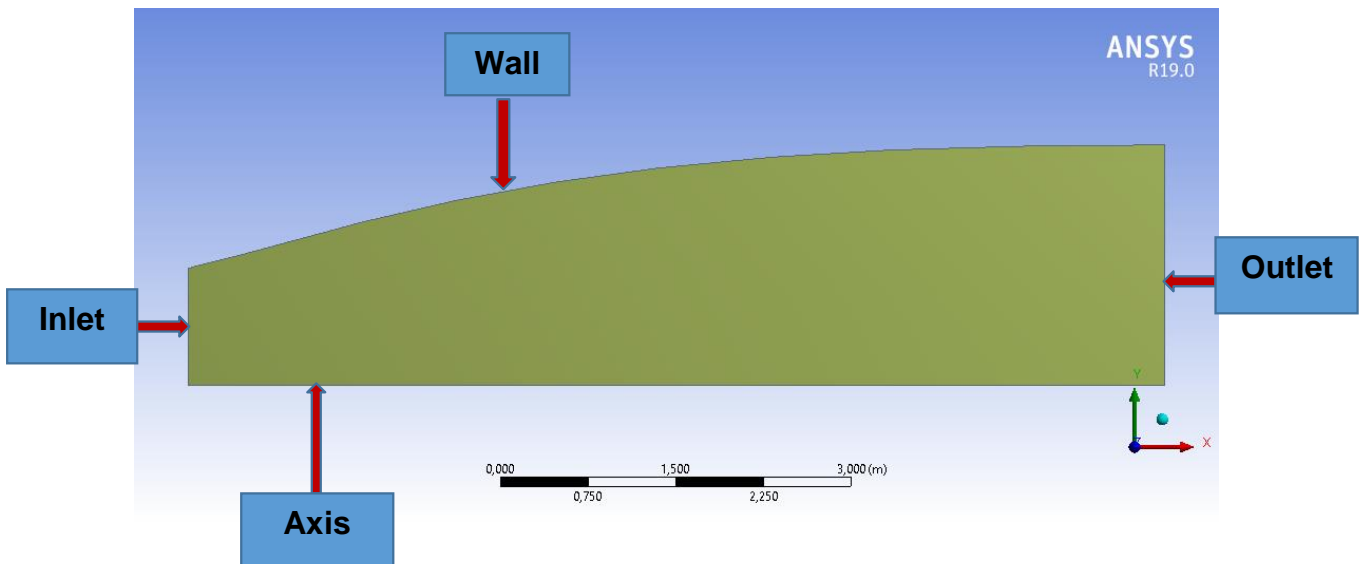


Figure IV-3: la géométrie de la tuyère sur Design Modeler

IV.3.2 Maillage

Le choix du maillage est une étape essentielle de la simulation numérique. Il est donc important de bien choisir un maillage qui s'adapte au mieux aux problèmes considérés.

Il est préférable d'utiliser un maillage structuré qui induit un temps de calcul généralement plus court que celui produit que sa contrepartie non structurée. En plus, la qualité de maillage est meilleure, les rapports de formes étant plus près de l'unité, ce qui conduit à des résultats plus satisfaisants. Donc dans cette étude, nous avons choisi un maillage quadratique structuré uniforme raffiné au niveau des parois.

- Tout d'abord, on commence par la génération d'un maillage par défaut.
- Réglage et Raffinement du maillage. Ces maillages sont raffinés dans la région du col et près de la paroi (les régions où les propriétés locales de l'écoulement varient rapidement)
- Finalement, on va nommer les arrêtes de notre tuyère.

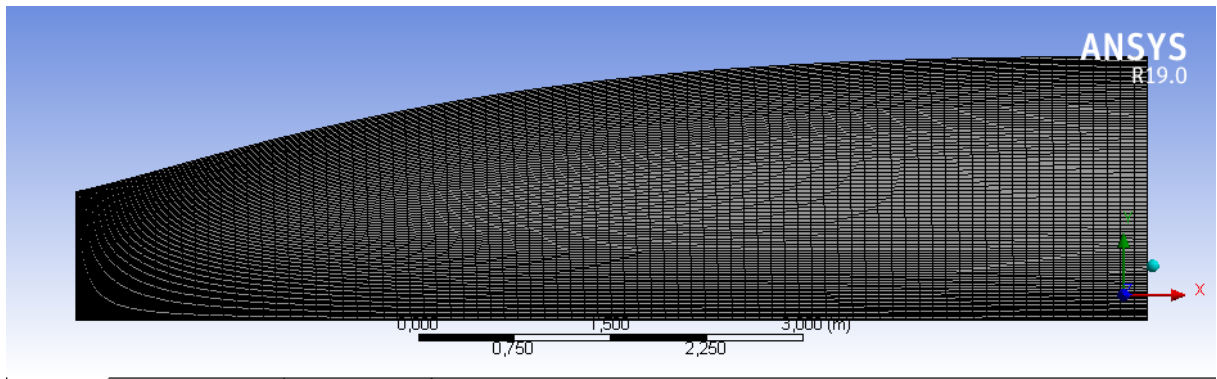


Figure IV-4 : maillage finale de la tuyère axisymétrique

Critère de qualité de maillage :

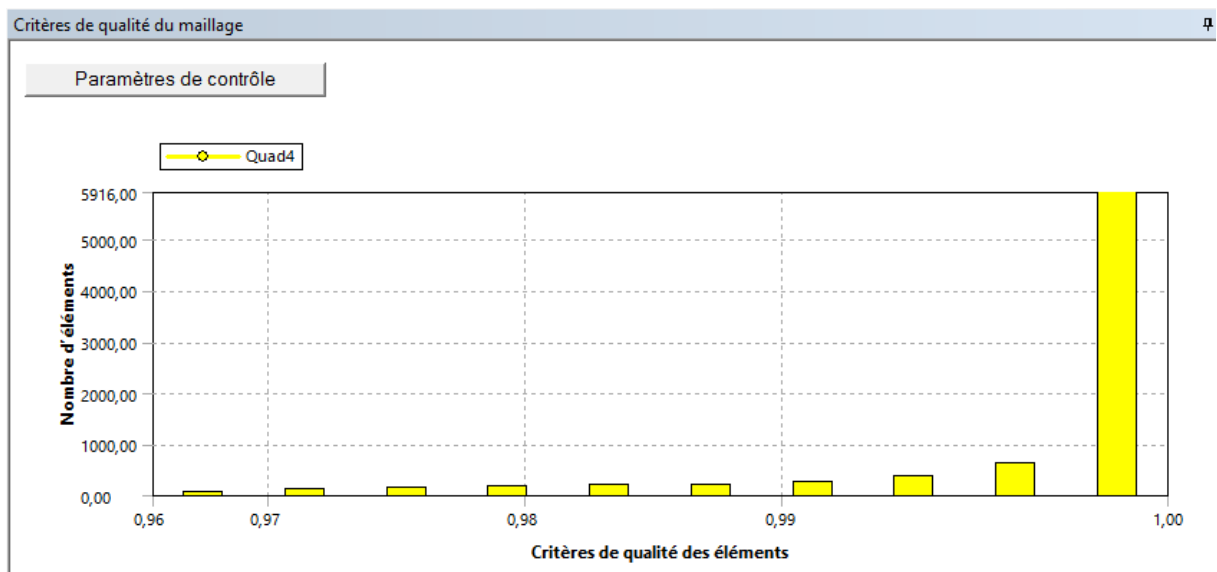
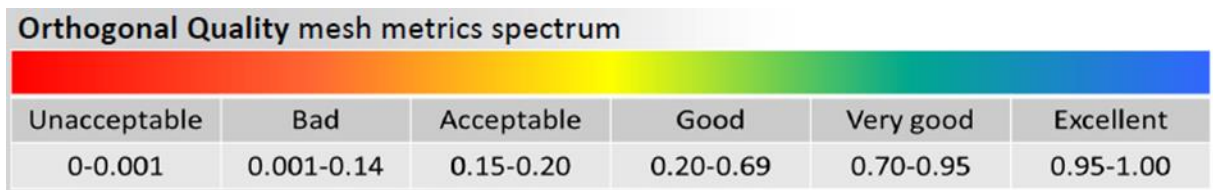


Figure IV-5: Vérification du critère d'orthogonalité

IV.3.3 Configuration

<ul style="list-style-type: none"> • Modèle 	<ul style="list-style-type: none"> • Ecoulement compressible 2D, axisymétrique visqueux.
<ul style="list-style-type: none"> • Modèle de turbulence 	<ul style="list-style-type: none"> • k-epsilon,

<ul style="list-style-type: none"> • Fluide • Condition aux limites • Solveur 	<ul style="list-style-type: none"> • air (loi des gaz parfait) • entrée : - $P_s=101325$ Pa <ul style="list-style-type: none"> - Mach=1 - $T=300$ k Sortie : - $P_s=2758.64$ Pa <ul style="list-style-type: none"> - Mach=3 - $T=300$ k parois : wall (paroi adiabatique) • Couplé, implicite.
---	---

IV.3.4 Schéma de convergence

Ce critère est une condition spécifique pour les résidus qui définissent la convergence d'une solution itérative. La convergence a été jugée sur la base de trois critères. Tout d'abord, les résidus d'équations normalisées pour les équations de la quantité de mouvement, de la continuité et de la turbulence ont été surveillés et devraient baisser de manière souhaitable en dessous de $1e-6$. Cependant, ce critère seul ne suffit pas pour juger de la validité de la solution. Dans certains cas, le critère résiduel peut ne jamais être rempli même si la solution est valide et pour d'autres, la solution peut être incorrecte même si les résidus sont faibles.

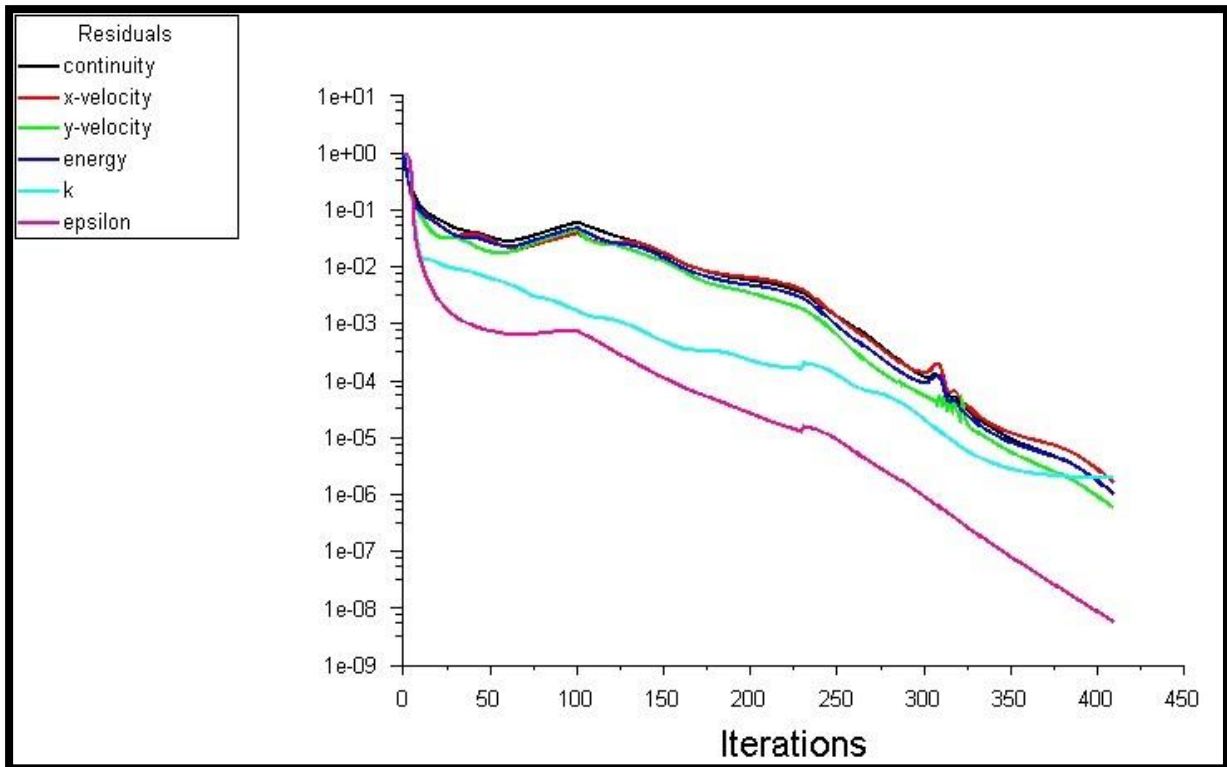


Figure IV-6: Schéma de convergence pour tuyère axisymétrique

IV.4. Simulation de la tuyère a détente centré circulaire dans Y+

IV.4.1. Géométrie

Dans la première étude nous avons pris la tuyère de base MLN et nous avons éliminé la symétrie par rapport à l'axe des x, donc nous avons obtenu une nouvelle forme des tuyères à détente.

Il s'agit d'une tuyère de 8.35 m de long et rapport des sections de 4.22, à l'aide de la méthode des caractéristiques programmée dans le langage Fortran nous avons trouvé les points de profil de cette tuyère.

La figure ci-dessous représente la géométrie de la tuyère dans le logiciel de modélisation :

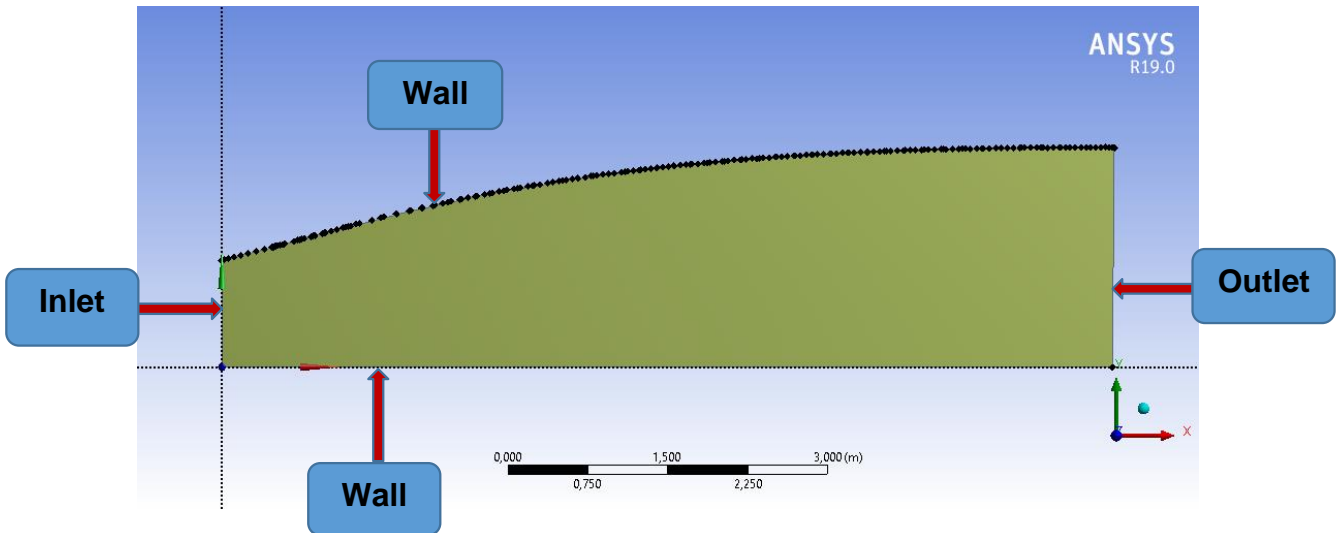


Figure IV-7: la géométrie de la tuyère sur Design Modeler

IV.4.2 Maillage

De même façon utiliser dans le cas précédant on a généré le maillage de ce cas:

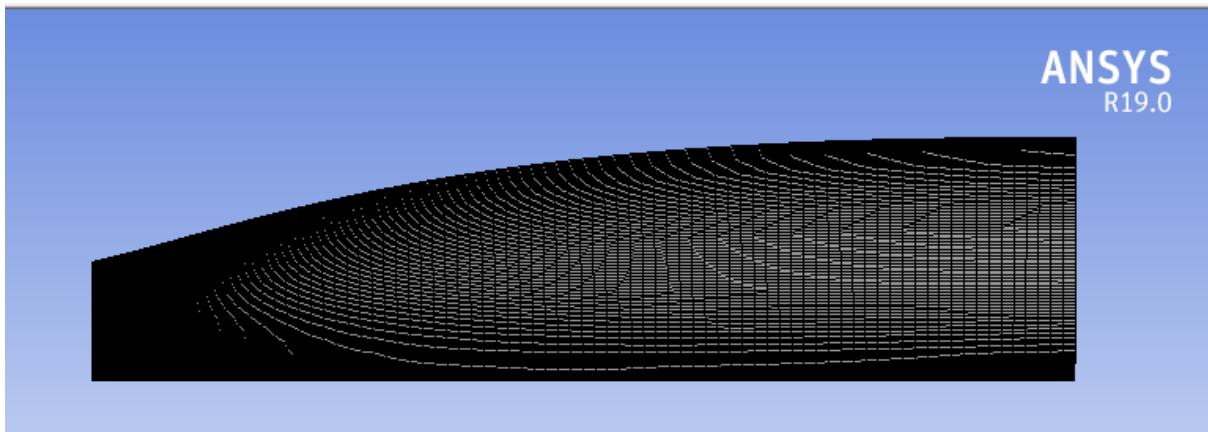


Figure IV-8: maillage finale de la tuyère

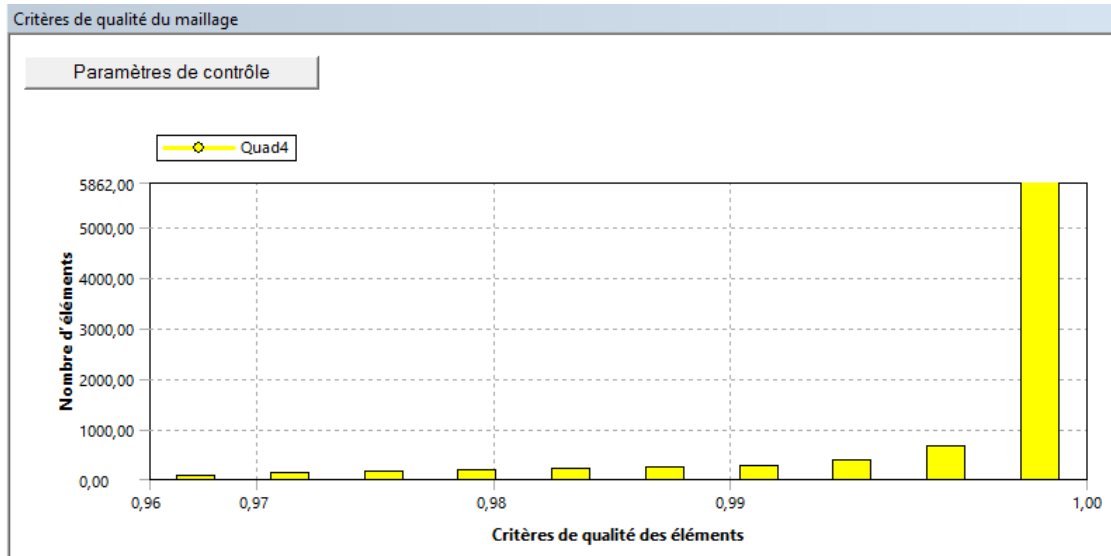
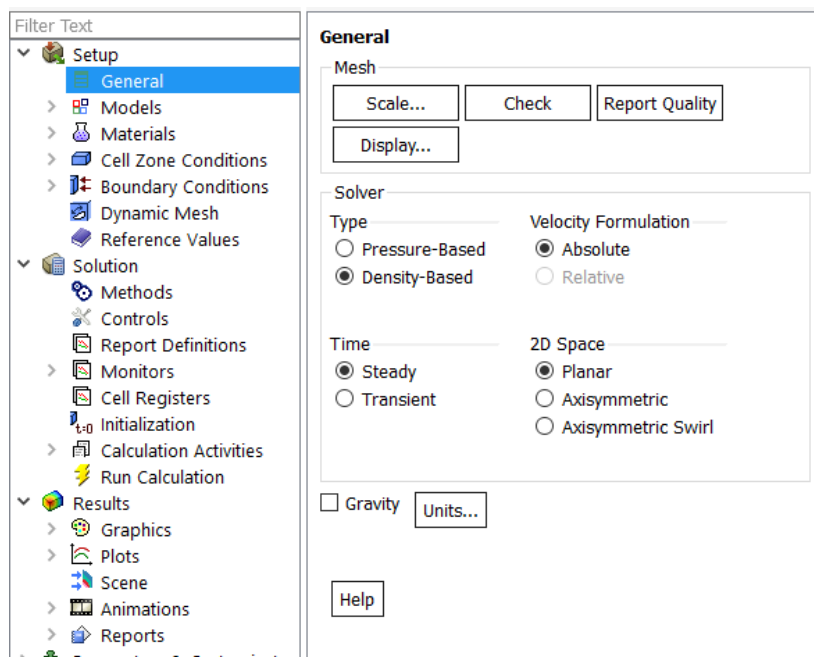


Figure IV-9: Vérification du critère d'orthogonalité

IV.4.3 Configuration

➤ solveur

Nous avons utilisé le solveur « density-Based » parce que nous avons un écoulement compressible, dans un domaine de calcul « 2D Planar » à cause de la non symétrie.



➤ conditions aux limites

Concernant les conditions aux limites sont les même de la tuyère MLN

$$\text{Inlet:} \begin{cases} \text{pression totale} = 3000000 \text{ pascal} \\ \text{pression statique} = 1584000 \\ \text{température} = 247\text{K}^\circ \end{cases} \quad \text{Outlet:} \begin{cases} \text{pression} = 3890 \text{ pascal} \\ \text{nombre de mach} = 3 \end{cases}$$

➤ Critère de convergence

La figure de résidus montre que la convergence est atteinte au bout de 335 itérations. La solution converge quand les résidus atteignent l'ordre de 10^{-5} .

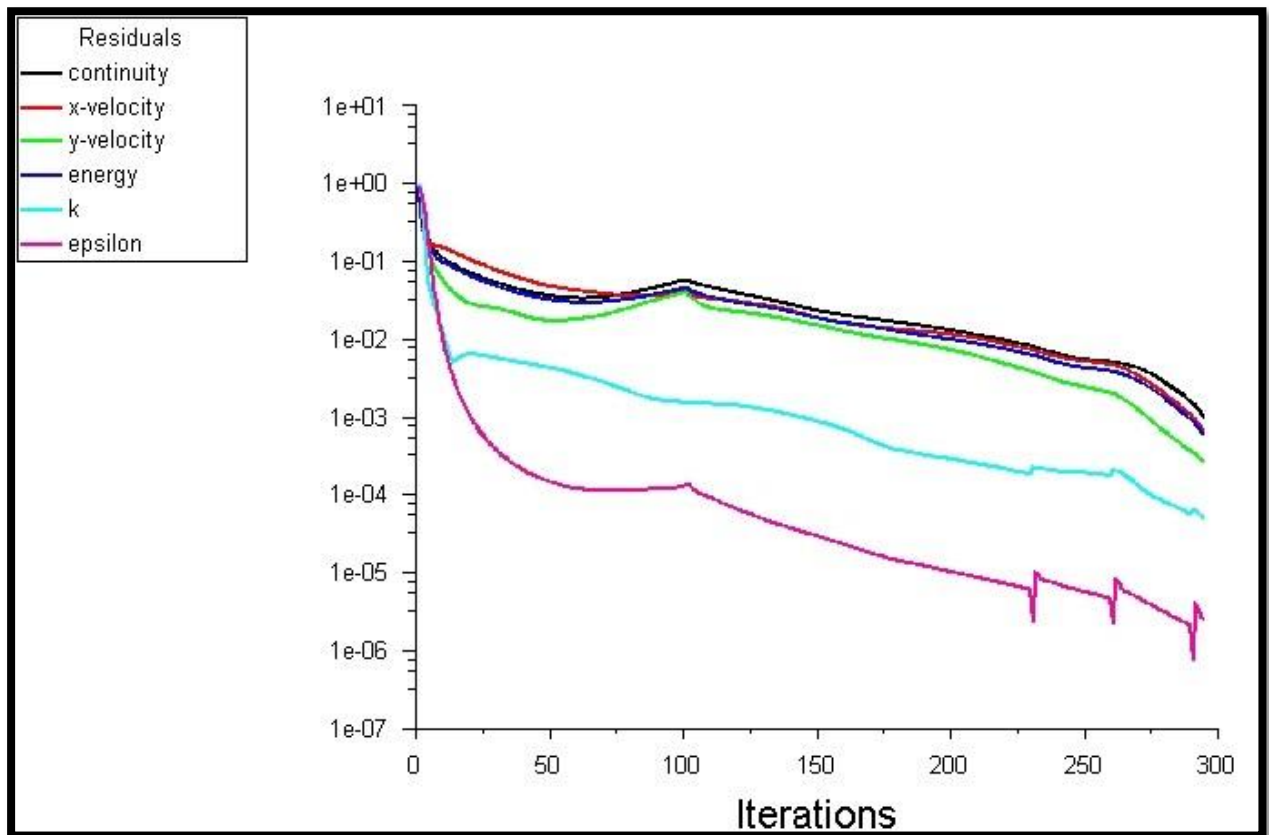


Figure VI.10 : Schéma de convergence

IV.5. Simulation de la tuyère a détente centré asymétrique circulaire dans Y+ après correction

IV.5.1 Géométrie

La deuxième manipulation c'est d'agrandir la tuyère de telle façon que la surface à l'entrée et la même comparant avec la tuyère de base MLN.

Il s'agit d'une nouvelle forme de la tuyère à détente de caractéristique du 16.7m de long et de 4.22 de rapport des sections. Les points de profils sont trouvés à l'aide de la méthode des caractéristiques en utilisant le programme de langage fortran.

Elle a été dessinée dans le Désigne Modelere ci-dessous :

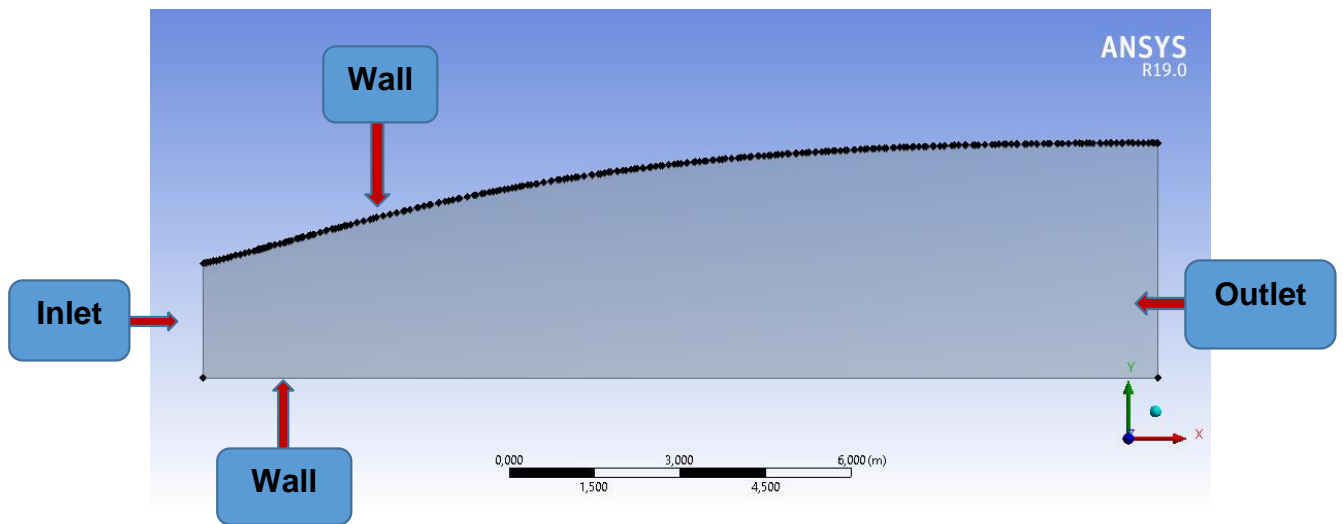


Figure IV-10: la géométrie de la tuyère sur Désigne Modeler

IV.5.2. Maillage

De même procédure des cas précédents nous avons généré le maillage de cette tuyère.

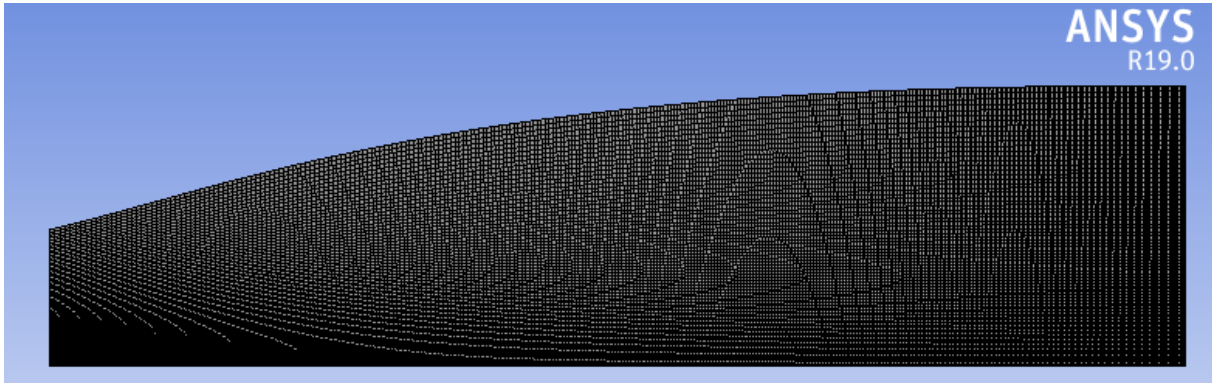


Figure IV-11 : maillage finale

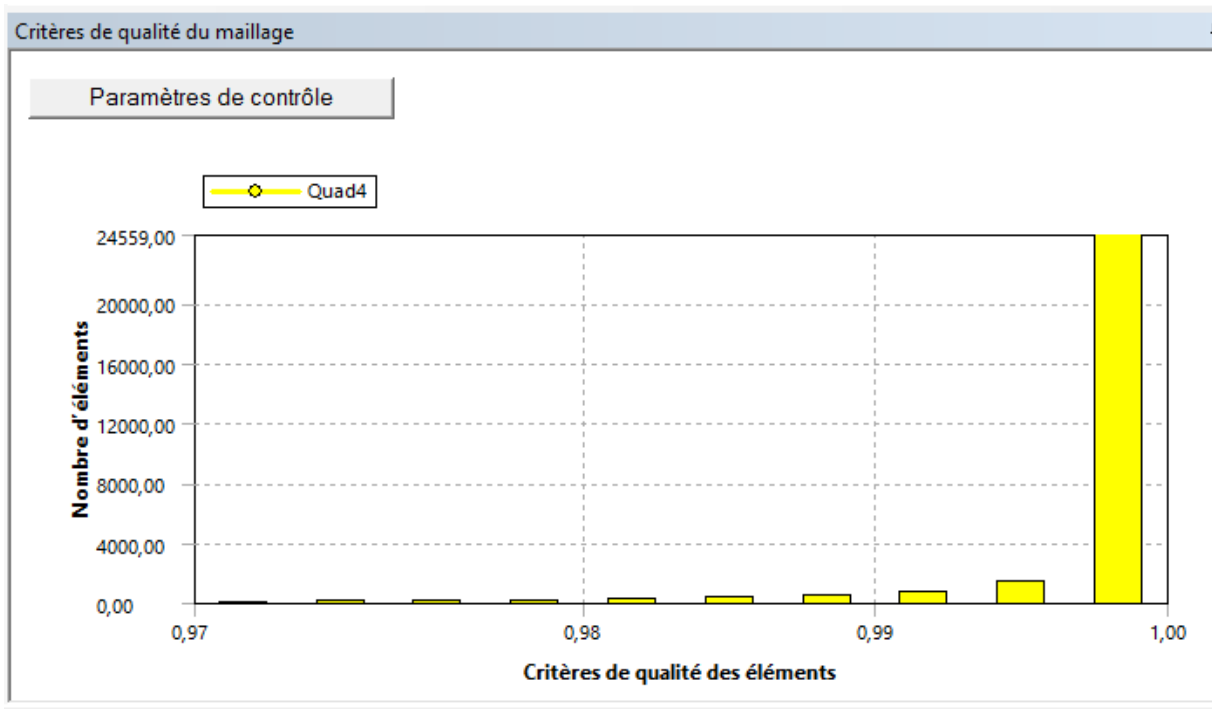


Figure IV-12: Vérification du critère d'orthogonalité

IV.5.3. Configuration

Avec les mêmes étapes du premier cas nous avons lancé la simulation:

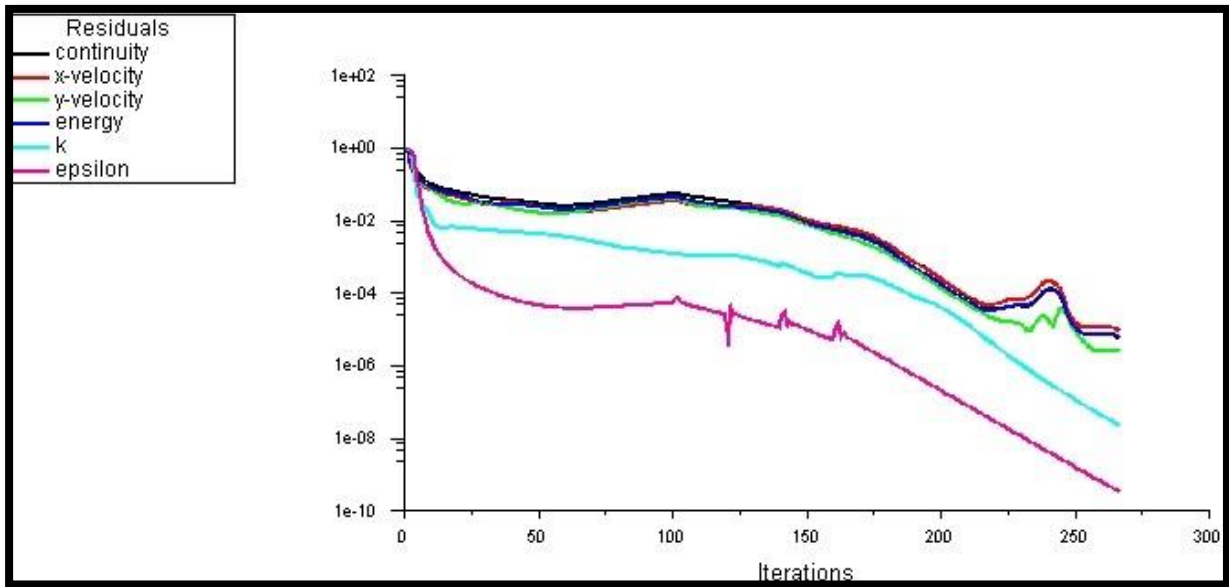


Figure IV-13 : schéma de convergence

CHAPITRE V

SIMULATION NUMERIQUE

PAR OPENFOAM

Résumé

Dans ce chapitre nous avons faire la simulation des trois cas de notre tuyère étudiée, en utilisant le logiciel Open-FOAM sachant que le maillage est importé à partir d'ANSYS-Fluent.

Aperçu

CHAPITRE V

SIMULATION NUMERIQUE PAR OPENFOAM

V.1. Introduction Générale OpenFOAM

V.1. Tuyère MLN

V.1.1. Importation du maillage

V.1.2 Choix de solveur

➤ Architecture de cas

V.1.2 Lancement du calcul

V.2. Tuyère a détente centré circulaire placée dans Y+

V.2.1. Importation du maillage

V.2.2. Le choix de solveur

▶ Architecture du cas

V.2.3. Lancement de calcul

V.3. tuyère a détente centré circulaire placée dans Y+ après correction

V.3.1. importation de maillage

V.3.2. Choix de solveur

▶ Architecture de cas

V.3.3. Lancement de calcule

CHAPITRE V : SIMULATION NUMERIQUE PAR OPENFOAM

V.1. Introduction Générale OpenFOAM

OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) est une boîte à outils de simulation multi-physiques principalement axée sur la résolution des équations de la mécanique des fluides. Il est distribué depuis 2004 sous licence libre et open source GNU GPL par la société britannique OpenCFD Ltd (acquise par SGI le 8 août 2011, puis par ESI Group le 11 septembre 2012). Son développement, en C++, a été amorcé par l'Imperial College London qui souhaitait un code de calcul basé sur la méthode des volumes finis et bénéficiant des dernières innovations en termes de langage informatique.

Il est principalement constitué d'une bibliothèque logicielle en langage C++ libre, et de différents outils, sous forme de bibliothèques et applications, permettant d'effectuer des résolutions. Il est livré avec de nombreux solveurs couvrant une large gamme de domaines tels que la combustion, les écoulements compressibles, incompressibles, multiphasiques, avec réactions chimiques, les transferts thermiques... Différents modèles de turbulence (RANS, LES...) sont également présents. OpenFOAM est distribué avec ParaView, un logiciel de post-traitement open-source. Pour les utilisateurs préférant utiliser leur outil de visualisation, il existe des modules d'export pour Fluent, EnSight, Fieldview.

Le code OpenFOAM vu comme une bibliothèque C++ prend tout son intérêt lorsqu'il s'agit d'utiliser de nouveaux modèles. En effet, contrairement à la majorité des codes scientifiques écrits de façon séquentielle (souvent en Fortran), OpenFOAM profite de la puissance des langages orientés objet.

Cette structure sous forme de classes permet de se rapprocher de l'écriture mathématique en termes d'opérateur divergence, rotationnel, gradient, laplacien, dérivée temporelle ...

Aucune connaissance approfondie du C++ n'est nécessaire pour écrire son modèle dans OpenFOAM.

▪ Version OpenFOAM utilisé dans notre simulation : version 9 installé sur Ubuntu 20.04.

V.2. Tuyère MLN

V.2.1 Importation du maillage

La première étape c'est de exporter le maillage de Ansys Fuent et l'enregistrer sous forme d'un fichier .msh sous le nom « MLN nozzle.msh » pour l'écraser dans Open FOAM.

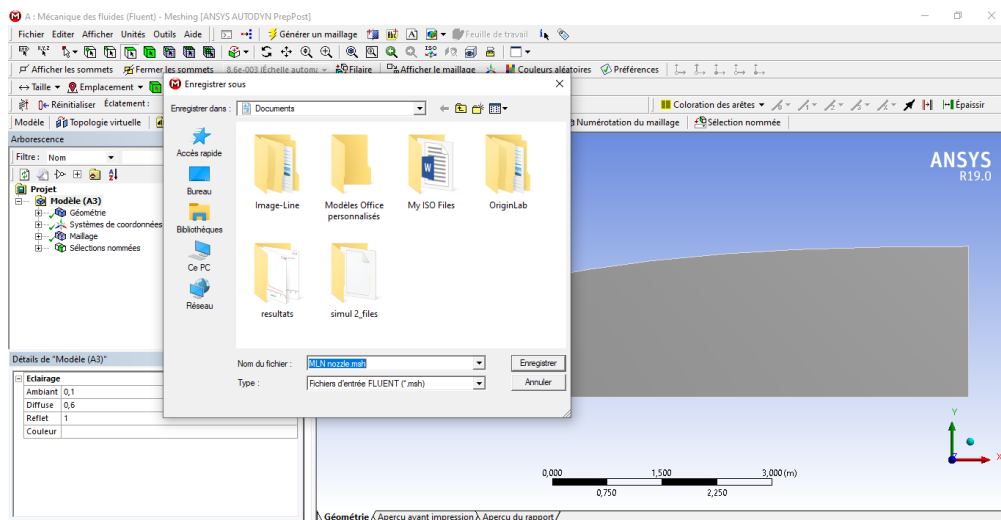


Figure V-1: importation de maillage fluent

V.2.2 Choix de solveur

OpenFOAM n'a pas de solveur générique applicable à tous les cas. Au lieu de cela, les utilisateurs doivent choisir un solveur spécifique pour une classe de problèmes à résoudre. Les solveurs avec la distribution OpenFOAM se trouvent dans le répertoire **tutorial**. Ce répertoire est subdivisé en plusieurs répertoires par catégorie de mécanique des milieux continus, par ex. écoulement incompressible, transfert de chaleur, polyphasique, lagrangien, combustion. Chaque solveur reçoit un nom descriptif. Pour certains solveurs, principalement incompressibles, il reflète l'algorithme, par exemple simpleFoam utilisant l'algorithme SIMPLE, pimpleFoam utilisant l'algorithme PIMPLE. Le plus souvent, le nom reflète les modèles physiques ou le type de problème qu'il est conçu pour résoudre, par exemple ShallowWaterFoam, sonicFoam, cavitatingFoam.

Le solveur utilisé dans cette simulation est rhoPimpleFoam qui est un solveur transitoire pour l'écoulement turbulent de fluides compressibles pour les applications

HVAC (Heating , Ventilation and Air-Conditioning) . C'est-à-dire pour tout ce qui se rapporte au niveau de la thermique et similaires, avec des changements de mouvement de maillage et de topologie de maillage en option.

sonicFoam : Il est utilisé pour les écoulements transitoires supersoniques d'un gaz compressible.

➤ **Architecture de cas**

Après le choix de solveur rhoPimpleFoam dans le répertoire tutorial nous l'avons emmené dans le répertoire run pour l'utiliser sur notre cas de simulation On remarque qu'il existe trois fichiers dans le solveur (0, constant, System).

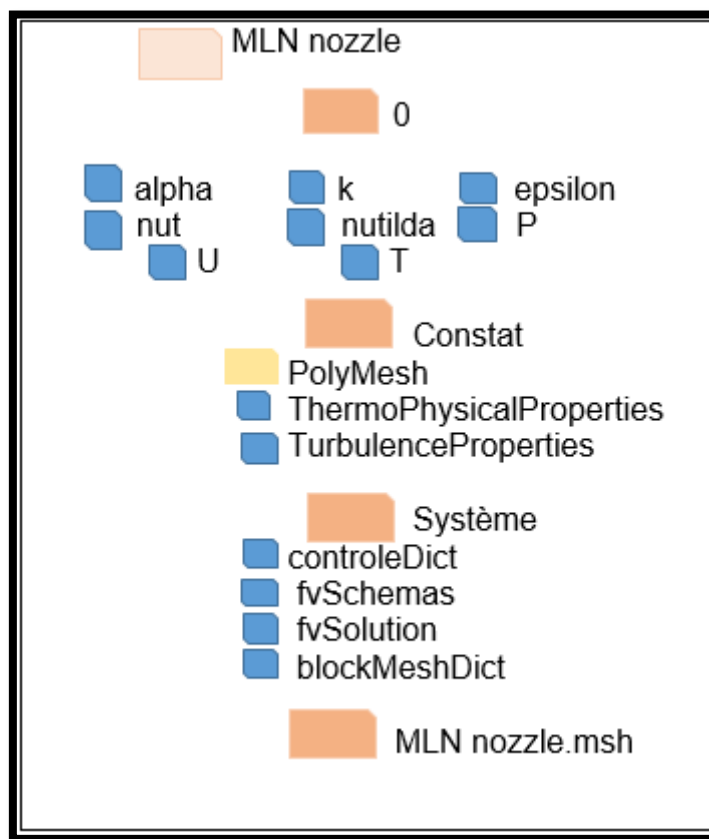


Figure V-2: Structure basique de dossier de cas pour la tuyère MLN

- Fichier constant

C'est le fichier qui contient le maillage (polyMesh), il contient aussi deux pages qui sont présentés les propriétés d'écoulement (thermo physique propriétés et les propriétés de la turbulence).

- polyMesh

Ce fichier contient les coordonnées du maillage, il sera créé après l'écrasement de fichier « MLN_ nozzle.msh » sur le solveur choisi, les commandes suivantes présentent comment le travail se faire.

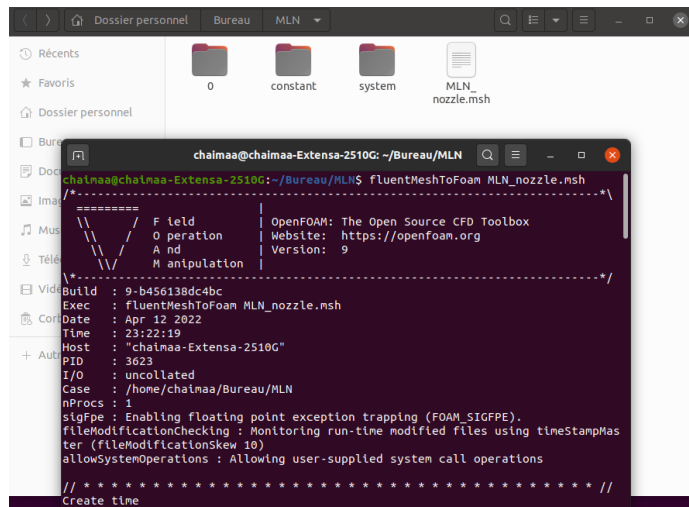


Figure V-3: commande d'importation de maillage

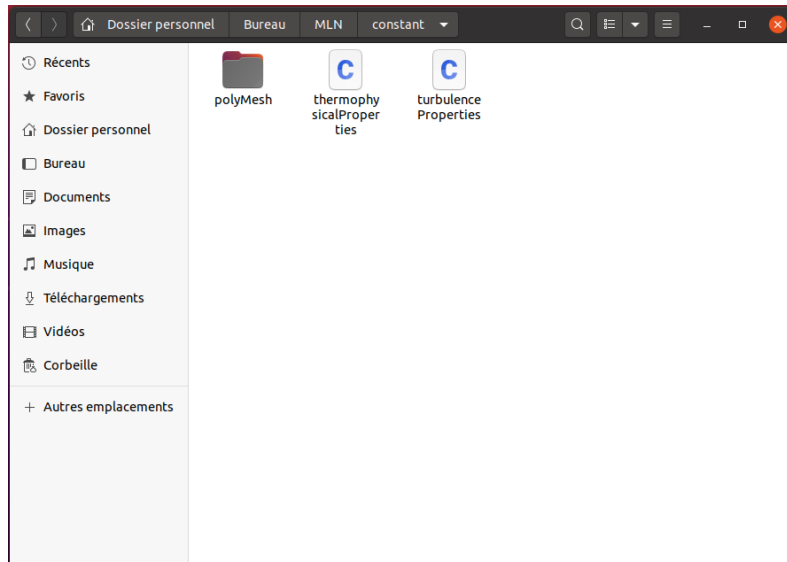


Figure V-4: création de dossier polymesh

- Thermophysical propriétés

Contient les propriétés thermique et physique de fluide utilisé. (dans notre cas c'est un gaz parfait) on prend les valeurs sans défaut :

- **la chaleur spécifique C_p** : c'est de l'air qui est égale à 1006.43 j/kg.k
- **specie** : c'est les molécules utilisées comme dans notre cas on a utilisé l'air comme idéal gaz cette valeur est pris par défaut
- **As et Ts** : ce sont des coefficients de la viscosité dynamique (μ) de l'air dépend de la temperature car on a utilisé un fluide compressible ses valeurs on les a pris par défaut.

- Fichier 0

C'est le fichier qui contient les pages d'injection les conditions aux limites de la vitesse, la pression et la température (U, P, T) plus des autres pages concernant le contrôle de turbulence et généralement de la simulation (nut, nutilda, k, epsilon, alpha).

- **Nutilda et nut** : viscosité-variable équivalente doit être définie comme Condition aux Limites lors de l'utilisation du modèle de turbulence LES Spalart-Allmaras. Spalart-Allmaras est un modèle basé sur LES (Large Eddy Simulation) qui résout le transport de nuTilda. Elle est également appelée variable de Spalart-Allmaras. Dans les simulations de CFD utilisant LES modèles, les turbulences variables en Wall sont définies comme une valeur fixe de zéro gradient. Ceci n'est valide que si la vitesse au mur est zéro, c'est-à-dire aucune oscillation et donc aucune turbulence.
 - ✓ Dimensionnement physique (0 2 -1 0 0 0 0) pour nut et nutilda. Dans notre cas nous avons pris leur valeur comme zéro gradient pour inlet, outlet, et Wall.
- **K-epsilon (K-ε)** : Le modèle k-epsilon pour la turbulence est le plus courant pour simuler les caractéristiques d'écoulement moyen dans des conditions d'écoulement turbulent. Il appartient à la famille de modèles de turbulence de Reynolds-averaged NavierStokes (RANS) où tous les effets de la turbulence sont modélisés. C'est un modèle à deux équations. Cela signifie qu'en plus des équations de conservation, il résout deux équations de transport (PDE), qui tiennent compte des effets historiques tels que la convection et la diffusion de l'énergie turbulente. Les deux variables transportées sont l'énergie cinétique turbulente (K), qui détermine l'énergie en turbulence, et le taux de dissipation turbulente (ε), qui détermine le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente. Le modèle k-ε fiable pour les écoulements à cisaillement libre, tels que ceux avec des gradients de pression relativement faibles, mais pourrait ne pas être le meilleur modèle pour les problèmes impliquant des gradients de pression défavorables, de grandes séparations et des écoulements complexes avec de fortes courbures. Il existe différentes variantes du modèle k-epsilon telles que Standard, Realizable, RNG, etc.

chacune avec certaines modifications pour mieux fonctionner dans certaines conditions d'écoulement du fluide.

✓ Dimensionnement physique (0 2 -2 0 0 0 0) de l'énergie cinétique turbulente (K) Dans notre cas sa valeur fixe pris par défaut 0.001 pour inlet, outlet, et Wall.

✓ Dimensionnement physique (0 2 -3 0 0 0 0) pour le taux de Dissipation turbulente (ϵ) epsilon.

Dans notre cas sa valeur fixe pris par défaut 0.01 pour inlet,outlet, et wall .

- **Alphat** : la condition aux limites alphat fournit une contrainte de paroi sur la conductivité Thermique turbulente cinématique, c'est-à-dire alphat pour la modélisation de la couche limite atmosphérique. La condition suppose une distribution logarithmique de la température potentielle dans la première cellule.

✓ Dimensionnement physique (1 -1 -1 0 0 0 0) pour alphat

Dans notre cas sa valeur fixe pris par défaut 1 pour inlet, outlet.

- **Pages U, P et T** : Contient les conditions aux limites de la vitesse, de pression et de température, nous avons rempli a la place des points.


```
Fichier : /home/chaimaa/OpenFOAM/chaimaa-9/run/galb1/0/p Page 1 sur 1

/*-----* C++ -*-----*\
  \ V   V   |   F i e l d         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
   \ V   V   |   O p e r a t i o n   | Website: https://openfoam.org
    \ V   V   |   A n d                | Version: 8
     \ V   V   |   M a n i p u l a t i o n |
/*-----*-----*\
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        volScalarField;
  object       p;
}
// *****

dimensions     [1 -1 -2 0 0 0 0];
internalField  uniform 100000;

boundaryField
{
  inlet_
  {
    type        fixedValue;
    value       uniform 100000;
  }

  outlet_
  {
    type        zeroGradient;
  }

  axis
  {
    type        symmetryPlane;
  }

  wall
  {
    type        zeroGradient;
  }

  frontAndBackPlanes
  {
    type        empty;
  }
}
}
```

Figure V-9: page de pression P

```

Fichier : /home/chaimaa/OpenFOAM/chaimaa-9/run/galb1/0/T Page 1 sur 1
/*----- C++ -----*/
  Field      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  Operation  | Website: https://openfoam.org
  And        | Version: 8
  Manipulation
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        volScalarField;
  object       T;
}
// *****

dimensions    [0 0 0 1 0 0 0];
internalField uniform 240;
boundaryField
{
  inlet_
  {
    type        fixedValue;
    value       uniform 240;
  }

  outlet_
  {
    type        inletOutlet;
    inletValue  uniform 100;
    value       uniform 100;
  }

  axis
  {
    type        symmetryPlane;
  }

  wall
  {
    type        inletOutlet;
    inletValue  uniform 300;
    value       uniform 300;
  }

  frontAndBackPlanes
  {
    type        empty;
  }
}
// *****

```

Figure V-10: page de température T

- **fichier system**

Dans le fichier system on trouvera les pages (blockMeshDict, controlDict, fvSchemes, fvSolution).

- **blockMeshDict** : contient les noms des arrêtes de la tuyère avec ses dimensionnements

```

Fichier : /home/chaimaa/OpenFOAM/chaimaa...run/galbl/system/blockMeshDict 2
-----
/*
 * OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
 * Website: https://openfoam.org
 * Version: 8
 */
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  object       blockMeshDict;
}
// *****

convertToMeters 1;

vertices
(
  (-0.15242 0 -0.005)
  ( 0 0 -0.005)
  ( 0.3048 0.081670913853 -0.005)
  (-0.15242 0.1524 -0.005)
  ( 0 0.1524 -0.005)
  ( 0.3048 0.1524 -0.005)

  (-0.15242 0 0.005)
  ( 0 0 0.005)
  ( 0.3048 0.081670913853 0.005)
  (-0.15242 0.1524 0.005)
  ( 0 0.1524 0.005)
  ( 0.3048 0.1524 0.005)
);

blocks
(
  hex (0 1 4 3 6 7 10 9) (40 40 1) simpleGrading (1 1 1)
  hex (1 2 5 4 7 8 11 10) (80 40 1) simpleGrading (1 1 1)
);

edges
(
);

boundary
(
  inlet
  {
    type patch;
    faces
    (
      (0 6 9 3)
    );
  }
  outlet
  {
    type patch;
    faces
    (
      (2 5 11 8)
    );
  }
  bottom
  {

```

Figure V-11: page de blockMesh

- **controlDict** : contient le temps de départ de la simulation et le temps de la fin de la simulation avec le pas du temps comme dans notre cas (temps de départ = 0s , temps de fin = 0.3s , le pas du temps = 0.0001 , writeInterval = 20 (it mean after 20 time step folder will be generates) , maxCo= 0.5 (it's current Number of Stability we put only between [0.5 – 1]) les autres valeurs pris par default.

```

Field
Operation
And
Manipulation
OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
Website: https://openfoam.org
Version: 8

FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       controlDict;
}
// .....

application      rhoPimpleFoam;

//startFrom      startTime;
startFrom        latestTime;

startTime        0;

stopAt           endTime;

endTime          1.3;

deltaT           0.0001;

writeControl     adjustableRunTime;//timeStep;

writeInterval    0.01;//20;

purgeWrite       0;//5;

writeFormat      ascii;

writePrecision   6;

writeCompression off;

timeFormat       general;

timePrecision    6;

runTimeModifiable true;

adjustTimeStep   yes;

maxCo            0.9;//0.5;

//maxDeltaT     1e-06;
functions
{
  #includeFunc MachNo
  #includeFunc residuals
}

```

Figure V-12: page de cotrolDict

- **fvSchemes** : contient les variables à calculer.


```

Fichier : /home/chaimaa/OpenFOAM/chaimaa-9/run/galbl/system/fvSolution
Page 1 sur 1

/*-----* C++ *-----*/
//
// \ V V V /
//  F i e l d      |   OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
//  O p e r a t i o n  |   Website:  https://openfoam.org
//  A n d           |   Version: 6
//  M a n i p u l a t i o n
//-----*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       fvSolution;
}
// ***** //

solvers
{
  "rho.*"
  {
    solver      diagonal;
  }

  "p.*"
  {
    solver      smoothSolver;
    smoother    symGaussSeidel;
    tolerance   1e-08;
    relTol      0;
  }

  "(U|e|R).*"
  {
    $p;
    tolerance   1e-05;
  }

  "(k|epsilon).*"
  {
    $p;
    tolerance   1e-08;
  }
}

PIMPLE
{
  transonic yes;
  nOuterCorrectors 2;
  nCorrectors 1;
  nNonOrthogonalCorrectors 0;
}

// ***** //

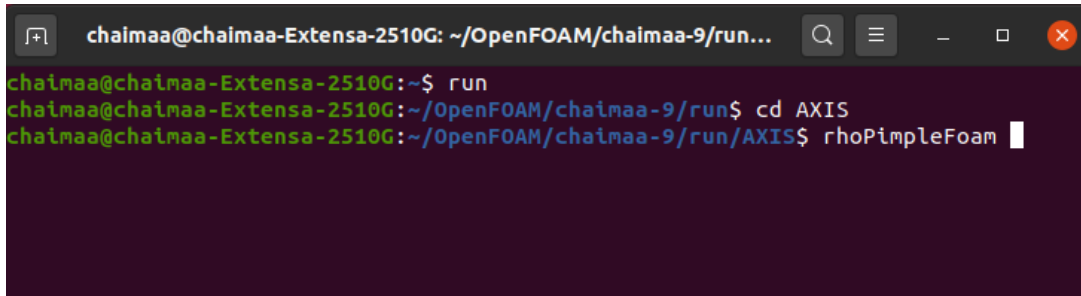
```

Figure V-14: page de fvSolution

- ❖ On a ajouté dans cette page dans la ligne 48 transonic yes ; car c'est un écoulement transitoire supersonique d'un gaz compressible.
- ✓ Transitoire : c'est-à-dire écoulement ou bien cette simulation ne dure pas longtemps qu'elle se passe dans une fraction de seconde.
- ✓ Supersonique : c'est-à-dire que le nombre de mach dépasse 1 (nombre de mach dépasse la vitesse du son) comme le cas de notre tuyère à la sortie « outlet » mach = 3 Le fluide utilise dans la simulation c'est un gaz idéal parfait donc il est tout à fait compressible.

V.2.3 Lancement du calcul

D'après qu'on a fait toutes ces modifications on lance le calcul par taper les commandes suivant sur terminal.

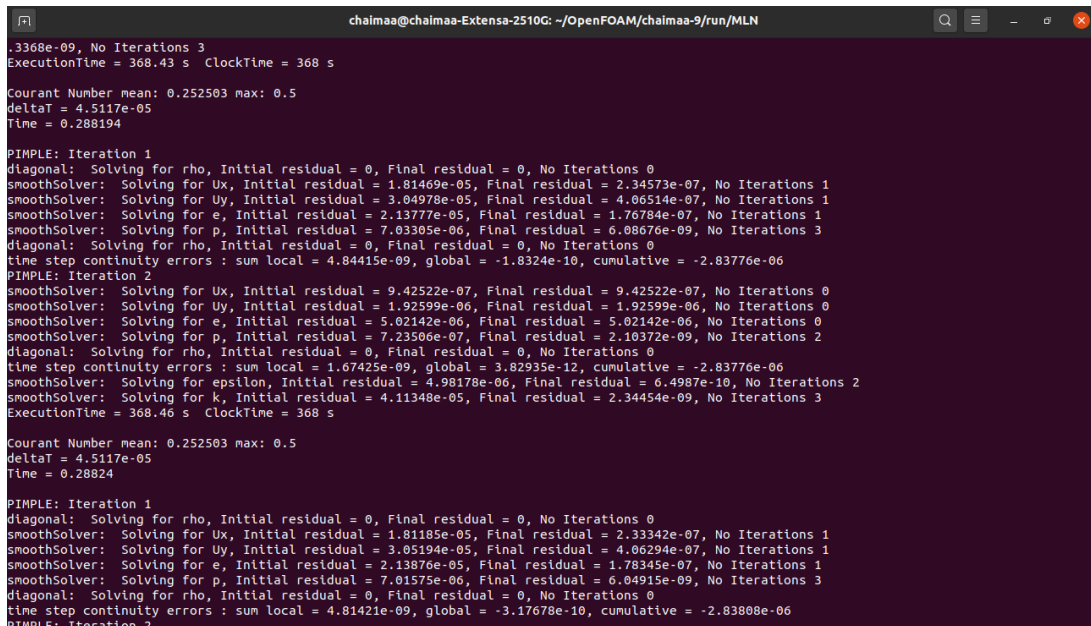


```

chaimaa@chaimaa-Extensa-2510G: ~/OpenFOAM/chaimaa-9/run...
chaimaa@chaimaa-Extensa-2510G:~$ run
chaimaa@chaimaa-Extensa-2510G:~/OpenFOAM/chaimaa-9/run$ cd AXIS
chaimaa@chaimaa-Extensa-2510G:~/OpenFOAM/chaimaa-9/run/AXIS$ rhoPimpleFoam

```

Figure V-15: commandes utilisés sur le terminal



```

.3368e-09, No Iterations 3
ExecutionTime = 368.43 s  ClockTime = 368 s

Courant Number mean: 0.252503 max: 0.5
deltaT = 4.5117e-05
Time = 0.288194

PIMPLE: Iteration 1
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
smoothSolver: Solving for Ux, Initial residual = 1.81469e-05, Final residual = 2.34573e-07, No Iterations 1
smoothSolver: Solving for Uy, Initial residual = 3.04978e-05, Final residual = 4.06514e-07, No Iterations 1
smoothSolver: Solving for e, Initial residual = 2.13777e-05, Final residual = 1.76784e-07, No Iterations 1
smoothSolver: Solving for p, Initial residual = 7.03305e-06, Final residual = 6.08676e-09, No Iterations 3
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
time step continuity errors : sum local = 4.84415e-09, global = -1.8324e-10, cumulative = -2.83776e-06
PIMPLE: Iteration 2
smoothSolver: Solving for Ux, Initial residual = 9.42522e-07, Final residual = 9.42522e-07, No Iterations 0
smoothSolver: Solving for Uy, Initial residual = 1.92599e-06, Final residual = 1.92599e-06, No Iterations 0
smoothSolver: Solving for e, Initial residual = 5.02142e-06, Final residual = 5.02142e-06, No Iterations 0
smoothSolver: Solving for p, Initial residual = 7.23506e-07, Final residual = 2.10372e-09, No Iterations 2
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
time step continuity errors : sum local = 1.67425e-09, global = 3.82935e-12, cumulative = -2.83776e-06
smoothSolver: Solving for epsilon, Initial residual = 4.98178e-06, Final residual = 6.4987e-10, No Iterations 2
smoothSolver: Solving for k, Initial residual = 4.11348e-05, Final residual = 2.34454e-09, No Iterations 3
ExecutionTime = 368.46 s  ClockTime = 368 s

Courant Number mean: 0.252503 max: 0.5
deltaT = 4.5117e-05
Time = 0.28824

PIMPLE: Iteration 1
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
smoothSolver: Solving for Ux, Initial residual = 1.81185e-05, Final residual = 2.33342e-07, No Iterations 1
smoothSolver: Solving for Uy, Initial residual = 3.05194e-05, Final residual = 4.06294e-07, No Iterations 1
smoothSolver: Solving for e, Initial residual = 2.13876e-05, Final residual = 1.78345e-07, No Iterations 1
smoothSolver: Solving for p, Initial residual = 7.01575e-06, Final residual = 6.04915e-09, No Iterations 3
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
time step continuity errors : sum local = 4.81421e-09, global = -3.17678e-10, cumulative = -2.83808e-06
PIMPLE: Iteration 2

```

Figure V-16: calcul de simulation

À la fin de calcul aura création de tous les fichiers de calcul de simulation d'après chaque pas du temps comme on peut voir sur la figure suivante.



Figure V-17: dossiers créés à la fin de calcul

Lorsque nous ouvrons l'un des fichiers créés après chaque pas du temps.



Figure V-18:Les pages des variables calculés

V.3. Tuyère a détente centré circulaire dans Y+

V.3.1. Importation du maillage

Pour lancer notre simulation, on doit premièrement à importe un maillage de notre géométrie qui est réaliser dans Ansys Fluent dans un fichier de type « fichier d'entrée fluent (*.msh) nommée nvgp.

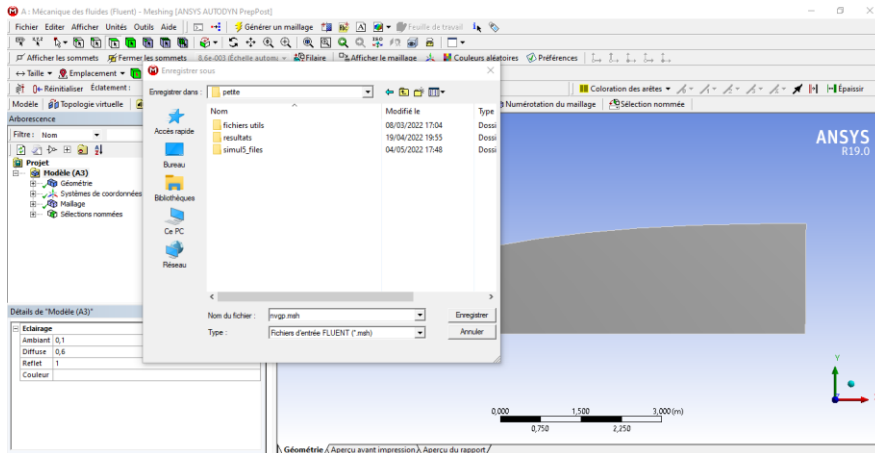


Figure V-19: Importation de maillage

V.3.2. Le choix de solveur

Le solveur utilisé pour la simulation de la tuyère asymétrie est le même solveur utilisé dans la première simulation, est rhoPimpleFoam. il est utilisé pour les écoulements transitoires supersoniques d'un gaz compressible.

➤ Architecture du cas

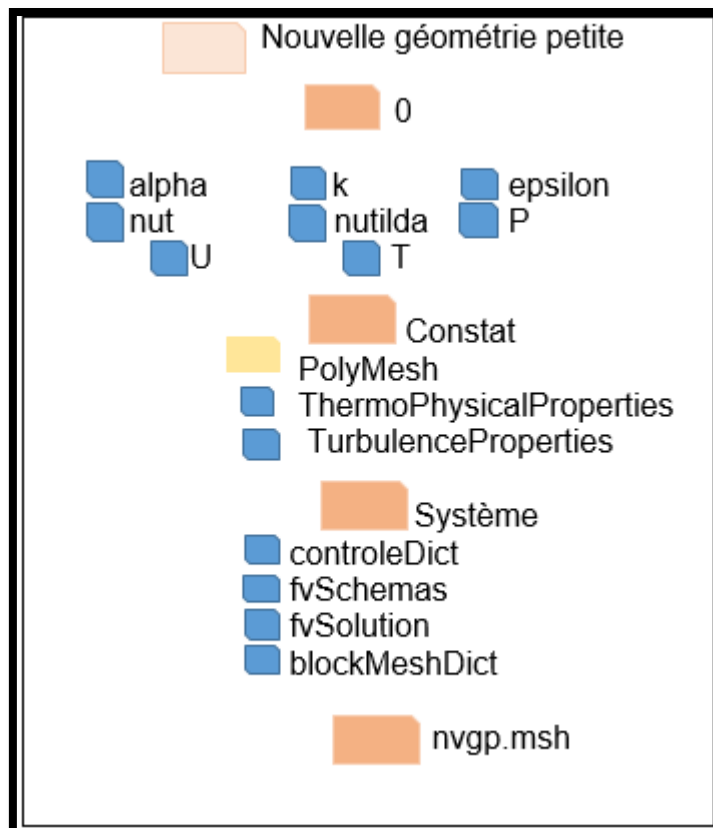


Figure V-20: Structure de cas

- Fichier constant

On suit les mêmes étapes pour la création de fichier polyMesh, et les mêmes propriétés de fluide (CP, la viscosité).

Ensuite, on a la présentation de maillage dans ParaView.

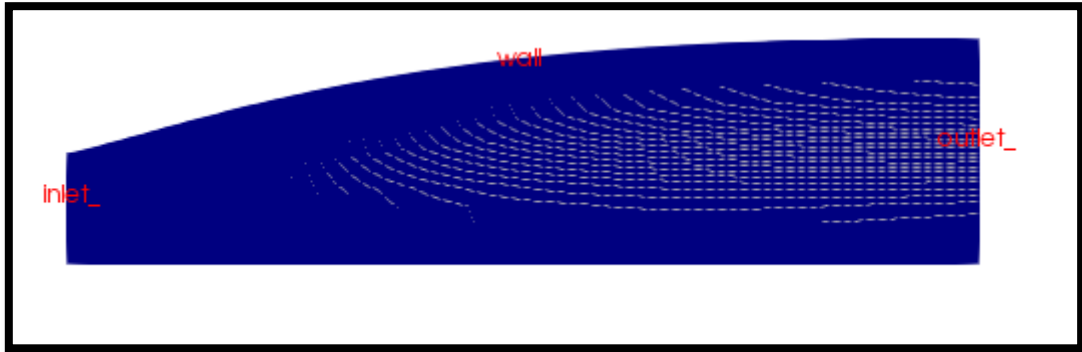


Figure V-21: maillage finale

- Fichier 0 (conditions aux limites)

On effectue un changement des noms des parois de notre géométrie dans le fichier polyMesh comme la suite :

- Inlet: patch
- Outlet: patch
- Wall: Wall
- FrontAndBackPlanes : empty

Puis dans le fichier 0 on impose nos conditions aux limites

- U
- P
- T

Chaque un dans son fichier correspondant, et on garde les paramètres de turbulence par défaut.


```

Fichier : /home/chaimaa/OpenFOAM/chaimaa-9/run/AXIS/0/T Page 1 sur 1
/*-----*- C++ -*-----*/
\ \ \ Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  O peration | Website: https://openfoam.org
  A nd Manipulation | Version: 8
/*-----*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        volScalarField;
  object       T;
}
// *****

dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];
internalField   uniform 240;
boundaryField
{
  inlet_
  {
    type        fixedValue;
    value       uniform 330;
  }

  outlet_
  {
    type        inletOutlet;
    inletValue  uniform 100;
    value       uniform 100;
  }

  axis
  {
    type        symmetryPlane;
  }

  wall
  {
    type        inletOutlet;
    inletValue  uniform 300;
    value       uniform 300;
  }

  frontAndBackPlanes
  {
    type        empty;
  }
}
// *****

```

Figure V-24: page de température T

- Le fichier système
- ❖ Le temps de départ
- Le temps de fin : 0.003
- Le pas de temps : 1e-08
- writeInterval : 2000
- maxCo : 0.5

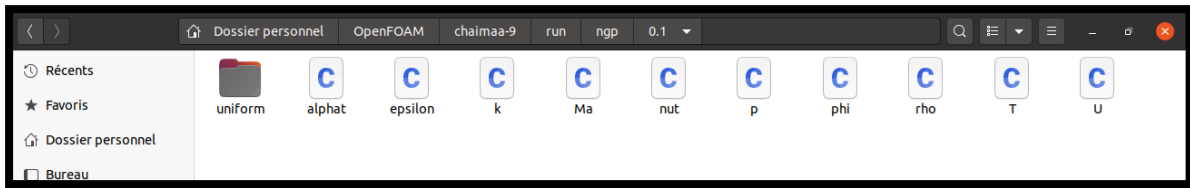


Figure V-26: fichiers de simulation

V.4. tuyère à détente centré circulaire dans Y+ après correction

V.4.1. importation de maillage

Il s'agit d'une importation de maillage de notre tuyère réalisé dans ansys-fluent dans un fichier de type « .msh ».

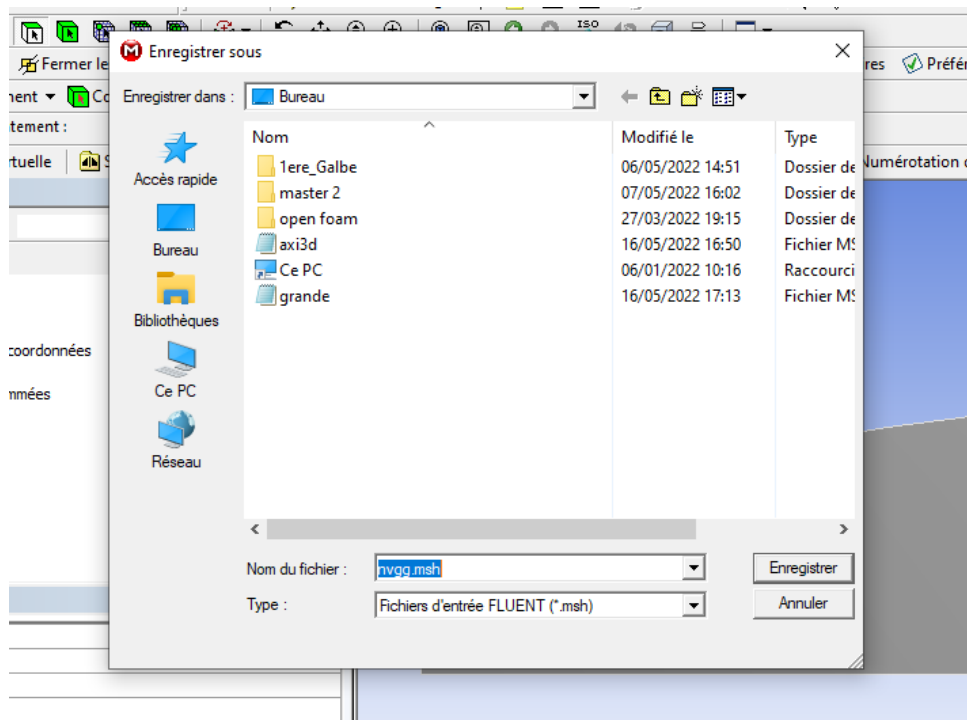


Figure V-27: importation de maillage

V.4.2. Choix de solveur

Comme les cas précédents on va choisir le solveur **rhoPimpleFoam**.

➤ Architecture de cas

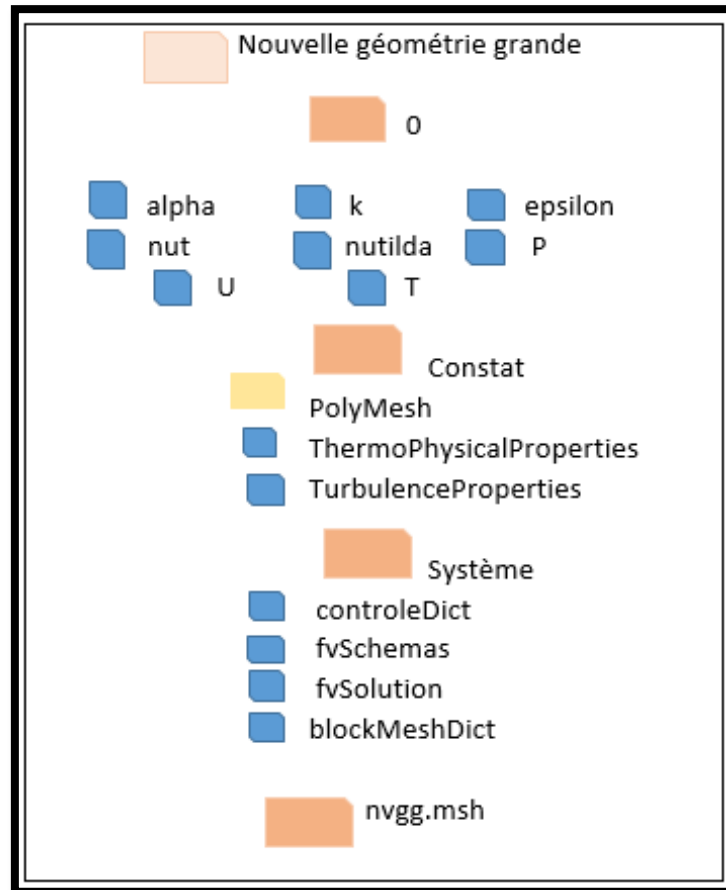


Figure V-28: Structure de cas

- **Fichier costant**

De même façon utilisée dans les cas précédents on va créer le fichier polymesh.

La figure ci-dessous représente le maillage final dans la plateforme d'OpenFOAM.

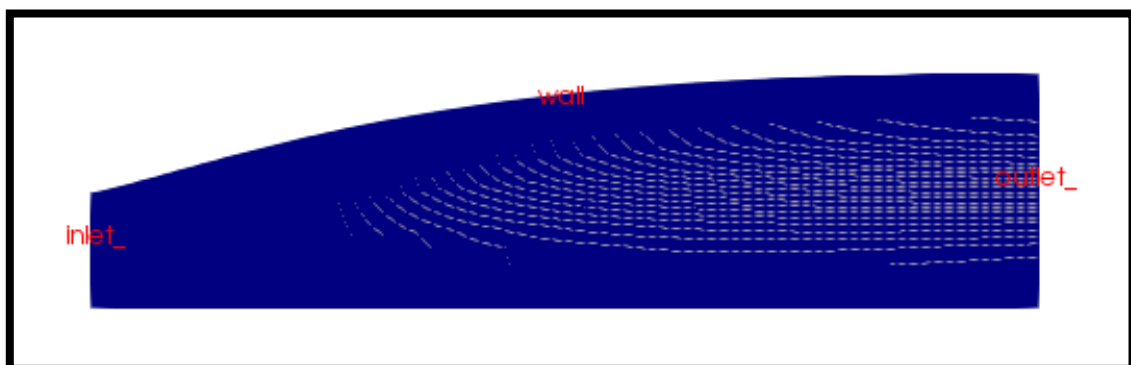


Figure V-29: maillage finale


```

Fichier : /home/chaimaa/OpenFOAM/chaimaa-9/run/ngg/0/p Page 1 sur 1
/*-----* C++ -*-----*/
//
// OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
// Website: https://openfoam.org
// Version: 8
//-----*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        volScalarField;
  object       p;
}
// ..... //
dimensions     [1 -1 -2 0 0 0 0];
internalField  uniform 100000;
boundaryField
{
  inlet_
  {
    type        fixedValue;
    value       uniform 500000;
  }

  outlet_
  {
    type        zeroGradient;
  }

  axis
  {
    type        symmetryPlane;
  }

  wall
  {
    type        zeroGradient;
  }

  frontAndBackPlanes
  {
    type        empty;
  }
}
// ..... //

```

Figure V-31: Page de pression P

```

Fichier : /home/chaimaa/OpenFOAM/chaimaa-9/run/ngc1/0/T Page 1 sur 1
/*-----* C++ -*-----*/
//
// OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
// Website: https://openfoam.org
// Version: 8
//-----*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        volScalarField;
  object       T;
}
// ..... //
dimensions     [0 0 0 1 0 0 0];
internalField  uniform 240;
boundaryField
{
  inlet_
  {
    type        fixedValue;
    value       uniform 240;
  }

  outlet_
  {
    type        inletOutlet;
    inletValue  uniform 300;
    value       uniform 100;
  }

  axis
  {
    type        symmetryPlane;
  }

  wall
  {
    type        inletOutlet;
    inletValue  uniform 300;
    value       uniform 300;
  }

  frontAndBackPlanes
  {
    type        empty;
  }
}
// ..... //

```

Figure V-32: page de température T

- **Fichier system**

Les paramètres de simulation, comme le pas de temps et le temps de départ et le temps de fin de calcul sont mentionnés dans les fichiers de dossier system.

Ils ont représenté dans les figures ci-dessous.

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       controlDict;
}
// ***** //

application     rhoPimpleFoam;

//startFrom     startTime;
startFrom       latestTime;

startTime       0;

stopAt          endTime;

endTime         1.3;

deltaT          0.0001;

writeControl    adjustableRunTime;//timeStep;

writeInterval   0.01;//20;

purgewrite     0;//5;

writeFormat     ascii;

writePrecision  6;

writeCompression off;

timeFormat      general;

timePrecision   6;

runTimeModifiable true;

adjustTimeStep  yes;

maxCo           0.9;//0.5;

//maxDeltaT     1e-06;
functions
{
    #includeFunc MachNo
    #includeFunc residuals
}
}
```

Figure V-33: page de réglage controlDict

V.4.3. Lancement de calcul

Par la commande « rhoPimpleFoam » tapée sur le terminal nous avons lancé notre simulation.

La figure ci-dessous représente les fichiers créés après calcul.

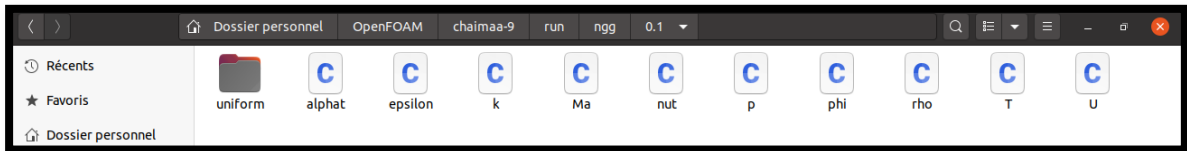


Figure V-34: fichiers créés à la fin de simulation

CHAPITRE VI

RESULTATS ET

INTERPRETATIONS

Résumé

Ce chapitre sera consacré à la présentation et interprétation des résultats de simulation appliquée sur une tuyère à détente centré pour deux profils différentes axisymétrique et asymétrie.

Aperçu

CHAPITRE VI

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

VI -1. Introduction

VI -1.Résultats sur la tuyère à détente centré axisymétrique

VI -1-1.Variation des paramètres de l'écoulement le long de la tuyère

VI -2.Résultats sur la tuyère à détente centré circulaire placée dans l'axe Y+

VI -2-1.Variation de paramètres de l'écoulement dans la tuyère

VI-3.Résultats sur la tuyère à détente centré asymétrique circulaire placée dans l'axe Y+ après correction

VI-3-1.la variation des paramètres d'écoulement dans la tuyère

CHAPITRE VI : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

VI -1. Introduction

Dans ce dernier chapitre, on présentera les résultats issus de la simulation numérique élaborés sur une tuyère à détente centrée en utilisant deux logiciels de simulation différents en l'occurrence Fluent-ANSYS et OpenFOAM. Ce chapitre est divisé en deux parties. La première comporte les résultats obtenus sur la tuyère à détente centrée axisymétrique, quand à la deuxième est consacrée aux résultats de la tuyère à détente centrée asymétrique.

Les résultats seront présentés sous forme de courbes et de contours de différents paramètres (pression, température et nombre de mach) le long de la tuyère.

A côté des résultats issue de la simulation nous avons présenté des résultats numériques obtenus d'un programme fortran et cela pour valider nos résultats obtenus.

VI -2.Résultats sur la tuyère à détente centrée axisymétrique

VI -2-1.Variation des paramètres de l'écoulement le long de la tuyère

a).Variation du nombre de mach

Les figure VI.1 et VI.2 illustrent les contours iso mach dans la tuyère de base obtenus respectivement sur Fluent et OpenFOAM pour un modèle Gaz parfait. On constate que ce nombre de Mach augmente rapidement au niveau de la région du col pour jusqu'à une valeur.

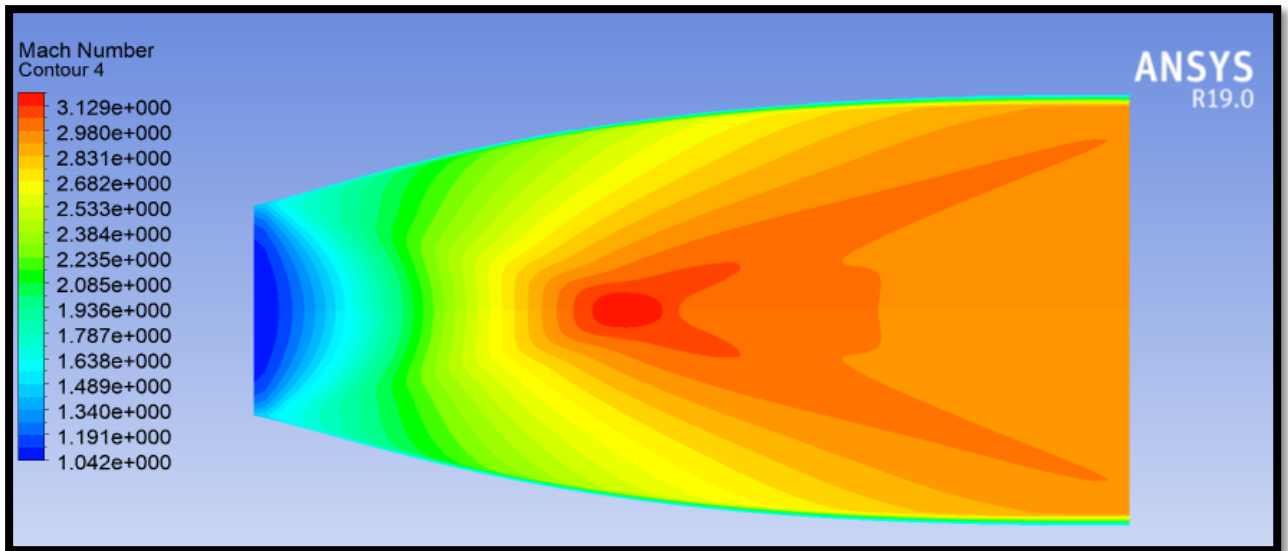


Figure VI-1: Le nombre de mach sur Ansys

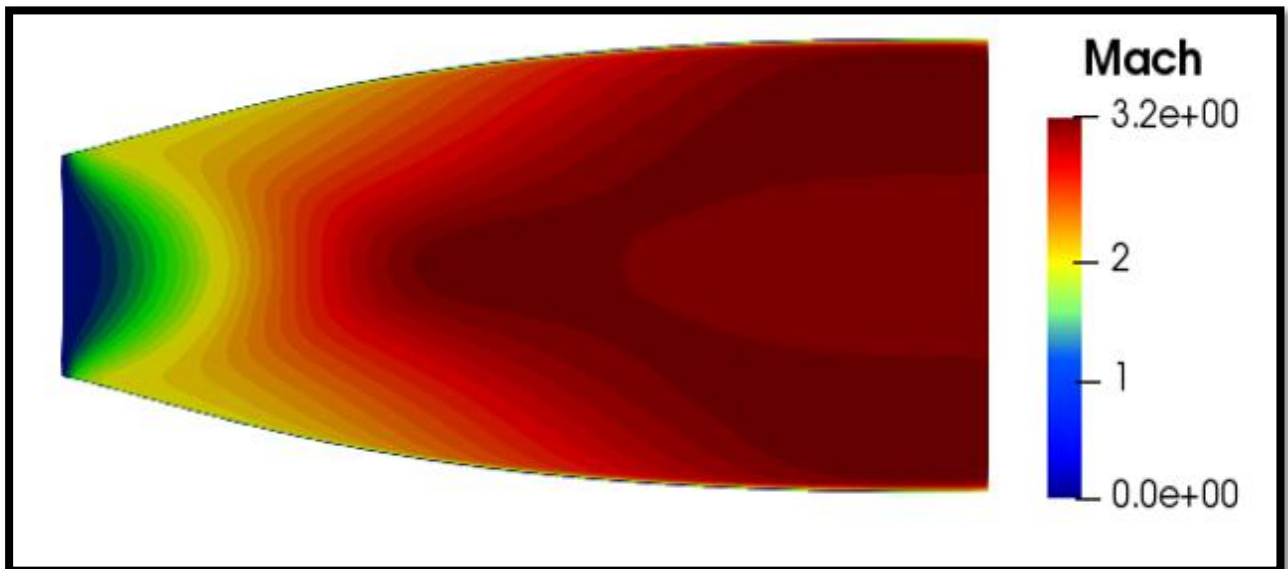


Figure VI-2 : Le nombre de mach sur OpenFOAM

Dans ces deux figures en remarque que l'évolution de nombre de mach est croissante de l'entrée de la tuyère ou $M=1.2$ jusque au partie divergente de la tuyère ou $M=3$ pour les deux simulations Ansys et OPENFOAM. Ces valeurs sont proches aux valeurs obtenues par la méthode des caractéristiques ou le nombre de mach obtenu à la sortie est 2.9 comme est illustré dans la figure VI.3 et le tableau VI.1.

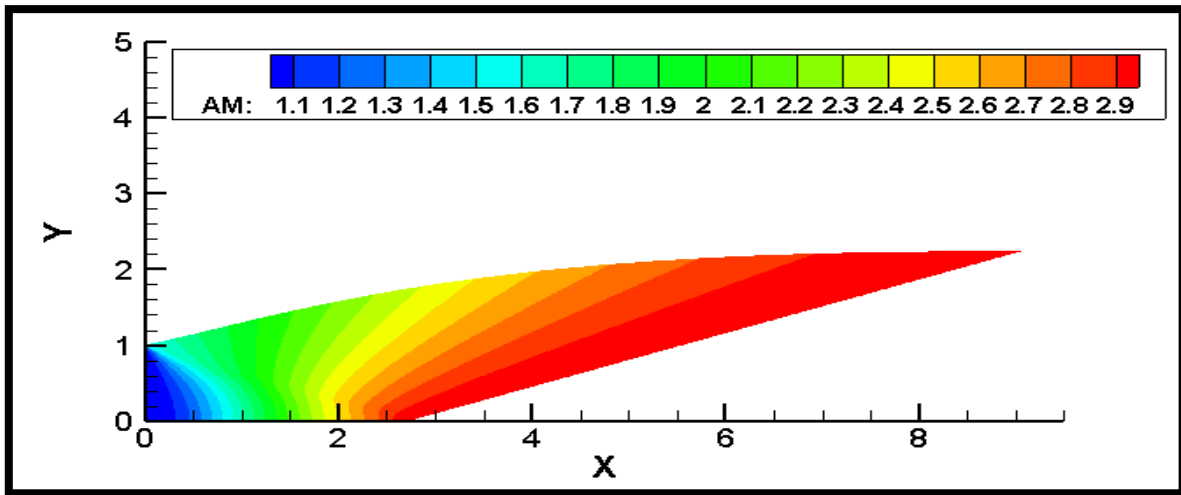


Figure VI-3: Le nombre de mach obtenu numériquement

Tableau VI-1: Les résultats numérique de la tuyère axisymétrique

Ms	As/A*	C _F	C _{masse}	L/y*
3.00	4.2196	0.2967	29.6096	8.3404

Les graphes au-dessus représentent la variation du nombre de mach le long de la paroi et sur l'axe de symétrie de tuyère MLN pour les deux cas de la simulation (Ansys et OPENFOAM) comparativement à ceux obtenus par la méthode des caractéristiques.

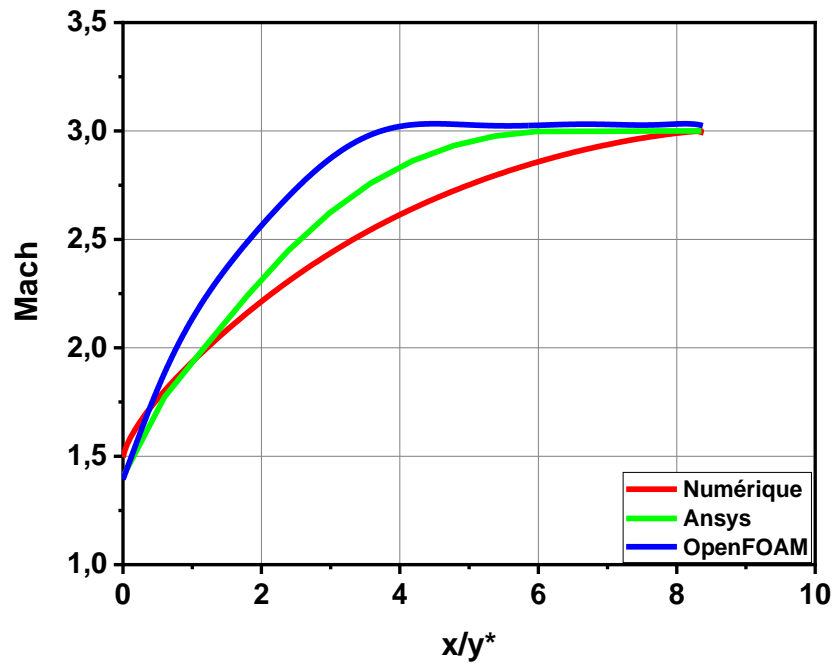


Figure VI-4: Les courbes de nombres de mach le long du contour de la tuyère

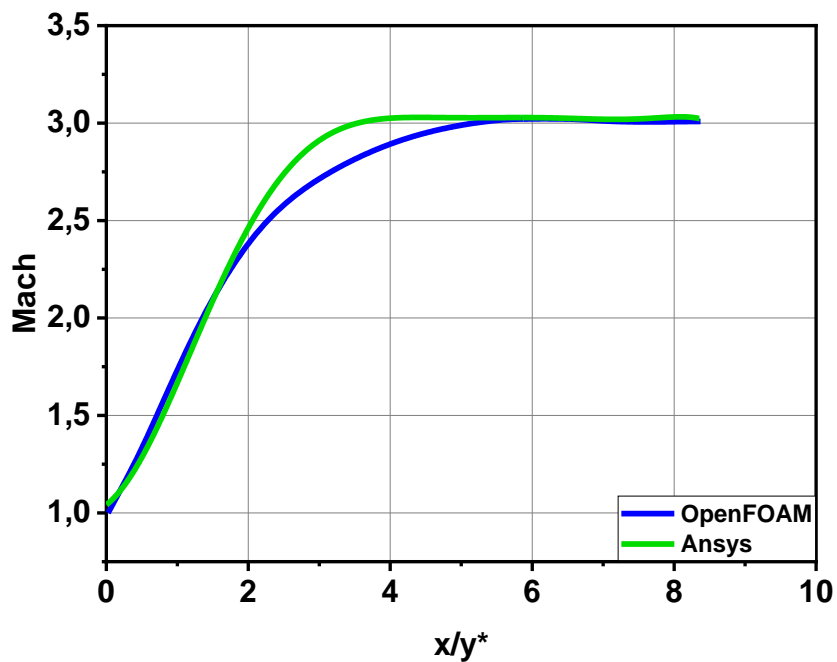


Figure VI-5: Les courbes de nombres de mach le long de l'axe de symétrie

On constate que ce nombre de mach augmente le long de la tuyère. On remarque aussi que l'évolution sur la paroi est plus rapide que l'évolution sur l'axe, ce qui est logique puisqu'on sait bien que la forme du profil vitesse dans une tuyère est de forme parabolique, On remarque aussi que l'augmentation du nombre de mach sur la

paroi au niveau du col est brusque. C'est le but de la conception des tuyères profilées où on atteint des forts gradients au voisinage du col dans la zone d'expansion initiale et on ramène en suite le fluide graduellement jusqu'à la sortie de la tuyère avec une direction axiale. A la sortie de la tuyère le nombre de Mach sur l'axe est supérieur au mach à la paroi à causes des pertes qui sont dues aux frottements du fluide avec la paroi de la tuyère. Sur la figure on remarque que les résultats obtenus par les deux simulations sont très proches mais une différence a été constatée par rapport à ceux obtenus numériquement ce qui est du probablement à la différence d'approche utilisée.

b).variation de la pression

Les figures VI.6 et VI.7 représentent les courbes iso pressions dans la tuyère obtenue pour les deux simulations. Sur ces figures on remarque, l'absence de perturbation ou fluctuation de la pression, ce qui correspond à un écoulement isentropique le long de la partie divergente.

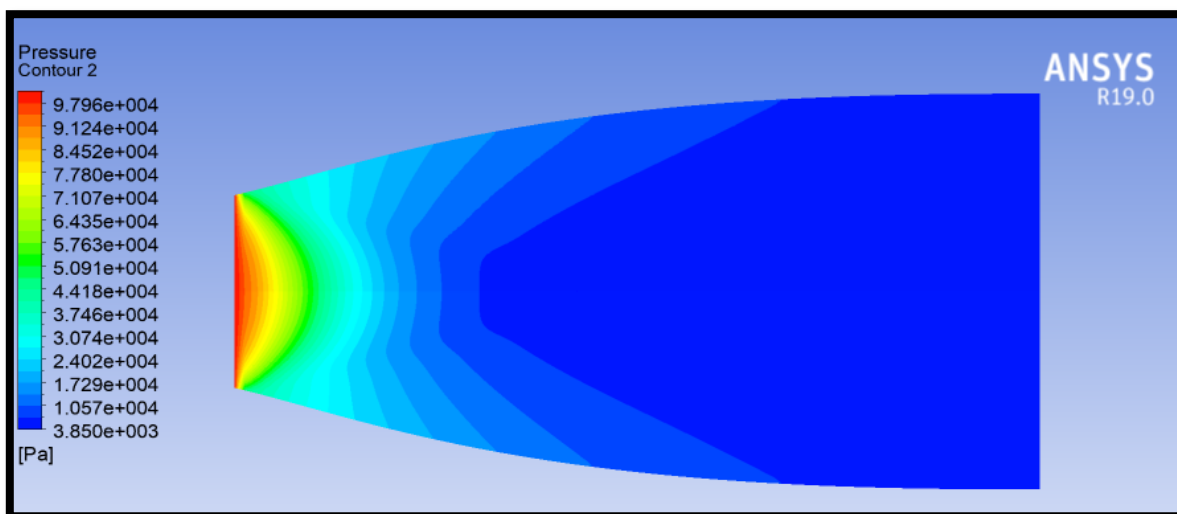


Figure VI-6: La pression sur Ansys

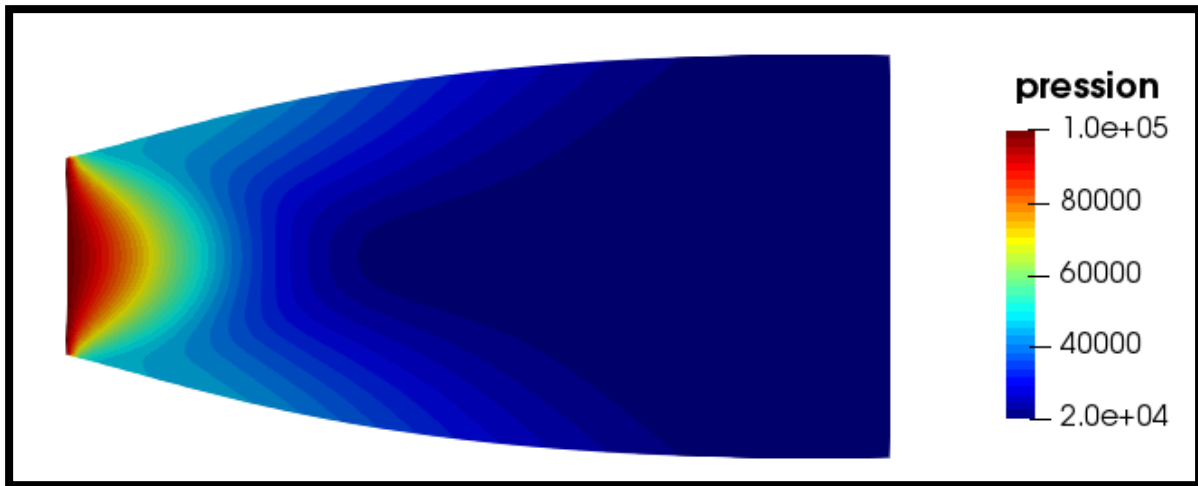


Figure VI-7: La pression sur OpenFOAM

Pour valider nos résultats obtenus par la simulation nous avons comparé avec les résultats obtenus par la méthode des caractéristiques dans la figure VI.8.

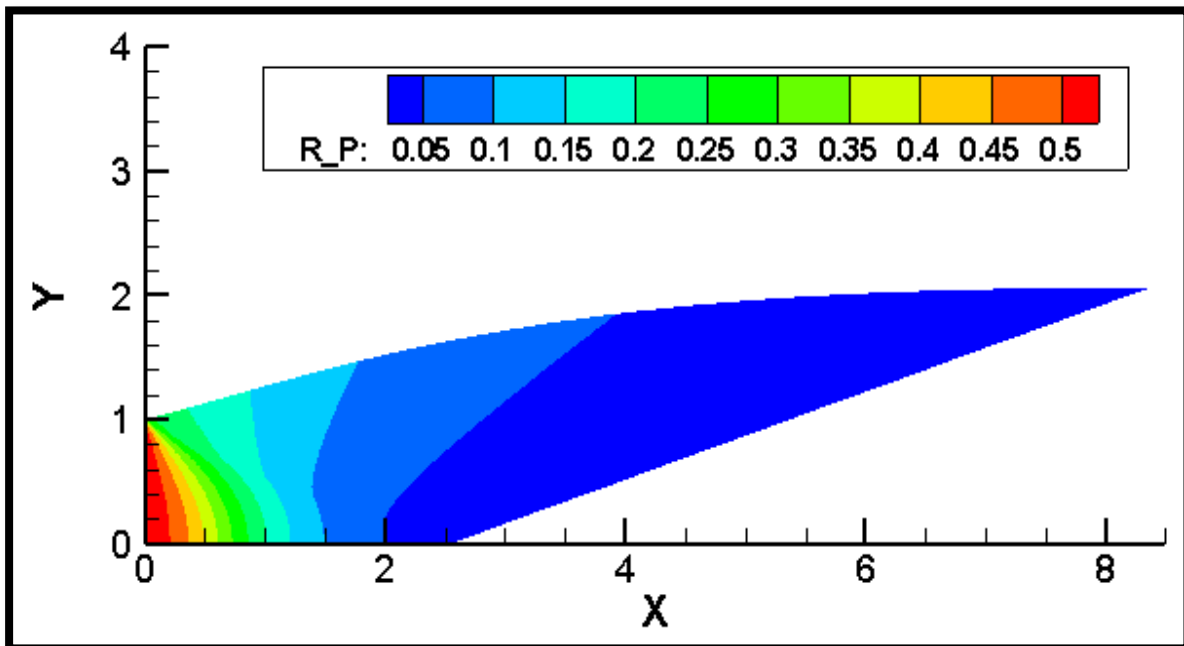


Figure VI-8: La pression obtenue numériquement

Ces résultats sont illustrés sur les figures VI.9 et VI.10 qui représentent l'évolution de cette pression le long de la paroi de la tuyère ainsi le long de l'axe de symétrie. On constate que la pression diminue sur la paroi et l'axe, du col jusqu'à la section de

sortie où elle se rapproche de la valeur de la pression atmosphérique, ce qui est très normale dans notre cas puisque la tuyère est du type adapté.

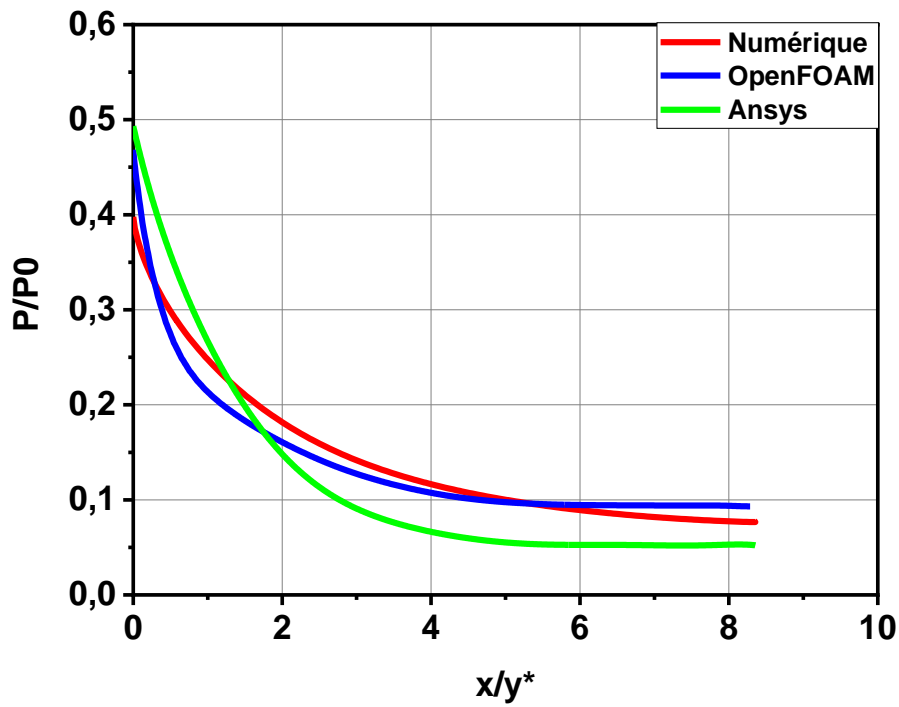


Figure VI-9 : Les courbes de rapport des pressions le long de la paroi de tuyère

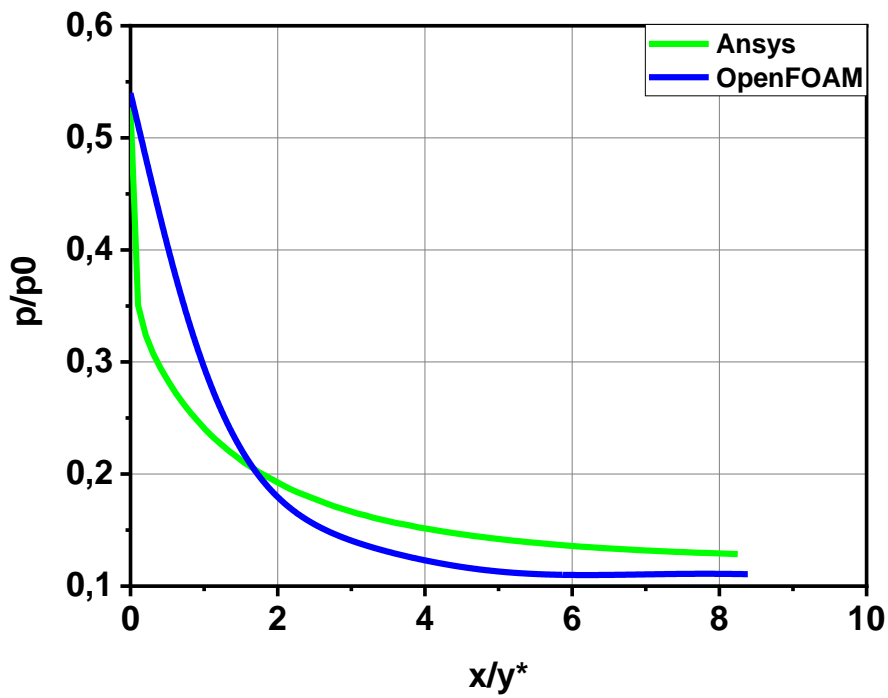


Figure VI-10: Les courbes de rapport des pressions le long de l'axe de symétrie

c).variation de la température

La température c'est un paramètre essentiel dans l'étude d'écoulement dans les tuyères à cause de choix du matériau. Pour cela l'évolution de cette dernière est important et elle est représentée dans les figures VI.11 et VI.12 qui sont obtenues par la simulation Ansys et OPENFOAM plus la figure VI.13 obtenue par le code de calcul Fortran dont la méthode des caractéristiques.

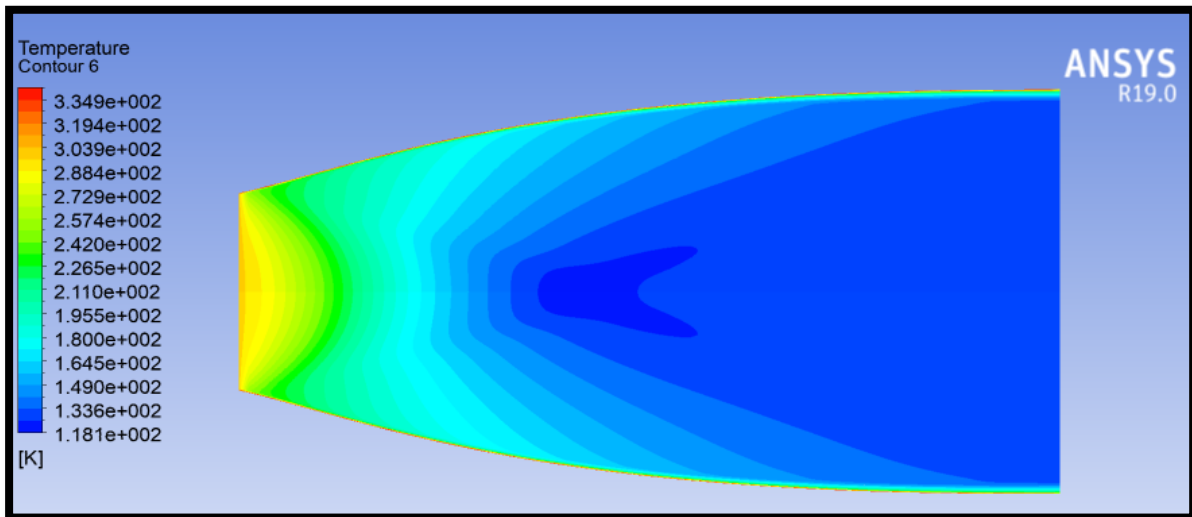


Figure VI-11 : La température sur Ansys

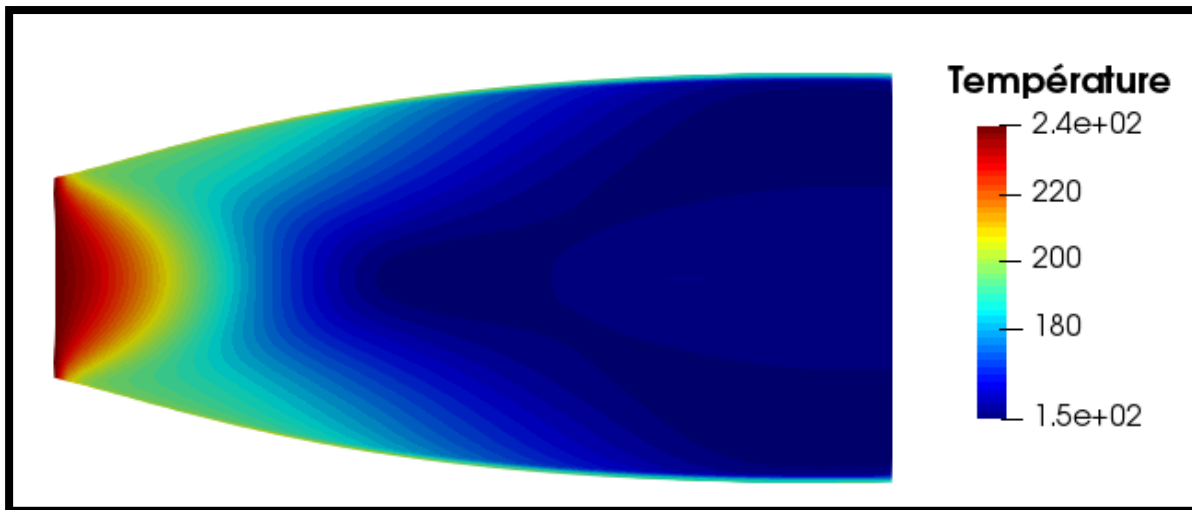


Figure VI-12: La température sur OpenFOAM

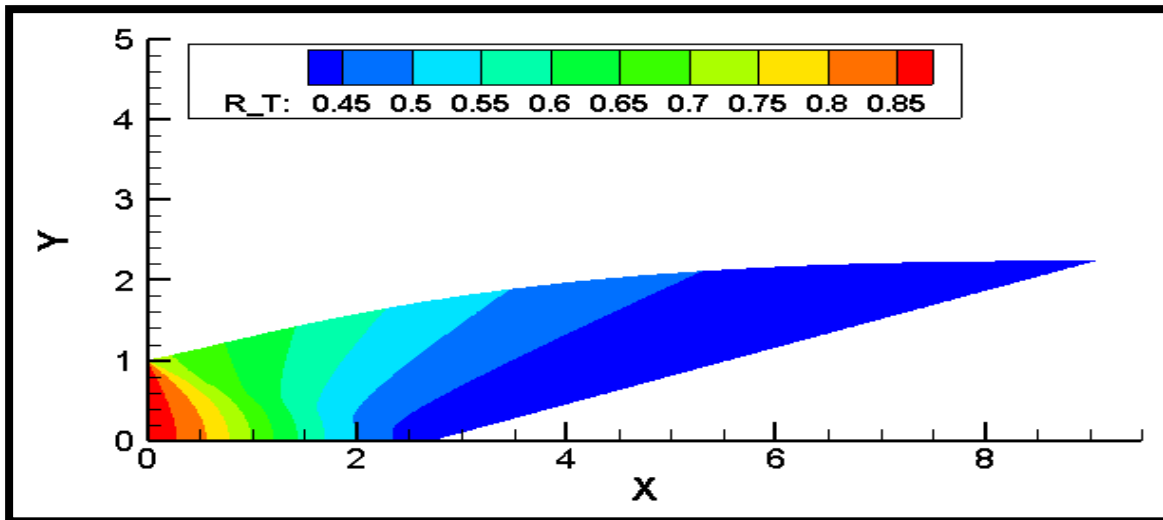


Figure VI-13: La température obtenue numériquement

Puisque l'écoulement est complètement isentropique dans la tuyère, alors l'évolution de la température est proportionnelle à la pression, en se référant à la loi des gaz parfait. C'est ce qu'on observe sur les figures VI.14 et VI.15 puisque la température dans la tuyère diminue d'une manière continue en avançant vers la sortie. Les résultats obtenus sont très proches et la différence est probablement due aux approches utilisées.

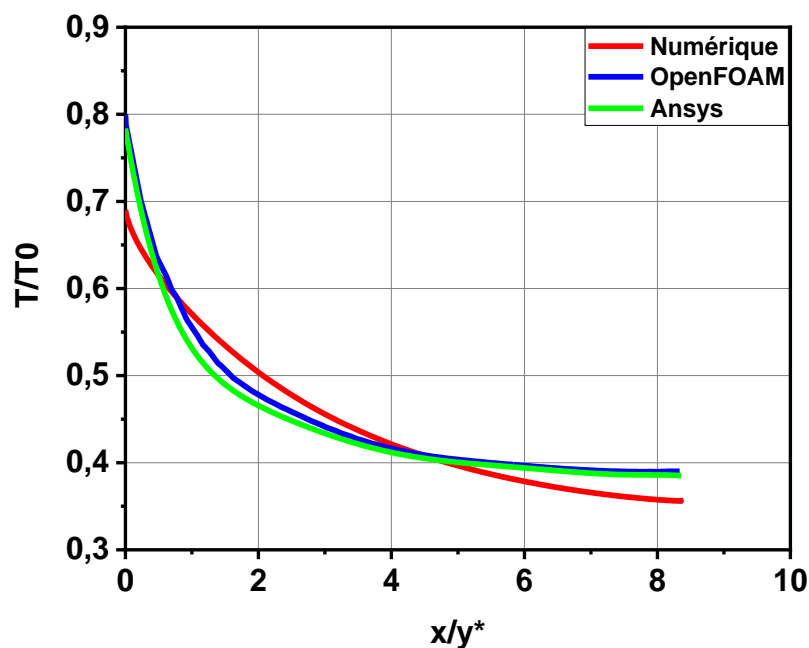


Figure VI-14: Les courbes de rapport des températures le long de la paroi de tuyère

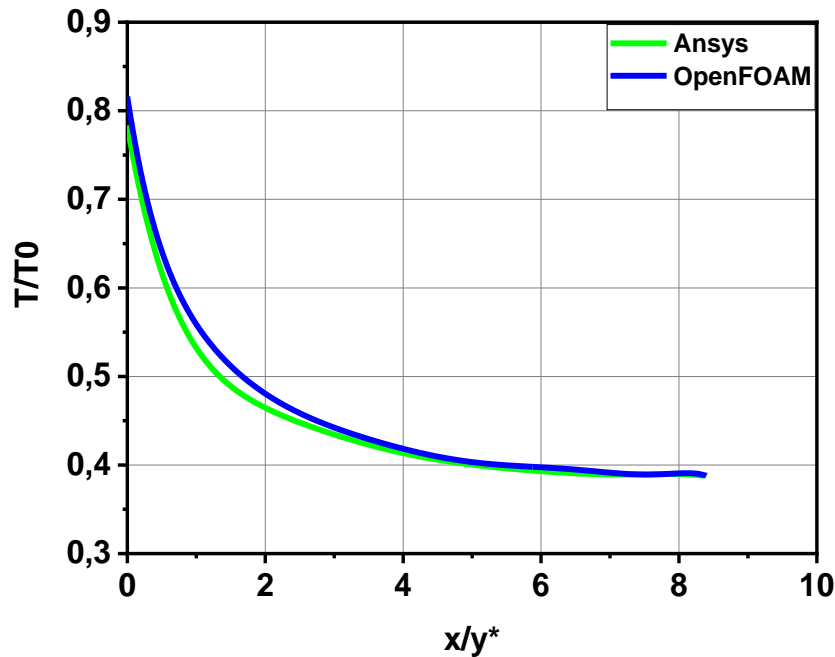


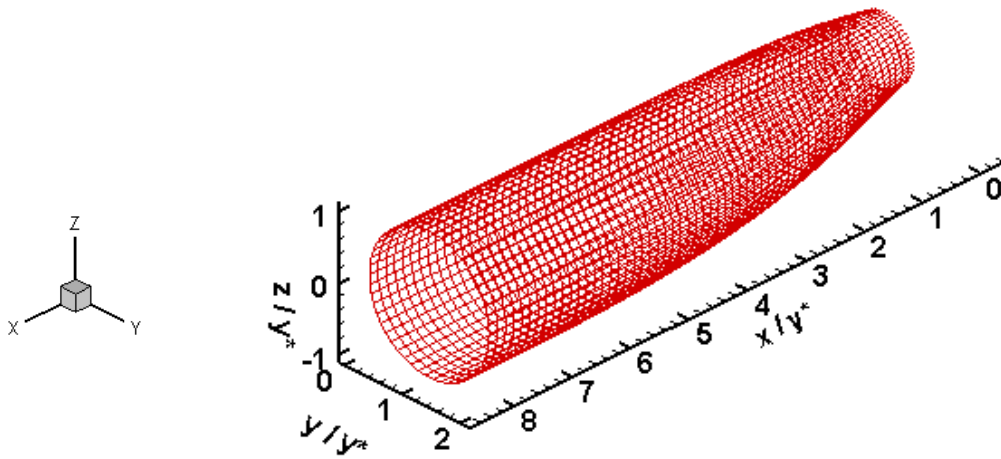
Figure VI-15 : Les courbes de rapport des températures le long de l'axe de symétrie

VI.3. Résultats sur la tuyère à détente centrée circulaire dans Y+

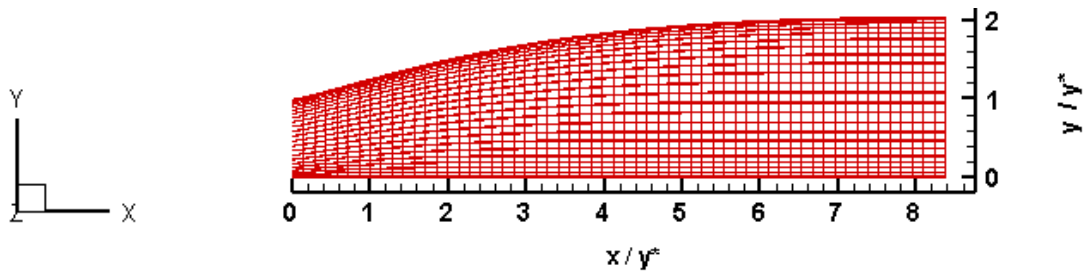
Dans ce paragraphe nous avons présenté notre nouvelle tuyère à partir des résultats obtenus par l'étude numérique.

C'est une tuyère à détente centrée asymétrique circulaire de 8.35 de longueur et de 4.22 comme rapport entre la section au col et la section de sortie sachant que le rayon d'entrée est de 0.5 et le rayon de sortie est de 1 avec un angle d'inclinaison de profil de la paroi Θ_{\max} égale à 15.46° .

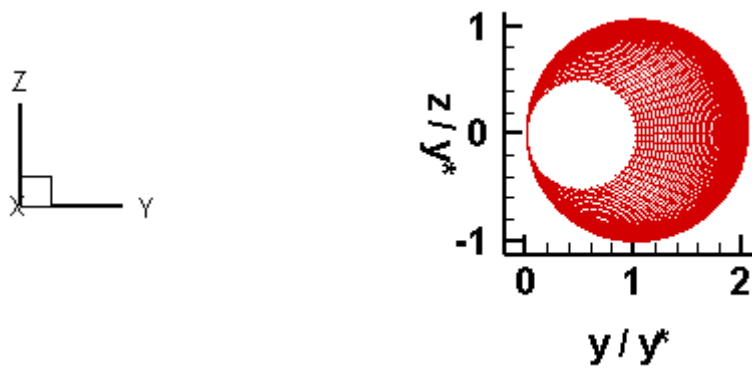
La figure VI.16 de (a-d) représente les différentes configurations de cette nouvelle tuyère sur les axes (x, z), (x, y), (y, z) et (x, y, z).



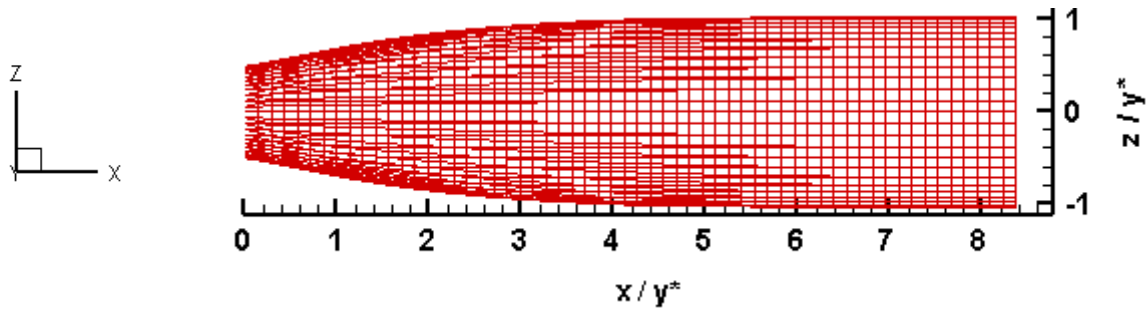
a- la tuyère asymétrique circulaire dans le plan (x, y, z)



b- la tuyère asymétrique circulaire dans le plan (x, y)



c- la tuyère asymétrique circulaire dans le plan (y, z)



d- la tuyère asymétrique circulaire dans le plan (x, z)

Figure VI-16: les différentes configurations de la tuyère asymétrique circulaire dans Y+ pour $Ms=3.00$ et $T_0=300$ k

VI.3-1.Variation de paramètres de l'écoulement dans la tuyère

a).Variation du nombre de mach

Les figures VI.17 et VI.18 présentent respectivement le champ de Mach dans la tuyère reproduit par nos implémenté sous Fluent et OpenFOAM. Dans les deux cas de simulation, l'écoulement épouse parfaitement les parois de la tuyère, ce qui confirme, l'absence de décollement. Le nombre de Mach obtenu à la sortie du la tuyère est 2.3.

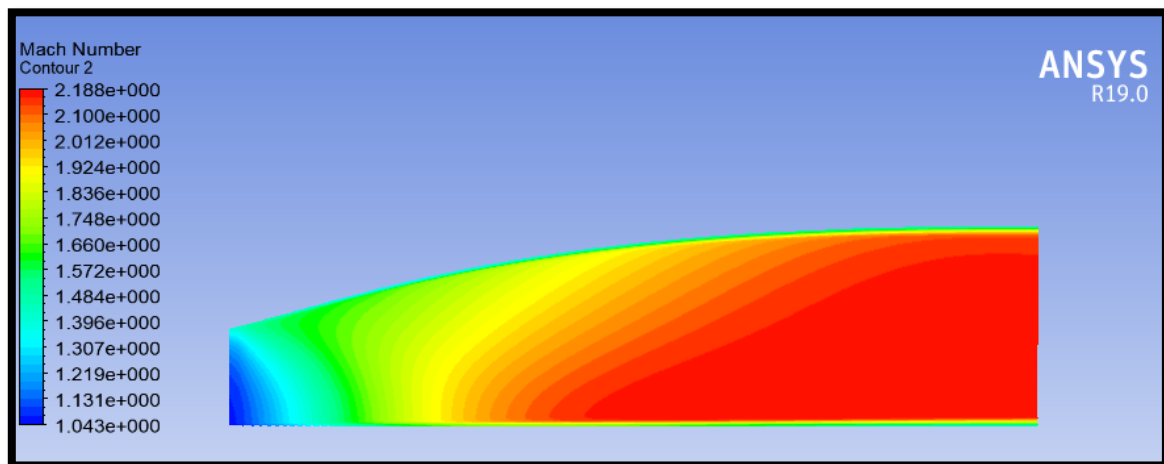


Figure VI-17: Le nombre de mach sur Ansys

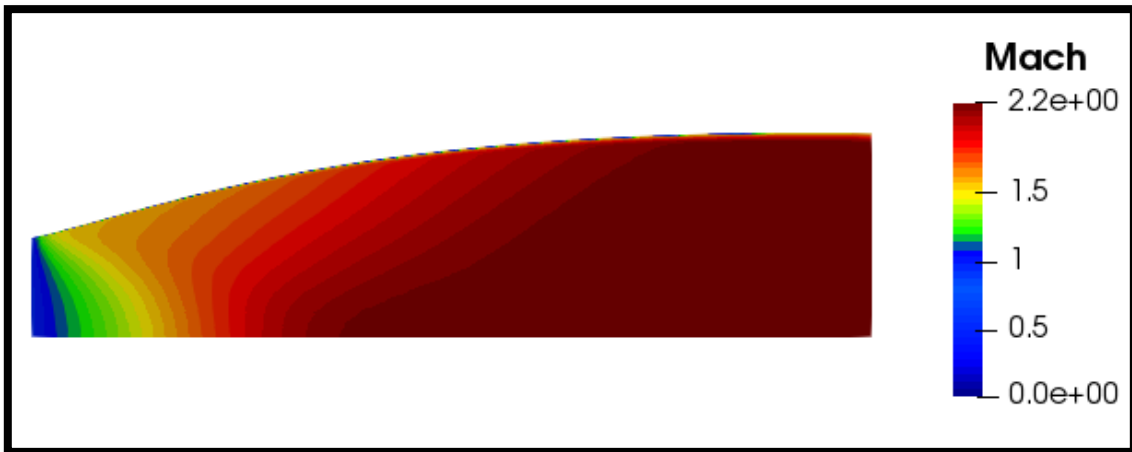


Figure VI-18: Le nombre de mach sur OpenFOAM

Pour valider nos résultats nous avons les comparé avec les résultats qui sont obtenus par la méthode des caractéristiques en utilisant le code de calcul Fortran illustrés dans le tableau VI.2.

Tableau VI-2 : Les résultats numérique de la tuyère circulaire

Ms	As/A*	Cf	Cmasse	L
3.00	4.2196	0.2986	29.6336	8.3404

Les courbes de la figure VI.19 au-dessous réaliser sur Ansys et OpenFOAM représente l'évolution du Nombre de Mach (cas gaz parfait) sur la paroi de la tuyère, telle que la figure VI.20 représente la variation de nombre de mach le long de l'axe de la tuyère. On remarque que le nombre de Mach augmente rapidement dans la zone d'expansion initiale, puis lentement dans la partie divergente qu'il a attendre la valeur de 2.3 à la sortie de la tuyère. Les résultats obtenus par OpenFOAM et fluent ne sont pas confondus comparant avec la courbe qui est obtenue numériquement.

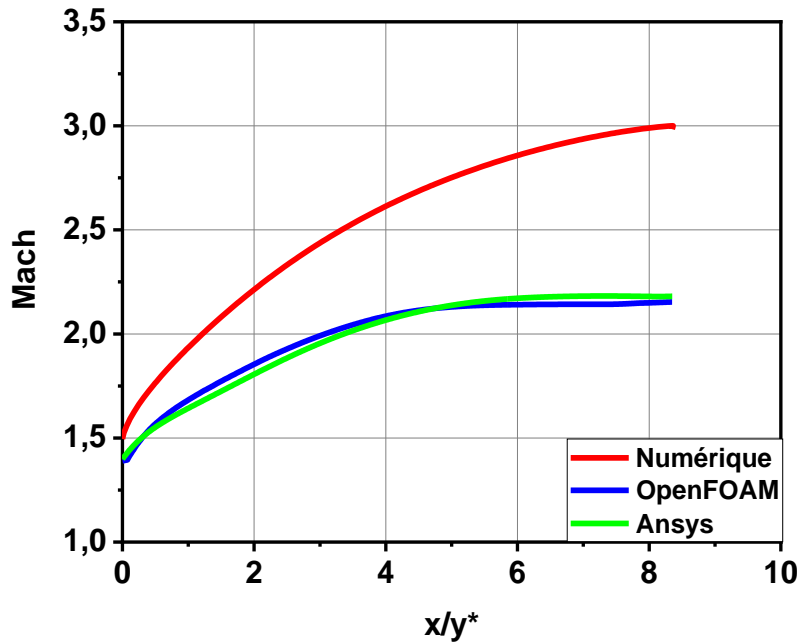


Figure VI-19: Les courbes de nombre de mach le long de la paroi de tuyère

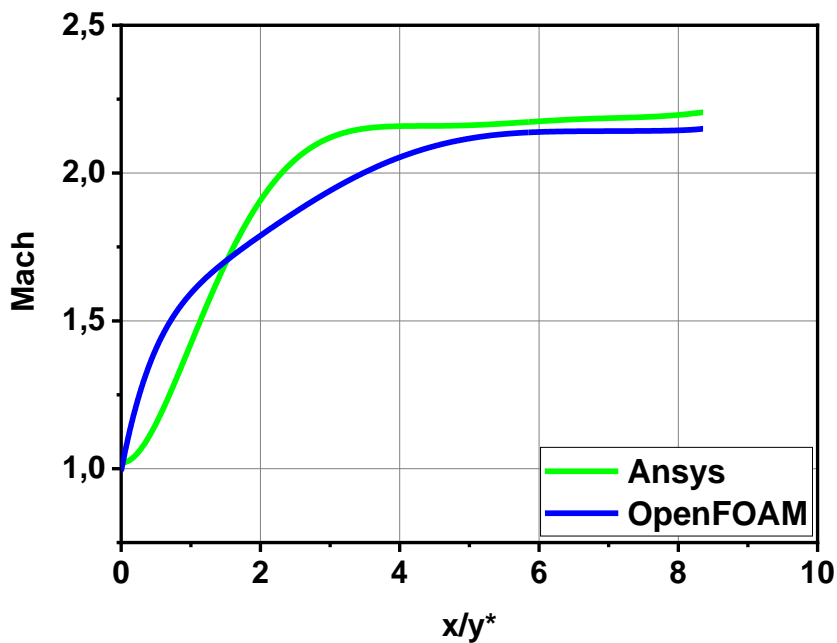


Figure VI-20: Les courbes de nombre de mach le long de l'axe de tuyère

b).Variation de la pression

Les figures VI.21 et VI.22 au-dessous représente à l'aide des deux logiciel Ansys et OpenFOAM le Contour de l'évolution de la Pression Statique sur la paroi de notre tuyère depuis l'entrée jusqu'à la sortie. Le Contour de la Pression Statique évolue

d'une manière décroissante depuis le col (la zone en rouge) jusqu'à la sortie de la tuyère (zone bleu).

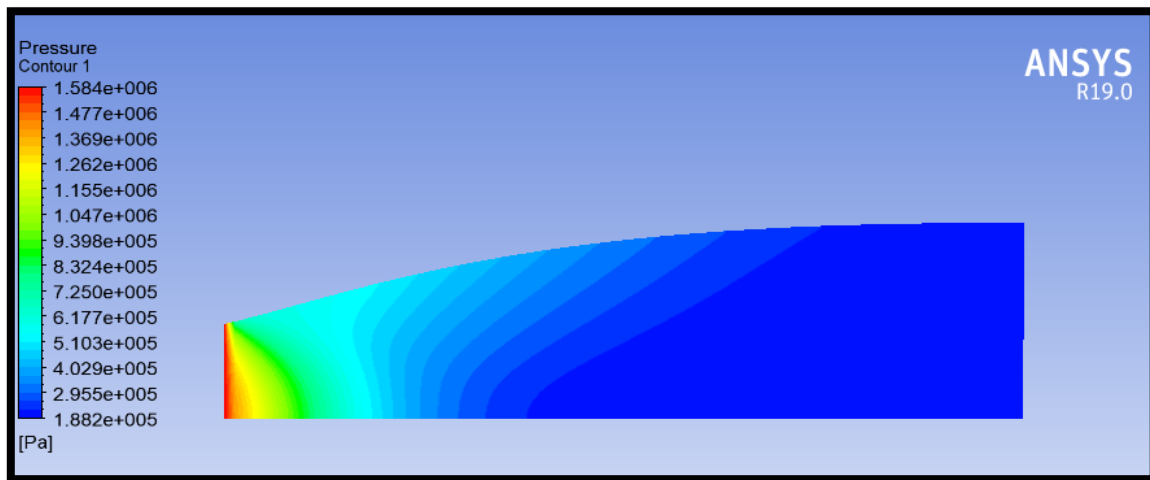


Figure VI-21 : La pression sur Ansys

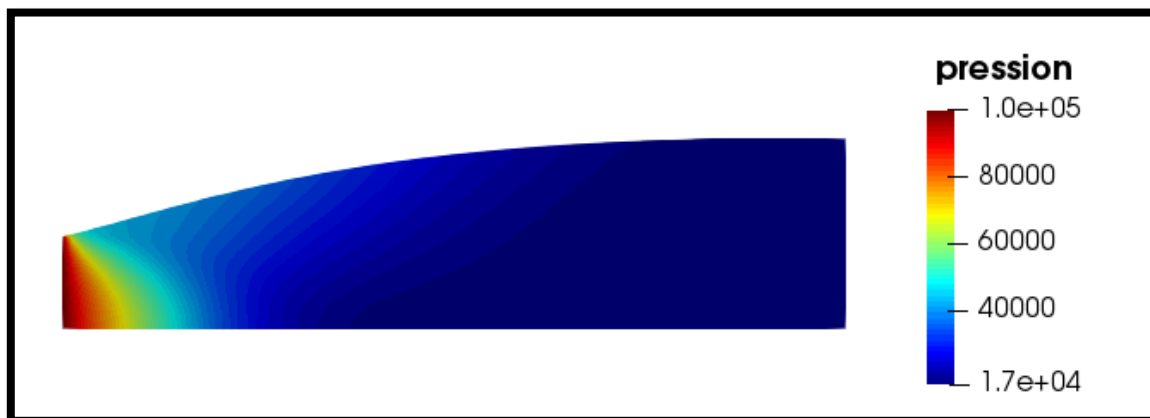


Figure VI-22: La pression sur OpenFOAM

Les courbes des figures VI.23 et VI.24 au-dessous réalisées sur Ansys et OpenFOAM représentent l'évolution de rapport de pression statique sur la pression totale (cas gaz parfait) respectivement sur la paroi et l'axe de tuyère.

La Pression Statique diminue rapidement au niveau du col et dans la zone d'expansion initiale puis lentement dans la partie divergente.

Le troisième graphe obtenu à l'aide de la logicielle Fortran dont la méthode des caractéristiques appliquée sur le profil de la tuyère circulaire ; il est mentionné pour

les comparer avec les résultats de la simulation. On voit bien que l'évolution de la Pression Statique est l'inverse du Nombre de Mach, lorsque la pression diminue le Nombre de Mach augmente.

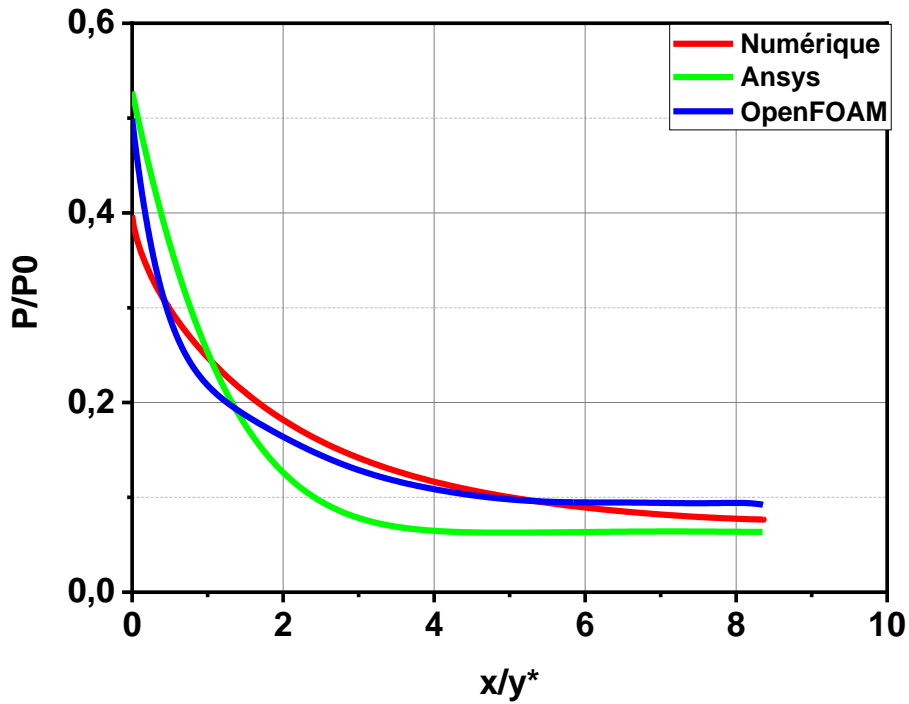


Figure VI-23: Les courbes de rapport des pressions le long de la paroi de tuyère

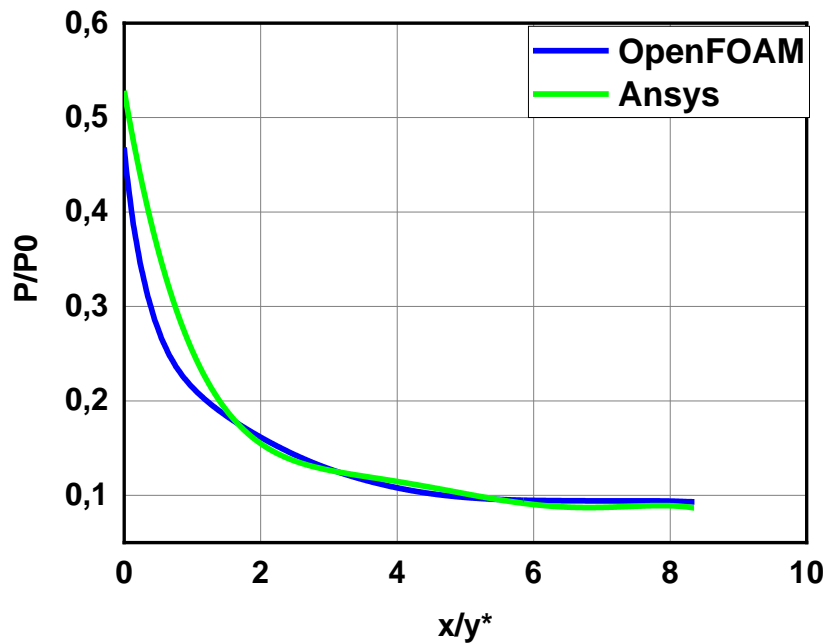


Figure VI-24 : Les courbes de rapport des pressions le long de l'axe de tuyère

c).Variation de la température

Les figures VI.25 et VI.26 ci-dessous sont obtenues respectivement sur les deux logiciels de simulation Ansys et OpenFOAM et elles représentent le Contour de l'évolution de la Température à travers notre tuyère depuis l'entrée jusqu'à la sortie. Le Contour de la Température évolue d'une manière décroissante depuis le col (la zone en jaune dans ansys et rouge dans openfoam) jusqu'à la sortie de la tuyère (zone bleu). On sait que La Température est maximale au niveau de la chambre de combustion, donc plus on s'éloigne de la chambre plus elle diminue, dans le cas de la tuyère l'évolution de la température est la même que celle de la pression vue que la pression dépend de la température.

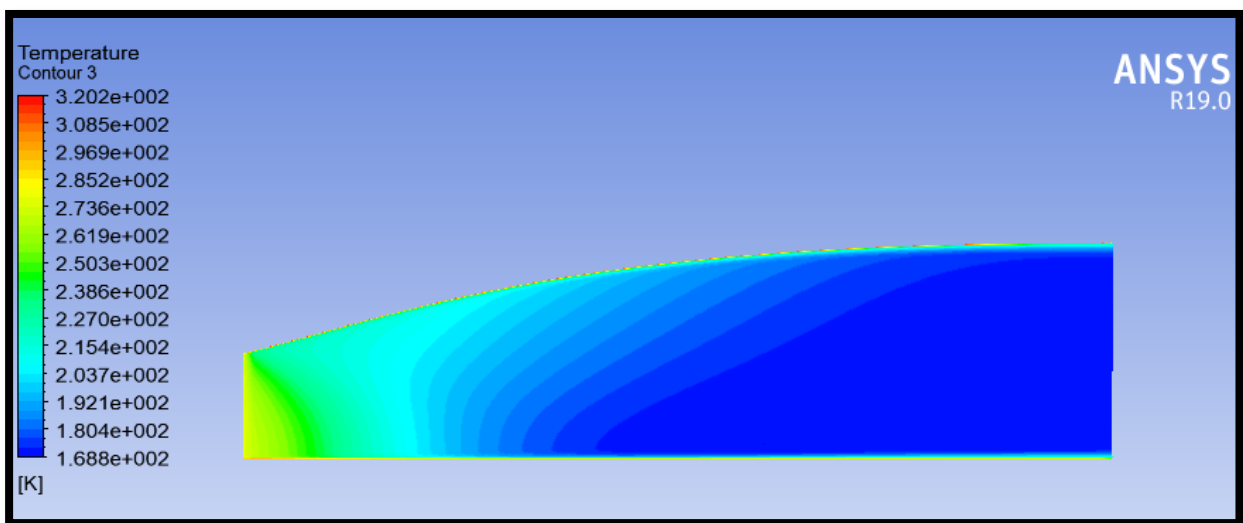


Figure VI-25: La température sur Ansys

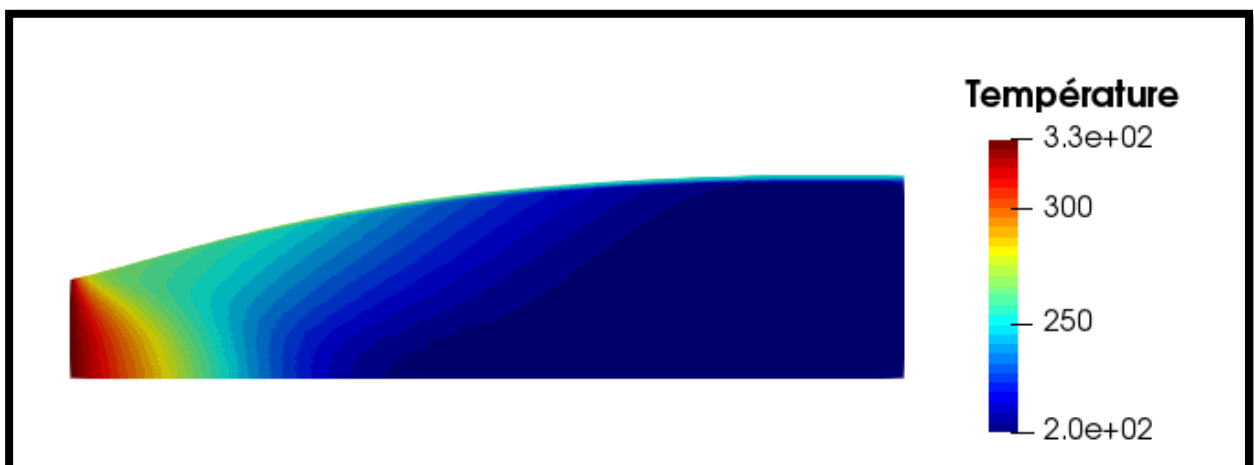


Figure VI-26: La température sur OpenFOAM

Les courbes au-dessous sur la figure VI.26 et la figure VI.27 réaliser sur Ansys et OpenFOAM représente l'évolution de rapport de température sur la température totale (cas gaz parfait) sur la paroi et l'axe de la tuyère. L'évolution de cette courbe est similaire à celle de la Pression Statique.

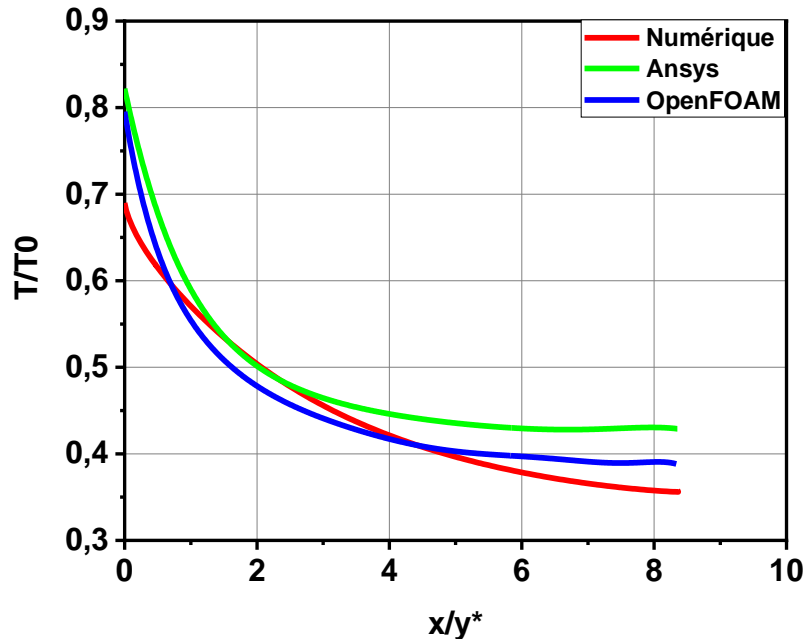


Figure VI-27: Les courbes de rapport des températures le long de la paroi de tuyère

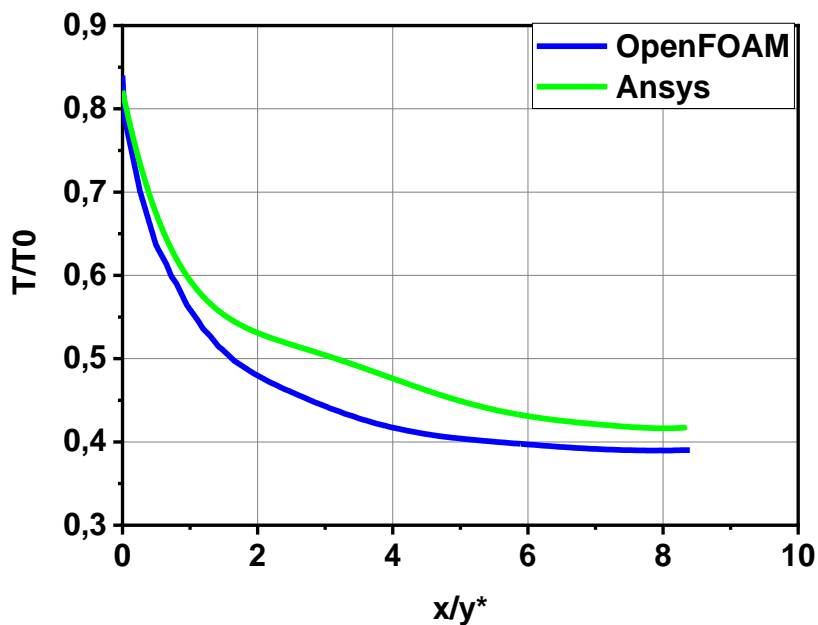


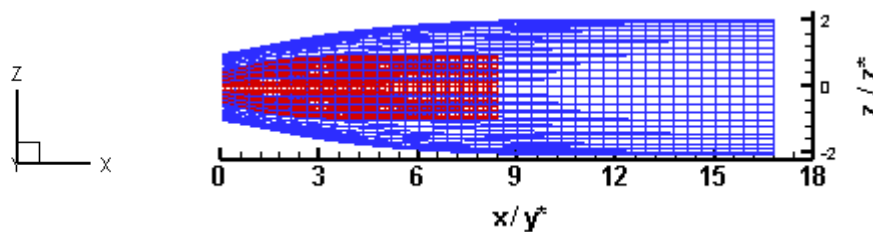
Figure VI-28: Les courbes de rapport des températures le long de l'axe de tuyère

VI.4. Résultats sur la tuyère à détente centré asymétrique circulaire dans Y+ après correction

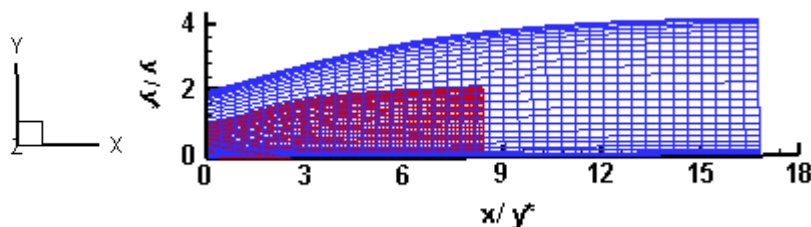
Après l'étude numérique et la simulation de cas précédent de la tuyère asymétrique circulaire nous avons conclu que les résultats obtenus par la simulation de nombre de mach à la sortie ne sont pas proches comparant avec les résultats numérique (numérique $Ms=3$ telle que Ms de simulation égale à 2.2). À cause de ça, nous avons passé à une autre tuyère qu'est une section à l'entrée et une longueur deux fois grande que la tuyère précédente et nous avons gardé le même rapport des sections [86].

A l'aide de méthode des caractéristiques nous avons faire une correction sur le rayon d'entrée. Donc nous avons tombé sur une tuyère de 16.70 de long avec un rapport des sections de 4.22 ($Re=1$ et $Rs=2$) et un angle d'inclinaison $\Theta_{max}=15.46^\circ$.

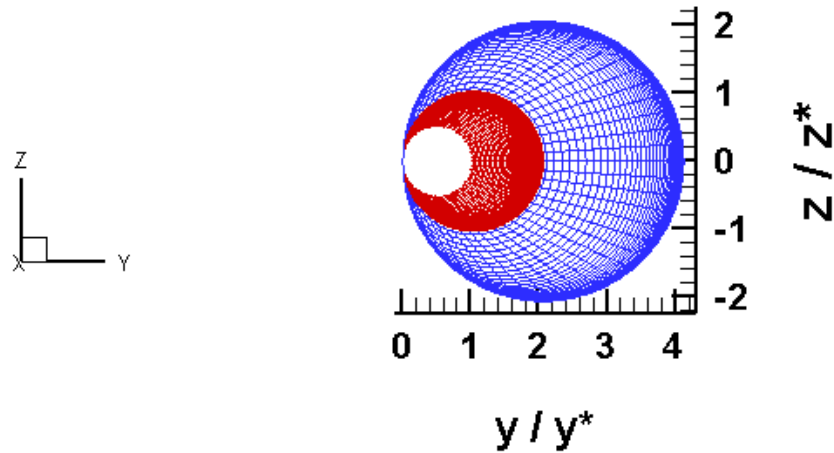
La figure VI.29 (a-d) représente les différentes configurations de cette nouvelle tuyère par rapport à la tuyère de cas précédent sur les axe (x, z) , (x, y) , (y, z) et (x, y, z) .



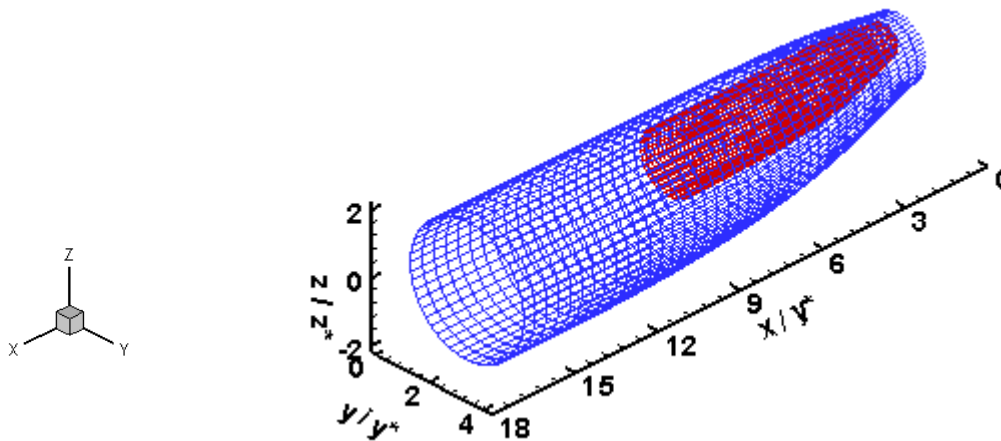
a- Tuyère asymétrique circulaire après correction sur le plan (x, z)



b- Tuyère asymétrique circulaire après correction sur le plan (x, y)



c- Tuyère asymétrique circulaire après correction sur le plan (y, z)



d- Tuyère asymétrique circulaire après correction sur le plan (x, y, z)

Figure VI-29: différentes configuration de la tuyère asymétrique circulaire dans Y+ après correction pour $Ms=3.00$ et $T0=300$ k

VI.4.1. la variation des paramètres d'écoulement dans la tuyère

a).variation de nombre de mach

Dans les figures VI.30 et VI.31 qu'ils sont obtenues à l'aide des simulateurs Ansys et OpenFOAM nous avons représenté le contour de nombre de mach dans la tuyère asymétrie de deuxième cas. Comme ils montrent, la distribution de nombre de mach du col au sortie de la tuyère (partie divergente) est de manière croissante de $M=1$ à l'entrée jusqu'à $Ms=3$ a la sortie.

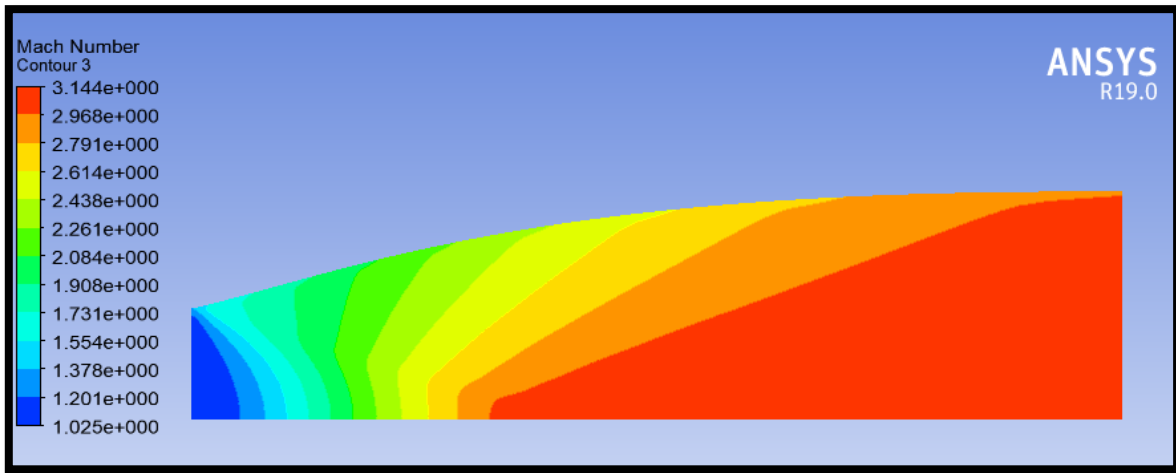


Figure VI-30: Le nombre de mach sur Ansys

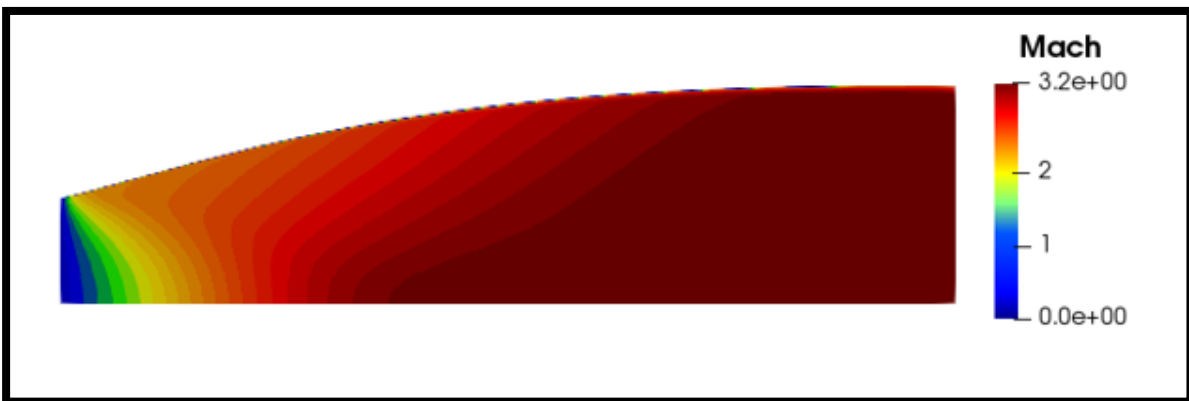


Figure VI-31: Le nombre de mach sur OpenFOAM

Nous avons ajouté le tableau VI.3 ci-dessous qui représente les résultats numérique qu'ils sont obtenus par la méthode des caractéristiques.

Tableau VI-3: Les résultats numérique de la tuyère circulaire après correction

Ms	As/A*	Cf	Cmasse	L
3.00	4.2257	0.2955	29.6211	16.7039

Nous avons voir que les résultats de simulation sont proches avec les résultats numérique. Pour faciliter les choses, les figures VI.32 et VI.33 ci-dessous

représentent les graphes qu'ils conviennent pour chaque contour (Ansys, OpenFOAM et Fortran)

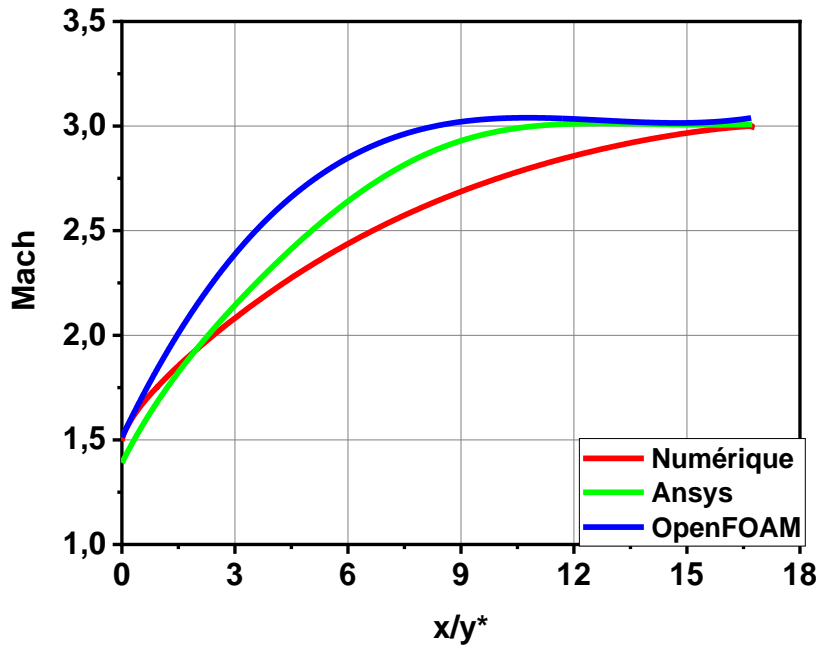


Figure VI-32: Les courbes de nombre de mach le long de la paroi de tuyère

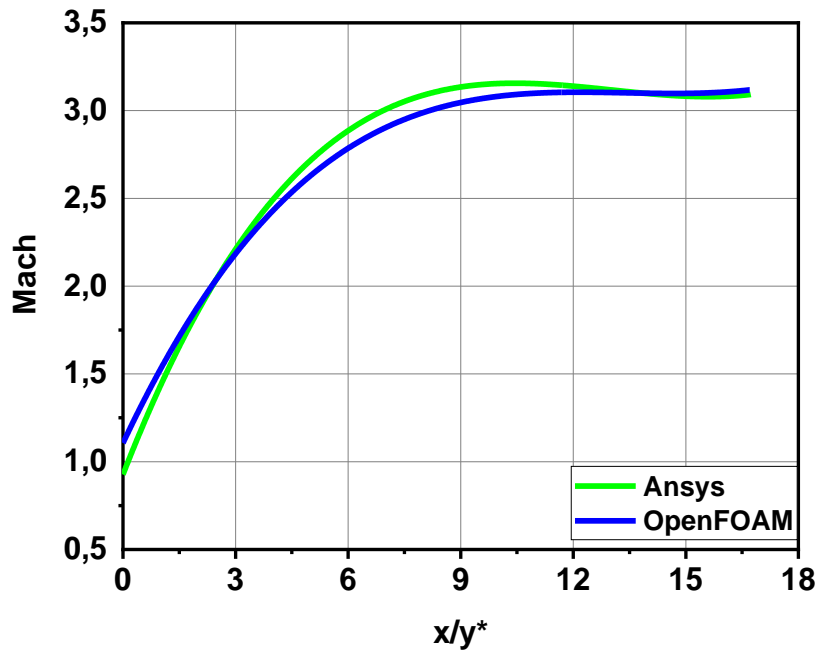
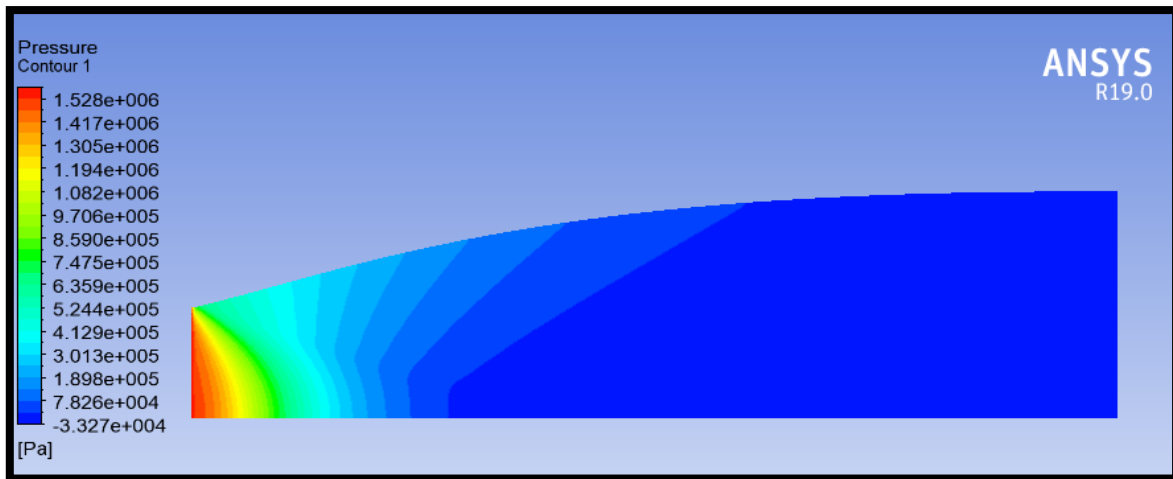
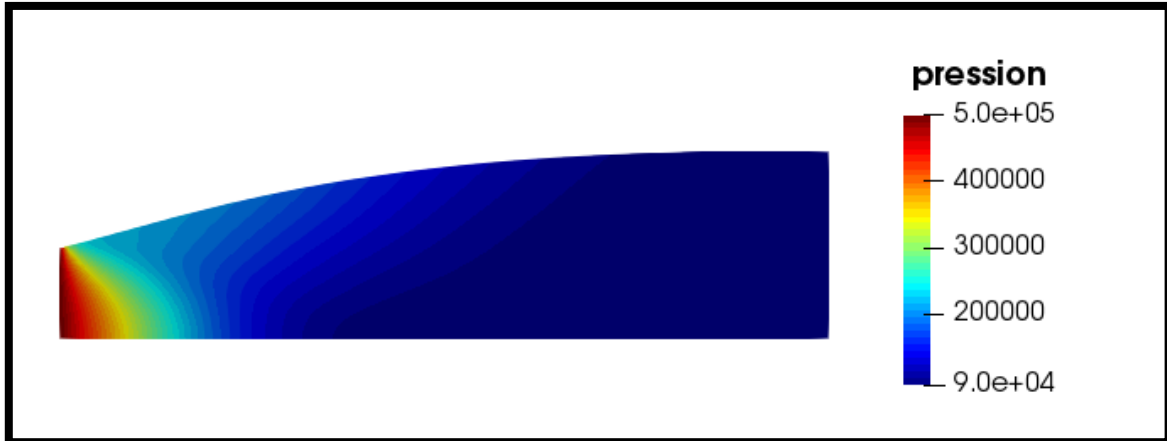


Figure VI-33: Les courbes de nombre de mach le long de l'axe de tuyère

b).variation de la pression

La variation de la pression dans les tuyères est proportionnellement inverse avec le nombre de mach, et comme nous allons voir dans la partie précédente que le nombre de mach augmente de l'entrée à la sortie de la tuyère donc la pression varie de manière décroissante le long de la tuyère. Les figures VI.34 et VI.35 obtenues par Ansys et OpenFOAM représentent le contour de la pression dans la tuyère.

**Figure VI-34:** La pression sur Ansys**Figure VI-35:** La pression sur OpenFOAM

Les courbes qui représentent la variation de la pression le long de la paroi et l'axe de la tuyère sont mentionnées respectivement ci-dessous dans les figures VI.36 et VI.37. Ils sont montrés que les résultats obtenues par les simulateurs Ansys et OpenFOAM sont proches avec le résultat numérique obtenu par le code de calcul Fortran.

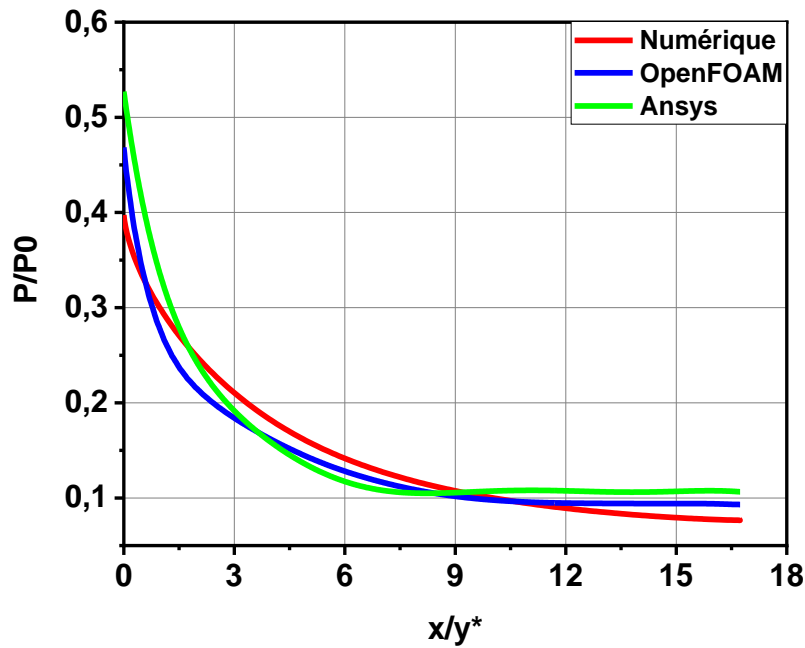


Figure VI-36: Les courbes de rapport des pressions le long de la paroi de tuyère

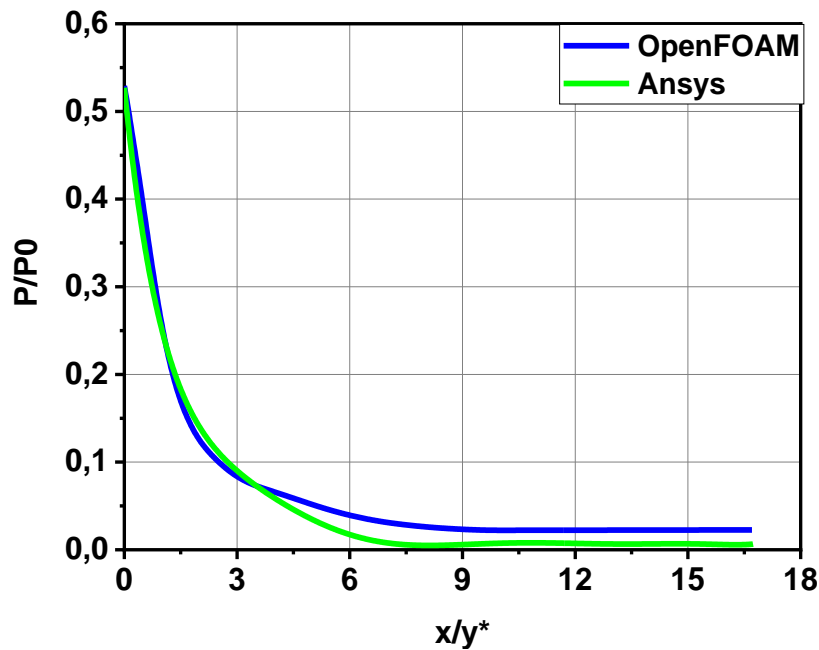


Figure VI-37: Les courbes de rapport des pressions le long de l'axe de tuyère

c).variation de la température

De la même manière, la température varie proportionnellement inverse avec le nombre de mach et proportionnelle à la pression dont le principe des tuyères (l'énergie de pression et l'énergie calorifique sont transformés a une énergie

cinétique). Les figures VI.38 et VI.39 sont représentées le contour de la température à l'aide des logicielles Ansys, OpenFOAM.

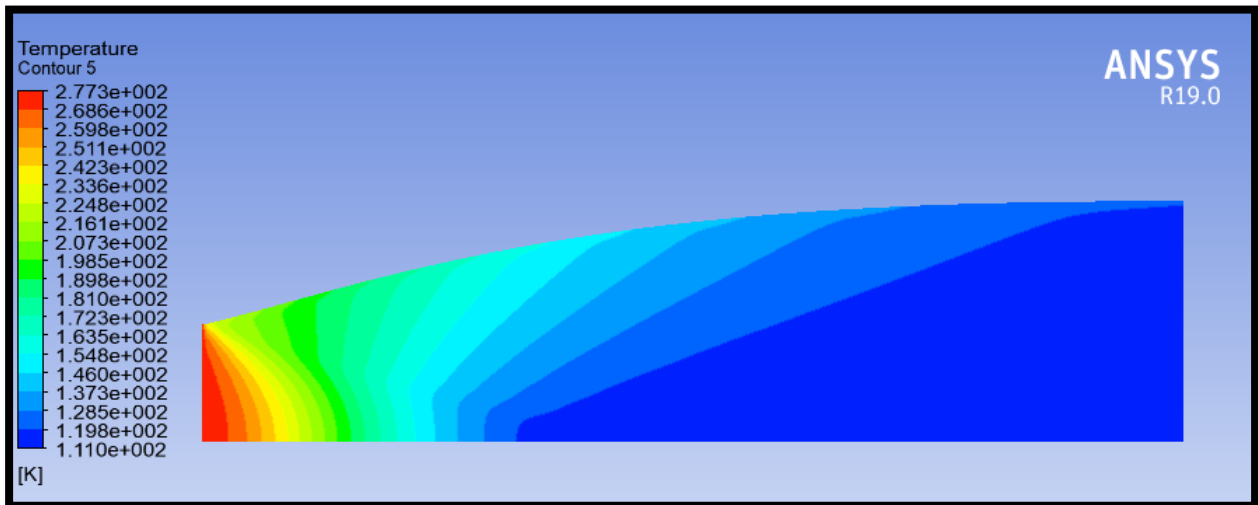


Figure VI-38: La température sur Ansys

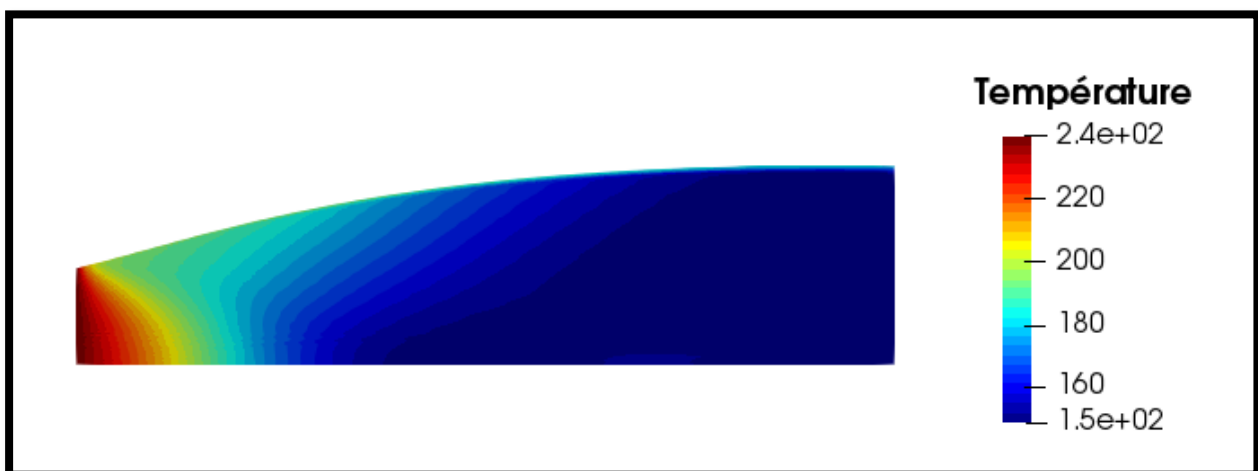


Figure VI-39 : La température sur OpenFOAM

La figure VI.40 représente les courbes de variation de la température par rapport à la paroi de la tuyère. Ainsi que la figure VI.41 représente l'évolution de la température le long de l'axe de tuyère.

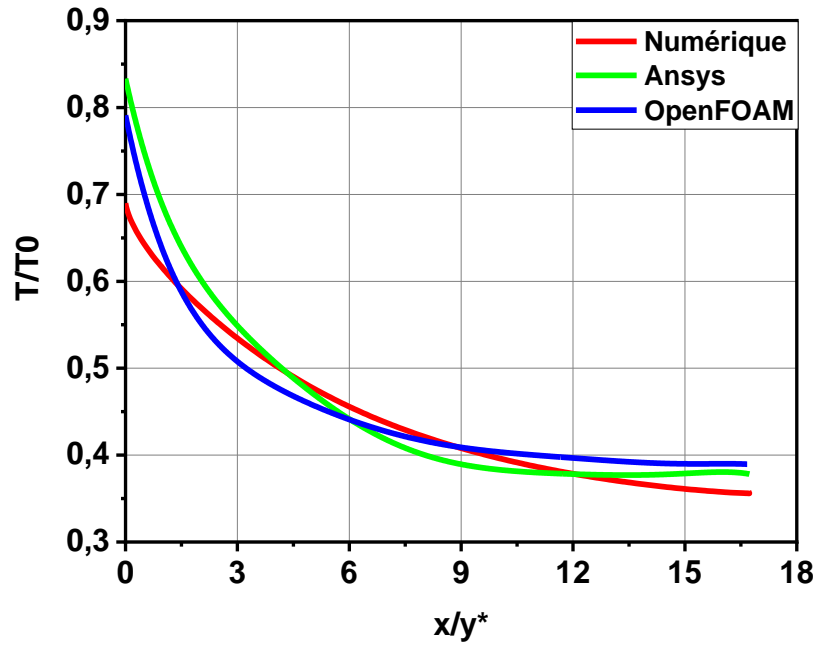


Figure VI-40: Les courbes de rapport des températures le long de la paroi de tuyère

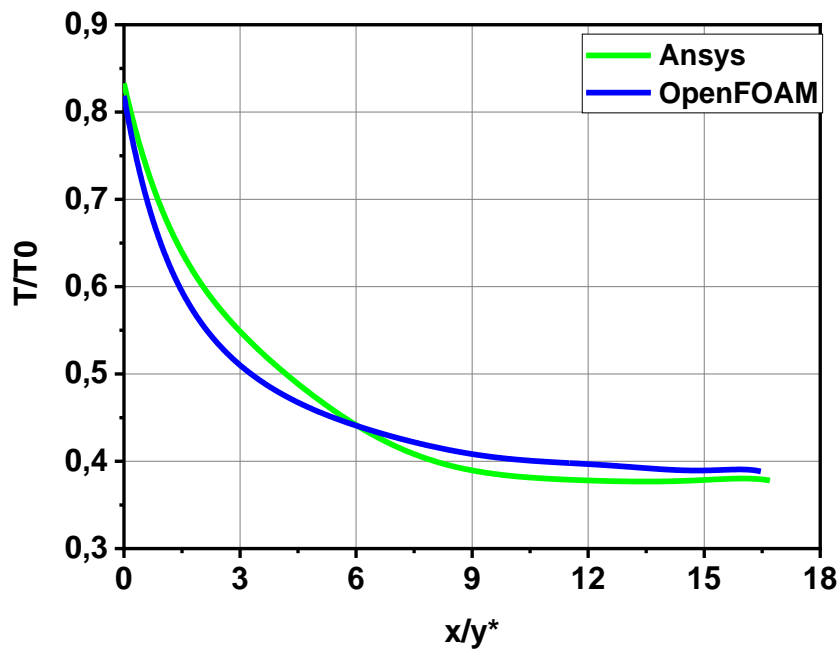


Figure VI-41: Les courbes de rapport des températures le long de l'axe de tuyère

CONCLUSION GENERALE

Les tuyères supersoniques jouent un rôle très important dans la conception des engins aérospatiaux. Depuis des décennies et avec les développements expérimentaux et numériques, les concepteurs ont pensé à améliorer les performances des tuyères de propulsion. Plusieurs formes de tuyères ont été trouvées parmi laquelle la forme MLN asymétrique placée dans l'axe Y+.

Le travail présenté dans ce mémoire est une étude numérique (CFD) par les logiciels Ansys-Fluent et OpenFOAM de l'écoulement dans une tuyère asymétrique, vu que ce type des tuyères est jusqu'à présent en phase d'étude. L'évolution des paramètres (Nombre de Mach, Pression, Densité et Température) d'écoulement dans cette tuyère a été étudiée et analysé.

Les résultats obtenus sont représentés en termes des contours et des courbes représentent la distribution de pression, température et nombre de mach le long des parois de la tuyère, sachant que le nombre de mach augmente d'une manière rapide de point en aval du col jusqu'à la zone d'expansion ou il est augmenté progressivement jusqu'à la sortie de la tuyère. Par contre, la variation de pression et de la température est proportionnellement inverse avec le nombre de mach.

Notre étude basé premièrement sur la simulation numérique de la tuyère axisymétrique par les logiciels ansys et openfoam ainsi que les résultats obtenus numériquement. On conclure que les trois études sont proches, et on remarque qu'ils ont la même valeur de mach de sortie telle que $Ms=3$.

Deuxièmement, la simulation numérique sur les mêmes logiciels (ansys et openfoam) de notre tuyère asymétrique circulaire de telle façon que le rayon d'entrée est la moitié de la tuyère axisymétrique, on trouve que le mach de sortie cette fois ci est moins que la première étude ($Ms=2.2$).

Donc il est obligatoire de faire une correction sur la section d'entrée de la tuyère asymétrique placée dans y^+ , de telle sorte que le rayon à l'entrée de la tuyère est le même par rapport à la tuyère axisymétrique. Une fois que la correction se fait, la simulation numérique de cette dernière par Ansys et Openfoam donne des mêmes résultats comparés avec la tuyère axisymétrique (c'est-à-dire que le M_s de sortie $M_s = 3$). Donc l'objectif de garder la même performance de la tuyère axisymétrique pour une forme circulaire asymétrique est satisfaisant.

La nouvelle géométrie des tuyères supersoniques de la forme circulaire asymétrique ont la même performance de la tuyère axisymétrique. Par ailleurs l'emplacement de cette tuyère asymétrique dans les moteurs fusées est simple et facile comparé avec la tuyère axisymétrique, telle que on peut l'embarquer plusieurs tuyères dans un moteur. Ce dernier est considéré comme un avantage des tuyères supersoniques.

Dans notre étude nous avons choisi deux logiciels pour l'étude des paramètres d'écoulement ; qu'ils sont Ansys et OpenFOAM. Comparativement, l'OPENFOAM est mieux que l'ANSYS dans le point de l'efficacité, gratuité, le temps de calcul et la précision des résultats obtenus.

Dans ce qui va suivre nous allons proposer quelques problèmes constituant des sujets intéressants qui puissent avancer l'étude dans ce domaine.

Voici quelques thèmes qui peuvent servir comme travaux futurs :

- Refaire le même travail pour le modèle à haute température (HT).
- Faire le calcul visqueux de la couche limite.
- Faire le calcul de l'écoulement en utilisant les équations d'Euler.
- Faire le calcul des paramètres d'écoulement en ajoutant un deuxième galbe.
- Faire le calcul des paramètres d'écoulement des autres formes (rectangle, triangle, ellipse,...).

Références

- [1] Eutamen Salim. Etude numérique de l'écoulement d'un fluide compressible dans une tuyère. Mémoire de magister, département de génie mécanique, université Mentouri-Constantine.2010.
- [2] P.Carriere. « Aérodynamique interne Tuyère et Jes, »Deuxième partie. Toulouse Ecole nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace.1971.
- [4] STEPHANE MAILHOT, "conception mise en opération de l'installation supersonique à haute température de RDDC VALCARTIER", Univ Laval Québec ,2010.
- [3] MAHFOUDI EL-AHCENE thèse doctorat : contribution à l'étude des profils de tuyères en écoulements supersoniques visqueux par la méthode des volumes finis.
- [5] ABADA Omar thèse magister : conception des tuyères supersoniques à haute température – type détente centrée - par la méthode des caractéristiques.
- [6] PETERSON C.R. and Hill. P. G."Mechanics and Thermodynamics of Propulsion", 2nd edition. Addition-Wesley Publishing Company Inc. New York, 1992.
- [7] Malina F. J., "Characteristics of the rocket motor based on the theory of perfect gases," J. Franklin Inst., Vol. 230, PP. 433-450, 1940.
- [8] Rao G. V. R., "Contoured Rocket Nozzles," Proc. 9Th Int. Astro-Fed. Congress, Amsterdam, 1958.
- [9] REIJASSE.P, "Aérodynamique des tuyères supersoniques", ENSAM.2007 web.paris.ensam.fr/IMG/pdf/Cours_ENSAM_Reijasse.pdf
- [10] Ralston A. and Rabinowitz P., "A First Course in Numerical Analysis," McGraw-Hill Book Company, 1985.
- [11] Zebbiche T. and Youbi Z., "Supersonic Two-Dimensional Minimum Length Nozzle Design at High Temperature. Application for Air," AIAA-2006-4599, 42st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, California, July 09-12, 2006.
- [12] Shapiro A. H., "Compressible Fluid Flow," Vol. 1, New York, the Ronald Press, 1953.
- [13] Rao G. V. R., "Recent development in Rocket Nozzle Configuration", ARS Journal, Vol. 31, N° 04, PP. 1488-1494, 1961.
- [14] S. M.HABIBALLAH « Liquide rocket trust Chambers», office national d'étude et de la recherché aérospatiales, Chatillon, France, 2004.

-
- [15] John David. Anderson, Jr. « Hypersonic and High Temperature Gas Dynamics », McGraw-Hill book Company, New York, 1989.
- [16] Anderson Jr., “Modern Compressible Flow: With Historical Perspective,” McGraw Hill Book company, New York, 1982.
- [17] **P. Carriere**. “Aérodynamique interne Tuyère et Jets,” deuxième partie. Toulouse Ecole nationale supérieure de l’aéronautique et de l’espace, 1971.
- [18] **E. L. Houghton and P.W. Carpenter** “Aerodynamics for Engineering students”, Fifth Edition, Butterworth-Heinemann; Fifth edition, 2003.
- [19] **REIJASSE, P.** aérodynamique des tuyères propulsives en sur-détente : décollement libre et charges latérales en régime stabilisé, PhD Thesis, Université de Paris VI, 2005.
- [20] **Ralston A. and Rabinowitz P.** « First course in numerical analysis » Mc Graw Hill Book Company, 1985
- [21] **Dr R.RENANE** cours de dynamique de gaz propulsion M1.
- [22] **S. Tatsumi, L. Martinelli, A. Jameson**, Flux-limited schemes for the compressible Navier–Stokes equations, AIAA J. 33 (2) (1995)