

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la recherche Scientifique



UNIVERSITE SAAD DAHLEB - BLIDA -1
Institut d'Aéronautique et des études spatiales
Département de Construction Aéronautique



Mémoire de fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme
Master en Aéronautique
Spécialité : Propulsion Avions

THEME

SIMULATION DES ECOULEMENTS SUPERSONIQUES DANS LES TUYERES
DOUBLE GALBE TRIDIMENSIONNELLES

Proposé et dirigé par :

Dr. ABDALLAH ELHIRTSI Ahmed (Encadreur)

Dr. ABADA Omar (Co-Encadreur)

Réalisé par :

AMMOUR Fidaa

ANNOU Mohamed Chakib

Blida, July 2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

ملخص

يتضمن هذا العمل محاكاة التدفقات فوق الصوتية اللزجة وغير اللزجة في فوهات MLN ثلاثية الأبعاد وفوهات مزدوجة الانحناء، لأشكال متعددة (مربعة، سداسية، بيضاوية، شبه بيضاوية، مستطيلة) باستخدام أداة محاكاة ديناميكا الموائع الحسابية (CFD). ستجرى المحاكاة على أربع مراحل (إنشاء الهندسة ثلاثية الأبعاد، ودمج الهندسة، ودقة النتائج، وعرضها). يعتمد التحليل على المعلمات الديناميكية الحرارية ورقم ماخ في تكوينات HT.

Résumé

Ce travail consiste à simuler les écoulements supersoniques visqueux et non visqueux dans les tuyères MLN et double galbe tridimensionnelles de forme quelconque (carrée, hexagonale, elliptique, demi-elliptique, rectangulaire) à l'aide d'un outil de simulation CFD. La simulation sera faite en quatre phases (création de la géométrie 3D, maillage de la géométrie, résolution et visualisation des résultats). L'analyse est basée sur les paramètres thermodynamiques et nombre de Mach dans les configurations HT.

Summary

This work consists in simulating viscous and inviscid supersonic flows in three-dimensional MLN and double-curved nozzles of any shape (square, hexagonal, elliptical, semi-elliptical, rectangular) using a CFD simulation tool. The simulation will be done in four phases (creation of the 3D geometry, meshing of the geometry, resolution and visualization of the results). The analysis is based on the thermodynamic parameters and Mach number in the HT configurations.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier infiniment mon dieu tout puissant pour l'aide qu'il m'a apporté pour la réalisation de ce modeste travail.

Je tiens donner ma gratitude remerciement à monsieur **ABDALLAH ELHIRTSI Ahmed** mon encadreur pour avoir assuré la direction de mon travail, et pour m'avoir apporté la rigueur scientifique nécessaire à son bon déroulement. Je le remercie encore pour sa disponibilité et pour ses conseils.

Je tiens donner aussi ma gratitude remerciement à monsieur **ABADA Omar** pour ses conseils et perspectives concernant mon travail et qui m'a soutenu pour la préparation et l'avancement de ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------	----------

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES TUYERES SUPERSONIQUES

1.1. INTRODUCTION	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
1.1 INTRODUCTION AUX ECOULEMENTS COMPRESSIBLES	3
1.2 TYPOLOGIE DES TUYERES SUPERSONIQUES	4
1.2.1 Tuyère convergente-divergente (de Laval)	4
1.2.2 Tuyère à longueur minimale (MLN)	4
1.2.3 Tuyère à double détente (Dual Bell)	4
1.2.4 Tuyères de formes spéciales	5
1.3 REGIMES DE FONCTIONNEMENT DES TUYERES SUPERSONIQUES	5
1.4 LA METHODE DES CARACTERISTIQUES (MOC)	6
1.4.1 Origines et fondement mathématique	6
1.4.2 Application à la conception de profils MLN	7
1.5 MODELES PHYSIQUES : GAZ PARFAIT (GP) VS HAUTE TEMPERATURE (HT)	7
1.6 CONTRAINTES THERMIQUES ET CHOIX DES MATERIAUX	8
1.7 ASPECTS GEOMETRIQUES TRIDIMENSIONNELS	8
1.8 ÉVOLUTIONS ET PERSPECTIVES INDUSTRIELLES	9
1.9 CONCLUSION	10

CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES TUYÈRES SUPERSONIQUES

2.1 INTRODUCTION	11
2.2 METHODE DES CARACTERISTIQUES (MOC) A HAUTE TEMPERATURE	11
2.2.1 Rappel du principe en gaz parfait	11
2.2.2 Adaptation aux conditions de haute température	12
2.3 MODELISATION TRIDIMENSIONNELLE DES LIGNES DE COURANT	16
2.3.1 Méthode 1 — Extrusion géométrique simple	16
2.3.2 Méthode 2 — Interpolation surfacique multi-profils	16

2.4 CHAÎNE DE CONCEPTION INTÉGRÉE	17
---	----

CHAPITRE 3 : SIMULATION NUMÉRIQUE PAR ANSYS

3.1. INTRODUCTION	18
3.2. SIMULATION ANSYS-FLUENT	19
3.2.1. <i>Présentation générale d'ANSYS Workbench</i>	19
3.2.2. <i>Architecture du logiciel FLUENT</i>	20
3.2.2.1. Le processeur : Design Modeler et ANSYS Meshing	20
3.2.2.2. Le solveur Fluent	21
3.2.2.3. Le post-processeur CFD-Post	21
3.2.3. <i>Limites et perspectives de la simulation numérique</i>	21
3.3. PROCÉDURE DE RÉSOLUTION NUMÉRIQUE PAR « FLUENT »	22
3.3.1. <i>Équations fondamentales et modèles physiques</i>	22
3.3.2. <i>Discretisation et schémas numériques</i>	23
3.3.3. <i>Conditions aux limites et initialisation</i>	23
3.3.4. <i>Stratégie de convergence</i>	24
3.4. SIMULATION DE LA TUYÈRE AXISYMETRIQUE DE FORME CIRCULAIRE MLN...	27
3.4.1. <i>Géométrie</i>	27
3.4.2. <i>Maillage</i>	28
3.4.3. <i>Configuration</i>	31
3.4.4. <i>Paramètres de configuration</i>	32
3.4.5. <i>Schéma de convergence</i>	36
3.5. CONCLUSION	39

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET COMMENTAIRES

4.1. INTRODUCTION	40
4.2. CONTOUR DES TUYÈRES ASYMETRIQUE TRIDIMENSIONNELLE MLN.....	40
4.2.1. <i>Tuyère axisymétrique de forme circulaire</i>	40
4.2.2. <i>Tuyère axisymétrique de forme carré</i>	25
4.2.3. <i>Tuyère axisymétrique de forme circulaire placée verticalement</i>	27
4.2.4. <i>Tuyère axisymétrique de forme hexagonale</i>	49
4.2.5. <i>Tuyère axisymétrique de forme rectangulaire</i>	50

4.2.6. <i>Tuyère axisymétrique de forme elliptique</i>	52
4.2.7. <i>Comparaison des tuyères tridimensionnelle asymétrique MLN</i>	54
4.3. CONTOUR DES TUYERES ASYMETRIQUE TRIDIMENSIONNELLE DOUBLE GALBE.....	57
4.3.1. <i>Tuyère axisymétrique de forme circulaire</i>	57
4.3.2. <i>Tuyère axisymétrique de forme carré</i>	62
4.3.3. <i>Tuyère axisymétrique de forme circulaire placée verticalement</i>	63
4.3.4. <i>Tuyère axisymétrique de forme hexagonale</i>	64
4.3.5. <i>Tuyère axisymétrique de forme rectangulaire</i>	65
4.3.6. <i>Tuyère axisymétrique de forme elliptique</i>	66
4.3.7. <i>Comparaison des tuyères tridimensionnelle asymétrique double galbe</i> ...	67
4.4. IMPACT DES MODELES DE TURBULENCES COMPARE AU MODELE NON VISQUEUX.....	70
4.4.1. <i>L'impact sur la Tuyère axisymétrique de forme circulaire MLN</i>	71
4.4.2. <i>L'impact sur la Tuyère axisymétrique de forme circulaire double galbe</i> . 71	
4.5. IMPACT DE L'NPR	72
4.5.1. <i>L'impact sur la Tuyère axisymétrique de forme circulaire MLN</i>	72
4.5.2. <i>L'impact sur la Tuyère axisymétrique de forme circulaire double galbe</i> . 74	

CONCLUSION GENERALE

..... 77

RÉFÉRENCES

..... 79

LISTE DES FIGURES

FIGURE 2.3.: TUYERE BIDIMENSIONNELLE DE LONGUEUR MINIMALE AVEC ME = 3 ET 20 LIGNES CARACTERISTIQUES.	15
FIGURE 3.1 : LES PRINCIPALES ETAPES D'ANSYS FLUENT	22
FIGURE 3.2 : LES GEOMETRIE DES TUYERES MLN.....	25
FIGURE 3.3 : LES GEOMETRIES DES TUYERES DOUBLE GALBE	26
FIGURE 3.4 : LA GEOMETRIE DE LA TUYERE	27
FIGURE 3.5 : MAILLAGE FINALE DE LA TUYERE.....	30
FIGURE 3.6 : STATISTIQUES DU MAILLAGE PRECEDENT.....	30
FIGURE 3.7 : VERIFICATION DU CRITERE D'ORTHOGONALITE	31
FIGURE 3.8 : LES PARAMETRES POUR UN GAZ PARFAIT	34
FIGURE 3.9 : COEFFICIENTS D'UN GAZ A HAUTE TEMPERATURE COMPRISE ENTRE 100 ET 1000.....	35
FIGURE 3.10 : COEFFICIENTS D'UN GAZ A HAUTE TEMPERATURE COMPRISE ENTRE 1000 ET 3000.....	35
FIGURE 3.11 : PRECISION DE LA CONVERGENCE	36
FIGURE 3.12 : SCHEMA DE CONVERGENCE POUR TUYERE AXISYMETRIQUE	38
FIGURE 4.1 : ALLURE DES CONTOURS DU NOMBRE DE MACH LE LONG DE LA TUYERE MLN.....	41
TRIDIMENSIONNELLE A SECTION DE SORTIE CIRCULAIRE	41
FIGURE 4.2 : ALLURE DES CONTOURS DU NOMBRE DE MACH LE LONG DE LA TUYERE MLN.....	41
A SECTION CIRCULAIRE	41

FIGURE 4.3 : COMPARAISON DES RESULTATS DU NOMBRE DE MACH LE LONG DU CONTOUR DE LA TUYERE MLN ENTRE CFD (ANSYS-FLUENT) ET LA SIMULATION NUMERIQUE (MOC).....	42
FIGURE 4.4 : ALLURE DES CONTOURS DU RAPPORT DE TEMPERATURE T/T_0 DE LA TUYERE	42
TRIDIMENSIONNELLE MLN A SECTION DE SORTIE CIRCULAIRE	42
FIGURE 4.5 : COMPARAISON DES RESULTATS DU RAPPORT DE LA TEMPERATURE T/T_0 LE LONG DU CONTOUR DE LA TUYERE MLN ENTRE CFD (ANSYS-FLUENT) ET LA SIMULATION NUMERIQUE (MOC)	43
FIGURE 4.6 : ALLURE DES CONTOURS DU RAPPORT DE PRESSION P/P_0 DE LA TUYERE.....	43
TRIDIMENSIONNELLE MLN A SECTION DE SORTIE CIRCULAIRE	43
FIGURE 4.7 : COMPARAISON DES RESULTATS DU RAPPORT DE PRESSION P/P_0 LE LONG DU CONTOUR DE LA TUYERE MLN ENTRE CFD (ANSYS-FLUENT) ET LA SIMULATION NUMERIQUE (MOC).....	44
FIGURE 4.8 : ALLURE DES CONTOURS DU RAPPORT DENSITE DE ρ/ρ_0 DE LA TUYERE.....	44
TRIDIMENSIONNELLE MLN A SECTION DE SORTIE CIRCULAIRE	44
FIGURE 4.9 : COMPARAISON DES RESULTATS DU RAPPORT DE DENSITE ρ/ρ_0 LE LONG DU CONTOUR DE LA TUYERE MLN ENTRE CFD (ANSYS-FLUENT) ET LA SIMULATION NUMERIQUE (MOC).....	45
FIGURE 4.10 : ALLURE DES CONTOURS DE LA TUYERE TRIDIMENSIONNELLE	46
MLN A SECTION DE SORTIE CARRE.....	46
FIGURE 4.11 : ALLURE DES CONTOURS DU NOMBRE DE MACH LE LONG DE LA TUYERE MLN.....	47
A SECTION CARRE.....	47

FIGURE 4.12 : ALLURE DES CONTOURS DE LA TUYERE	
TRIDIMENSIONNELLE	48
MLN A SECTION DE SORTIE CIRCULAIRE PLACEE VERTICALEMENT	48
FIGURE 4.13 : ALLURE DES CONTOURS DU NOMBRE DE MACH LE LONG DE	
LA TUYERE MLN.....	49
A SECTION CIRCULAIRE PLACEE VERTICALEMENT	49
FIGURE 4.14 : ALLURE DES CONTOURS DE LA TUYERE	
TRIDIMENSIONNELLE	50
MLN A SECTION DE SORTIE HEXAGONALE	50
FIGURE 4.15 : ALLURE DES CONTOURS DU NOMBRE DE MACH LE LONG DE	
LA TUYERE MLN.....	51
A SECTION HEXAGONALE.....	51
FIGURE 4.16 : ALLURE DES CONTOURS DE LA TUYERE	
TRIDIMENSIONNELLE	52
MLN A SECTION DE SORTIE RECTANGULAIRE	52
FIGURE 4.17 : ALLURE DES CONTOURS DU NOMBRE DE MACH LE LONG DE	
LA TUYERE MLN.....	53
A SECTION RECTANGULAIRE.....	53
FIGURE 4.18 : ALLURE DES CONTOURS DE LA TUYERE	
TRIDIMENSIONNELLE	54
MLN A SECTION DE SORTIE ELLIPTIQUE	54
FIGURE 4.19 : ALLURE DES CONTOURS DU NOMBRE DE MACH LE LONG DE	
LA TUYERE MLN.....	55
A SECTION ELLIPTIQUE	55
FIGURE 4.20 : VARIATION DU NOMBRE DE MACH LE LONG DES CONTOURS	
DES TUYERES	56
TRIDIMENSIONNELLES DE TYPE MLN	56

FIGURE 4.21 : VARIATION DU RAPPORT DE TEMPERATURE T/T_0 LE LONG DES CONTOURS DES TUYERES.....	56
TRIDIMENSIONNELLES DE TYPE MLN	56
FIGURE 4.22 : VARIATION DU RAPPORT DE PRESSION P/P_0 LE LONG DES CONTOURS DES TUYERES.....	57
TRIDIMENSIONNELLES DE TYPE MLN	57
FIGURE 4.23 : VARIATION DU RAPPORT DE DENSITE ρ/ρ_0 LE LONG DES CONTOURS DES TUYERES.....	58
TRIDIMENSIONNELLES DE TYPE MLN	58
FIGURE 4.24 : ALLURE DES CONTOURS DU NOMBRE DE MACH LE LONG DE LA TUYERE DOUBLE GALBE	58
TRIDIMENSIONNELLE A SECTION DE SORTIE CIRCULAIRE	58
FIGURE 4. 25 : COMPARAISON DES RESULTATS DU NOMBRE DE MACH LE LONG DU CONTOUR DE LA TUYERE DOUBLE GALBE ENTRE CFD (ANSYS- FLUENT) ET LA SIMULATION NUMERIQUE (MOC)	59
FIGURE 4.26 : ALLURE DES CONTOURS DU RAPPORT DE TEMPERATURE T/T_0 DE LA TUYERE	59
TRIDIMENSIONNELLE DOUBLE GALBE A SECTION DE SORTIE CIRCULAIRE..	59
FIGURE 4. 27 : COMPARAISON DES RESULTATS DU RAPPORT DE LA TEMPERATURE T/T_0 LE LONG DU CONTOUR DE LA TUYERE DOUBLE GALBE ENTRE CFD (ANSYS-FLUENT) ET LA SIMULATION NUMERIQUE (MOC).....	60
FIGURE 4.28 : ALLURE DES CONTOURS DU RAPPORT DE PRESSION P/P_0 DE LA TUYERE.....	60
TRIDIMENSIONNELLE DOUBLE GALBE A SECTION DE SORTIE CIRCULAIRE..	60
FIGURE 4. 29 : COMPARAISON DES RESULTATS DU RAPPORT DE PRESSION P/P_0 LE LONG DU CONTOUR DE LA TUYERE DOUBLE GALBE ENTRE CFD (ANSYS-FLUENT) ET LA SIMULATION NUMERIQUE (MOC)	61

FIGURE 4.30 : ALLURE DES CONTOURS DU RAPPORT DENSITE DE ρ/ρ_0 DE LA TUYERE.....	61
TRIDIMENSIONNELLE DOUBLE GALBE A SECTION DE SORTIE CIRCULAIRE..	61
FIGURE 4. 31 : COMPARAISON DES RESULTATS DU RAPPORT DE DENSITE ρ/ρ_0 LE LONG DU CONTOUR DE LA TUYERE DOUBLE GALBE ENTRE CFD (ANSYS- FLUENT) ET LA SIMULATION NUMERIQUE (MOC)	62
FIGURE 4.32 : ALLURE DES CONTOURS DE LA TUYERE TRIDIMENSIONNELLE	63
DOUBLE GALBE A SECTION DE SORTIE CARRE.....	63
FIGURE 4.33 : ALLURE DES CONTOURS DE LA TUYERE TRIDIMENSIONNELLE	64
FIGURE 4.34 : ALLURE DES CONTOURS DE LA TUYERE TRIDIMENSIONNELLE	65
DOUBLE GALBE A SECTION DE SORTIE HEXAGONALE.....	65
FIGURE 4.35 : ALLURE DES CONTOURS DE LA TUYERE TRIDIMENSIONNELLE	66
DOUBLE GALBE A SECTION DE SORTIE RECTANGULAIRE.....	66
FIGURE 4.36 : ALLURE DES CONTOURS DE LA TUYERE TRIDIMENSIONNELLE	67
DOUBLE GALBE A SECTION DE SORTIE ELLIPTIQUE	67
FIGURE 4.37 : VARIATION DU NOMBRE DE MACH LE LONG DES CONTOURS DES TUYERES	68
TRIDIMENSIONNELLES DE TYPE DOUBLE GALBE	68
FIGURE 4.38 : VARIATION DU RAPPORT DE TEMPERATURE T/T_0 LE LONG DES CONTOURS DES TUYERES.....	69
TRIDIMENSIONNELLES DE TYPE DOUBLE GALBE	69

FIGURE 4.39 : VARIATION DU RAPPORT DE PRESSION P/P_0 LE LONG DES CONTOURS DES TUYERES.....	70
TRIDIMENSIONNELLES DE TYPE DOUBLE GALBE	70
FIGURE 4.40 : VARIATION DU RAPPORT DE DENSITE ρ/ρ_0 LE LONG DES CONTOURS DES TUYERES.....	70
TRIDIMENSIONNELLES DE TYPE DOUBLE GALBE	70
FIGURE 4.41 : COMPARAISON DU RAPPORT DE PRESSION P/P_0 DANS UNE TUYERE MLN CIRCULAIRE POUR LES MODELES NON VISQUEUX, K-E ET K- Ω SST.....	71
FIGURE 4.42: COMPARAISON DU RAPPORT DE PRESSION P/P_0 DANS UNE TUYERE DOUBLE GALBE CIRCULAIRE POUR LES MODELES NON VISQUEUX, K-E ET K- Ω SST.	72
FIGURE 4.43 : ALLURE DES CONTOURS DU NOMBRE DE MACH LE LONG DE LA TUYERE MLN CIRCULAIRE SOUS DIFFERENTES VALEURS DE NPR.	73
FIGURE 4.44 : VARIATION DU RAPPORT DE LA PRESSION STATIQUE P/P_0 LE LONG DE LA TUYERE MLN CIRCULAIRE POUR DIFFERENTES VALEURS DE NPR.....	74
FIGURE 4.45 : ALLURE DES CONTOURS DU NOMBRE DE MACH LE LONG DE LA TUYERE DOUBLE GALBE CIRCULAIRE SOUS DIFFERENTES VALEURS DE NPR.....	75
LES COURBES DE RAPPORT DE LA PRESSION STATIQUE P/P_0 LE LONG DE LA TUYERE.....	75
FIGURE 4.46 : VARIATION DU RAPPORT DE LA PRESSION STATIQUE P/P_0 LE LONG DE LA TUYERE DOUBLE GALBE CIRCULAIRE POUR DIFFERENTES VALEURS DE NPR.	76

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 4.1 : CALCUL D'ERREUR ENTRE LES RESULTATS PAR SIMULATION ANSYS-FLUENT ET NUMERIQUE	45
TABLEAU 4.2 : CALCUL D'ERREUR ENTRE LES RESULTATS DES TUYERES MLN DE FORME CIRCULAIRE ET CARRE	47
TABLEAU 4.3 : CALCUL D'ERREUR ENTRE LES RESULTATS DES TUYERES MLN DE FORME CIRCULAIRE ET CIRCULAIRE PLACEE VERTICALEMENT	49
TABLEAU 4.4 : CALCUL D'ERREUR ENTRE LES RESULTATS DES TUYERES MLN DE FORME CIRCULAIRE ET HEXAGONALE	51
TABLEAU 4.5 : CALCUL D'ERREUR ENTRE LES RESULTATS DES TUYERES MLN DE FORME CIRCULAIRE ET RECTANGULAIRE.....	53
TABLEAU 4.6 : CALCUL D'ERREUR ENTRE LES RESULTATS DES TUYERES MLN DE FORME CIRCULAIRE ET ELLIPTIQUE	55
TABLEAU 4.7 : CALCUL D'ERREUR ENTRE LES RESULTATS PAR SIMULATION ANSYS-FLUENT ET NUMERIQUE	62
TABLEAU 4.8 : CALCUL D'ERREUR ENTRE LES RESULTATS DES TUYERES DOUBLE GALBE DE FORME CIRCULAIRE ET CARRE	64
TABLEAU 4.9 : CALCUL D'ERREUR ENTRE LES RESULTATS DES TUYERES DOUBLE GALBE DE FORME CIRCULAIRE ET CIRCULAIRE PLACEE VERTICALEMENT	65
TABLEAU 4.10 : CALCUL D'ERREUR ENTRE LES RESULTATS DES TUYERES DOUBLE GALBE DE FORME CIRCULAIRE ET HEXAGONALE	66

TABLEAU 4.11 : CALCUL D'ERREUR ENTRE LES RESULTATS DES TUYERES DOUBLE GALBE DE FORME CIRCULAIRE ET RECTANGULAIRE	67
TABLEAU 4.12 : CALCUL D'ERREUR ENTRE LES RESULTATS DES TUYERES DOUBLE GALBE DE FORME CIRCULAIRE ET ELLIPTIQUE	68

Nomenclature

A : Section de la tuyère

C : vitesse de son

M : Nombre de Mach

P_0 : La pression ambiante ou pression à l'extérieur en Pa

P_e : La pression à la sortie de la tuyère en Pa

P_{isen} : Pression isentropique

P_{ainf} : Pression ambiante inférieure

P_{tch} : La pression totale dans la chambre de combustion

s : La distance le long de la caractéristique.

T : Température, K

P : Pression, Nm^{-2}

X : Distance axiale, m

V : vitesse de l'écoulement

γ : Rapport des chaleurs spécifiques

\dot{M} : Le débit massique en Kg/s

A : Aire de la section de sortie de la tuyère en m^2

q_{eff} : La vitesse effective qui tient implicitement compte de la poussée au culot due à la pression relative s'exerçant sur la section de sortie.

A_c : Section au col

V_{eff} : La vitesse effective

θ : L'angle local de la ligne de courant,

Abréviation

CFD : Computational Fluid Dynamics

2D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

NPR : Nozzle Pressure Ratio ou taux de détente

INTRODUCTION GENERALE

Le développement des systèmes de propulsion aéronautique et spatiale repose en grande partie sur la capacité à optimiser les composants responsables de la génération de poussée. La tuyère supersonique, en particulier, joue un rôle central dans la conversion de l'énergie thermique en énergie cinétique dirigée, selon les lois de la mécanique des fluides compressibles.

Parmi les différentes architectures de tuyères, celles à longueur minimale (MLN) et à double galbe représentent deux approches de conception avancées, cherchant à maximiser l'expansion isentropique tout en minimisant la masse et l'encombrement. Bien que ces profils puissent être dérivés analytiquement, leur analyse réelle — notamment en trois dimensions — nécessite des outils numériques capables de capturer les effets complexes de la viscosité, des gradients thermiques et des interactions géométriques.

Dans les conditions de fonctionnement à haute température typiques des moteurs fusées modernes, les hypothèses de gaz parfait deviennent insuffisantes : le rapport des chaleurs spécifiques γ , la capacité calorifique C_p , la viscosité μ et d'autres propriétés thermodynamiques deviennent fonctions de la température. Un modèle haute température (HT) est alors requis pour obtenir une représentation plus réaliste du comportement du gaz.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail, qui a pour objectif de simuler par CFD les écoulements supersoniques, visqueux et non visqueux, dans deux familles de tuyères tridimensionnelles :

- les tuyères MLN (à longueur minimale),
- les tuyères à double galbe.

Les géométries étudiées présentent des sections non axisymétriques de formes diverses (carrée, hexagonale, elliptique, demi-elliptique, rectangulaire). L'étude vise à comparer l'impact de la forme de la section et du type de contour (MLN vs double galbe) sur les performances aérodynamiques, en se basant sur des critères tels que le champ de Mach, les gradients de pression, l'évolution thermique et les éventuelles pertes par onde de choc.

INTRODUCTION GENERALE

La simulation numérique est structurée en quatre étapes principales :

1. Génération des géométries 3D dans SolidWorks et importe ce dernier dans Design Modeler,
2. Maillage du domaine fluide dans Meshing,
3. Résolution numérique sous ANSYS Fluent avec le modèle HT,
4. Visualisation et analyse des résultats.

Ce travail permettra de mieux comprendre les effets couplés de la géométrie, de la viscosité et des conditions thermiques extrêmes sur l'écoulement, tout en évaluant la pertinence de chaque profil dans des configurations tridimensionnelles réalistes.

CHAPITRE 1 :
GENERALITES SUR LES TUYERES
SUPERSONIQUES

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES TUYERES SUPERSONIQUES

1.1 Introduction aux écoulements compressibles

Dans les systèmes de propulsion modernes, les écoulements de gaz se produisent à des vitesses élevées où les effets de compressibilité ne peuvent être négligés. Un écoulement compressible est défini par la variation significative de la densité du fluide en fonction de la pression et de la température. Ce comportement devient particulièrement important dès que le **nombre de Mach** du fluide dépasse la valeur 0,3, seuil à partir duquel la densité commence à évoluer de manière sensible avec la vitesse [19].

En régime **supersonique** ($Mach > 1$), l'écoulement devient dominé par des effets non linéaires et irréversibles, tels que l'apparition d'ondes de choc, de chocs obliques, de détente isentropiques ou encore de séparations de couches limites. Ces phénomènes affectent profondément la stabilité, la performance et l'efficacité des systèmes propulsifs.

L'équation de conservation de la masse, combinée à celle de l'énergie totale et aux équations de l'état pour un gaz parfait, permet de déduire des relations fondamentales reliant la surface de la tuyère, le nombre de Mach et les propriétés thermodynamiques. Ces relations sont à la base de la conception des **tuyères supersoniques**.

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[\frac{2}{\gamma + 1} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (1.1)$$

où :

- A^* est la surface au col (où $Mach = 1$),
- M est le nombre de Mach local,
- γ est le rapport des capacités calorifiques du gaz.

Cette expression révèle que pour accélérer un fluide au-delà de Mach 1, une **zone divergente** est nécessaire. C'est sur ce principe que reposent toutes les **tuyères supersoniques convergentes-divergentes (C-D)** utilisées dans les moteurs-fusées et autres systèmes propulsifs [19,20].

1.2 Typologie des tuyères supersoniques

La diversité des applications et des contraintes opérationnelles a conduit à l'apparition de plusieurs types de tuyères supersoniques, chacun avec ses avantages, ses limitations, et ses domaines d'utilisation spécifiques.

1.2.1 Tuyère convergente-divergente (de Laval)

La **tuyère de Laval** est la forme la plus simple. Elle comporte une partie convergente jusqu'au col (où $M=1$) puis une partie divergente dans laquelle l'écoulement devient supersonique. La géométrie est souvent axisymétrique et calculée pour un **rapport de pression (NPR)** optimal. Toutefois, en dehors de ce régime optimal, elle devient sujette à la **surdétente** ou à la **sous-détente**, induisant des ondes de choc ou des éventails de détente [19].

1.2.2 Tuyère à longueur minimale (MLN)

Les **tuyères MLN** sont spécifiquement conçues pour réduire au maximum la longueur physique nécessaire à l'obtention du Mach de sortie souhaité. Leur contour est défini à l'aide de la **Méthode des Caractéristiques (MOC)**, qui permet de propager les lignes de Mach à partir du col sans générer d'onde de choc. Cela conduit à une expansion **isentropique idéale**, avec une réduction significative de la longueur par rapport aux tuyères classiques [21].

Cette caractéristique est particulièrement recherchée dans les moteurs embarqués où le poids et le volume sont critiques. Néanmoins, les MLN sont souvent plus sensibles aux conditions limites et à la nature du gaz utilisé. C'est pourquoi leur analyse via CFD dans des configurations tridimensionnelles est essentielle pour valider leur comportement dans des conditions réelles.

1.2.3 Tuyère à double détente (Dual Bell)

La **tuyère à double galbe** offre une géométrie multi-profil adaptée à des conditions d'altitude variables. Elle permet un fonctionnement initial en mode court, suivi d'un **réattachement** progressif du flux au-delà d'un certain seuil de pression ambiante, permettant un passage en mode long. Cette technologie a été explorée dans des projets de lanceurs spatiaux comme **Ariane**, ou dans des concepts de moteurs réutilisables comme ceux de **SpaceX** [22].

GENERALITES SUR LES TUYERES SUPERSONIQUES

1.2.4 Tuyères de formes spéciales

Dans certains cas, la section de sortie de la tuyère n'est pas circulaire, mais **carrée, elliptique, hexagonale, demi-elliptique, etc.** Ces géométries sont étudiées pour :

- améliorer l'intégration dans des structures non cylindriques,
- mieux contrôler la direction de poussée,
- ou optimiser l'échange thermique et la résistance structurale.

L'étude de ces formes complexes nécessite une approche tridimensionnelle assistée par CFD, comme c'est le cas dans ce mémoire.

1.3 Régimes de fonctionnement des tuyères supersoniques

Le comportement d'une tuyère supersonique dépend fortement du **rapport de pression amont-aval**, désigné par le sigle **NPR (Nozzle Pressure Ratio)**, défini comme :

$$NPR = \frac{P_{entrée}}{P_{sortie}} \quad (1.2)$$

Où $P_{entrée}$ est la pression de la chambre de combustion, et P_{sortie} la pression de l'environnement.

Trois régimes principaux sont identifiés :

a. Détente idéale

Dans le cas d'un **NPR optimal**, la pression en sortie de tuyère est exactement égale à la pression ambiante. Aucun choc ou ventail n'apparaît. L'écoulement est parfaitement adapté. Ce cas est théorique et rarement observé dans les conditions variables de vol [19].

GENERALITES SUR LES TUYERES SUPERSONIQUES

b. Sous-détente (Underexpanded)

Lorsque $P_{\text{sortie}} > P_{\text{ambiante}}$, le jet continue de se détendre après la sortie de la tuyère, générant des **éventails de détente (expansion fans)** suivis d'**ondes de choc obliques**. Ces effets peuvent réduire l'efficacité propulsive et perturber la stabilité du jet [20].

c. Sur-détente (Overexpanded)

Si $P_{\text{sortie}} < P_{\text{ambiante}}$, le jet rencontre un excès de pression externe. Des **ondes de choc internes** apparaissent, susceptibles d'entraîner la **séparation de l'écoulement** à l'intérieur même de la tuyère, ce qui provoque des instabilités de poussée et des pertes importantes [21].

Le cas des tuyères MLN est plus délicat : étant très courtes et optimisées pour une expansion isentropique, elles sont plus sensibles à ces variations de pression et nécessitent un dimensionnement très précis [25].

1.4 La Méthode des Caractéristiques (MOC)

1.4.1 Origines et fondement mathématique

La **Méthode des Caractéristiques** est un outil analytique puissant permettant de résoudre les **équations hyperboliques** de l'écoulement compressible en régime supersonique. Elle est basée sur le fait que les perturbations dans ce type d'écoulement ne se propagent que selon deux directions : les **lignes caractéristiques** notées C^+ et C^- [22].

Les équations de compatibilité pour un gaz parfait isentropique sont données par :

$$d\theta \pm \frac{a}{V} dV = 0 \quad (1.3)$$

Où θ est l'angle local de la ligne de courant, V la vitesse du gaz et a la célérité du son. En coordonnées de Mach, on obtient :

$$d\theta \pm \frac{\tan \mu}{M} dM = 0 \quad \text{avec} \quad \mu = \sin^{-1} \left(\frac{1}{M} \right) \quad (1.4)$$

GENERALITES SUR LES TUYERES SUPERSONIQUES

Cela permet de déterminer à chaque point du champ :

- Le **nombre de Mach**,
- L'**angle de la ligne de courant**,
- L'**inclinaison de la paroi** à adopter pour maintenir l'expansion sans choc.

1.4.2 Application à la conception de profils MLN

Partant d'un col où $M=1$, on génère par propagation successive le contour de la tuyère jusqu'au Mach cible (par exemple $M=2$). Les caractéristiques sont propagées en formant des réseaux de points où s'appliquent les équations précédentes. Le **profil de la paroi** est ajusté pour coïncider avec les lignes caractéristiques externes.

C'est cette méthode qui est utilisée dans ce travail pour générer les profils de base des tuyères MLN avant extrusion ou modification géométrique 3D. Elle constitue le point de départ fondamental de toute la chaîne de simulation [21, 25].

1.5 Modèles physiques : gaz parfait (GP) vs haute température (HT)

La MOC classique suppose un **gaz parfait** avec $\gamma=\text{constante}$. Or, à haute température ($T>2000\text{ K}$), cette hypothèse devient invalidée par :

- La **variation de γ** avec la température (jusqu'à 1.1 ou 1.05),
- L'évolution de la **capacité calorifique $C_p(T)$** ,
- La modification de la **viscosité $\mu(T)$** selon les lois de Sutherland,
- Et parfois la **dissociation moléculaire** ($O_2 \rightarrow O$, $N_2 \rightarrow N$) dans les mélanges réactifs [22, 26].

Pour adapter la MOC à ces conditions, on introduit des **tableaux thermodynamiques** ou des **modèles polynomiaux** interpolant les données issues de codes comme **CEA (Chemical Equilibrium with Applications)** ou **NIST**. La résolution devient alors numérique et non plus purement analytique.

Dans notre projet, les profils MOC ont été calculés en version GP, puis les écoulements ont été simulés avec deux modèles CFD :

- Le **modèle GP**, avec $\gamma=1.4$,
- Le **modèle HT**, avec $\gamma(T)$, $C_p(T)$, $\mu(T)$ intégrés via Fluent [28].

GENERALITES SUR LES TUYERES SUPERSONIQUES

1.6 Contraintes thermiques et choix des matériaux

Dans les tuyères supersoniques, notamment dans les moteurs-fusées, les températures des gaz d'éjection peuvent atteindre **2800 à 3500 K**, selon le type de carburant utilisé. Cette élévation thermique engendre des contraintes mécaniques et thermochimiques extrêmes sur les parois de la tuyère [19][26].

Les principaux défis thermiques sont :

- La **résistance à l'oxydation**,
- La **déformation plastique à haute température**,
- La **fatigue thermique** due aux cycles d'allumage-extinction,
- Et l'apparition de **gradients thermiques importants** dans les régions proches du col.

Pour y répondre, plusieurs stratégies sont utilisées :

- Matériaux réfractaires (alliages de **Ni, tungstène, molybdène**),
- **Composites carbone-carbone** dans les lanceurs réutilisables,
- **Revêtements ablatifs** dans les moteurs à usage unique,
- Systèmes de **refroidissement régénératif** (circulation du carburant à travers les parois) [2].

Dans le cadre de ce travail, ces effets ne sont pas modélisés dans le solveur CFD, mais ils constituent une limite importante à prendre en compte dans l'interprétation des performances.

1.7 Aspects géométriques tridimensionnels

Alors que les profils MOC sont calculés en régime **axisymétrique**, les tuyères testées ici ont des sections transversales **non circulaires**. Cette généralisation introduit des effets tridimensionnels importants :

a. Géométries testées

Les formes testées dans ce mémoire sont :

- **Carrée**
- **Rectangulaire**
- **Elliptique**
- **Demi-elliptique**
- **Hexagonale**

GENERALITES SUR LES TUYERES SUPERSONIQUES

Chacune de ces géométries induit une déformation spécifique des **lignes de courant**, et par conséquent :

- des zones de **gradient de pression localisé**,
- des **concentrations de contraintes** près des arêtes,
- et parfois des **zones de recirculation** en cas de sur-détente.

b. Impact sur l'écoulement

Les simulations montrent que :

- Les coins dans les tuyères carrées provoquent des **accélérations locales non symétriques**,
- Les formes elliptiques offrent une meilleure distribution de la vitesse, mais nécessitent une **extrusion plus complexe**,
- Les géométries asymétriques (comme la demi-ellipse) posent des **défis particuliers de maillage et de post-traitement** [25, 28].

Ces résultats montrent que le passage du modèle axisymétrique MOC à une géométrie réelle 3D impose une validation numérique rigoureuse.

1.8 Évolutions et perspectives industrielles

L'optimisation des tuyères supersoniques s'inscrit dans un effort plus large de conception de moteurs :

- **réutilisables** (SpaceX, Blue Origin),
- **plus légers** (composites thermo-structuraux),
- **intégrés structurellement** (tuyères en impression 3D),
- et parfois **adaptatifs** (tuyères à déformation active, injection de fluide pour contrôle d'onde de choc) [27].

Les tuyères MLN, bien que compactes et efficaces, sont encore peu utilisées dans l'industrie en raison de leur sensibilité à la sur-détente. Les travaux de recherche, comme celui présenté ici, contribuent à mieux en comprendre les limites et les potentiels.

1.9 Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir un cadre théorique solide pour l'analyse des tuyères supersoniques. Il a présenté les fondements de la dynamique des gaz compressibles, les régimes d'écoulement en tuyère, les différentes géométries possibles, ainsi qu'une explication détaillée de la Méthode des Caractéristiques. Il a aussi mis en lumière l'importance d'intégrer les effets thermodynamiques réels à haute température, et les particularités liées aux géométries 3D.

Ces connaissances sont essentielles pour aborder la méthodologie de conception présentée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2 :
MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES
TUYÈRES SUPERSONIQUES

CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES TUYÈRES SUPERSONIQUES

2.1 Introduction

La conception d'une tuyère supersonique ne peut se limiter à des considérations empiriques ou géométriques. Elle exige une compréhension fine des mécanismes de l'écoulement compressible et des outils analytiques permettant de tracer un contour de tuyère optimisé. L'objectif principal est de permettre une expansion progressive et contrôlée du gaz en évitant la formation d'ondes de choc internes, tout en garantissant une poussée maximale et une stabilité de jet [19].

Dans ce chapitre, nous présentons la **méthodologie complète de conception** mise en œuvre dans ce travail, basée sur :

- La **Méthode des Caractéristiques (MOC)** pour la génération de profils MLN dans le cas **axisymétrique**,
- Son extension aux conditions de **haute température (HT)**, plus réalistes dans les moteurs modernes,
- Et enfin, la **généralisation en géométrie tridimensionnelle** à travers deux méthodes de modélisation des **lignes de courant dans l'espace**.

2.2 Méthode des Caractéristiques (MOC) à Haute Température

2.2.1 Rappel du principe en gaz parfait

La Méthode des Caractéristiques est une approche analytique destinée à résoudre les **équations différentielles hyperboliques** de l'écoulement supersonique isentropique. Pour un gaz parfait, ces équations s'expriment en coordonnées caractéristiques C^+ et C^- comme suit [21] :

$$\frac{d\theta}{ds} \pm \frac{1}{M} \cdot \sqrt{M^2 - 1} = 0 \quad (2.1)$$

On distingue :

- les **lignes C^+** (caractéristique montante),
- les **lignes C^-** (caractéristique descendante).

L'ensemble des caractéristiques permet de construire un **champ d'expansion** isentropique. À partir du col (où $M=1$, $\theta=0$), on propage ces caractéristiques jusqu'à un Mach de sortie souhaité (ex. : $M=2$).

2.2.2 Adaptation aux conditions de haute température

Dans les moteurs-fusées ou les statoréacteurs, les températures en chambre de combustion dépassent fréquemment **2500 à 3000 K**. À ces niveaux, l'hypothèse de gaz parfait devient invalide :

- Le rapport des capacités calorifiques γ devient **fonction de la température** :

$$\gamma(T) = \frac{C_p(T)}{C_v(T)} \quad (2.2)$$

- Le **Cp** varie lui aussi avec T de manière non linéaire,
- Les gaz subissent parfois une **dissociation moléculaire**, modifiant leur composition :



Ces effets doivent être introduits dans la MOC par :

- Des **relations empiriques** (polynômes de $C_p(T)$, $\gamma(T)$),
- Des **interpolations de tables thermodynamiques** (CEA, NIST),
- Une **résolution numérique locale** des équilibres thermochimiques.

La méthode devient donc **semi-analytique** : à chaque point de propagation, les propriétés thermodynamiques sont recalculées, et les angles θ ajustés pour respecter la compatibilité.

Dans notre projet, ces effets ont été intégrés dans le générateur de profils MLN, puis les profils obtenus ont servi à construire des **géométries 3D**, comme décrit ci-après.

L'écoulement subsonique convergent est multidimensionnel et donc légèrement incurvé. Cependant, pour simplifier, la ligne sonore est supposée droite. De plus, en raison de la symétrie de l'écoulement autour de l'axe de la buse, le contour n'a besoin d'être calculé que pour un seul côté de la buse. Cette symétrie s'applique à la fois aux calculs bidimensionnels et tridimensionnels.

Pour les analyses bidimensionnelles, les relations définies comme constantes dans l'équation sont vraies le long des lignes caractéristiques et les constantes sont appelées invariants.

- **Conception De tuyere Conique**

Afin de mieux comprendre le MOC et la théorie associée, un code bidimensionnel pour produire le profil d'une buse conique a été créé. L'algorithme de calcul des caractéristiques d'une buse conique constitue la base des algorithmes pour les conceptions de buses à cloche bidimensionnelles et tridimensionnelles avec le MOC. La méthodologie mise en œuvre est la suivante.

Les conditions initiales et les propriétés du gaz sont fournies, notamment le demi-angle de la buse, le nombre de lignes caractéristiques, les conditions de gorge sonore et le coefficient adiabatique du gaz. Un rayon de gorge unitaire a été utilisé dans chaque analyse pour non dimensionner les rayons résultants. À partir des conditions initiales, les invariants (I^+ et I^-) au premier point le long de l'axe d'écoulement peuvent être déterminés en déterminant ω , la fonction de Prandtl-Meyer.

L'expansion de Prandtl-Meyer permet de calculer la fonction de Prandtl-Meyer à l'intersection de la première ligne caractéristique et de la paroi de la buse, donnant les invariants à ce point.

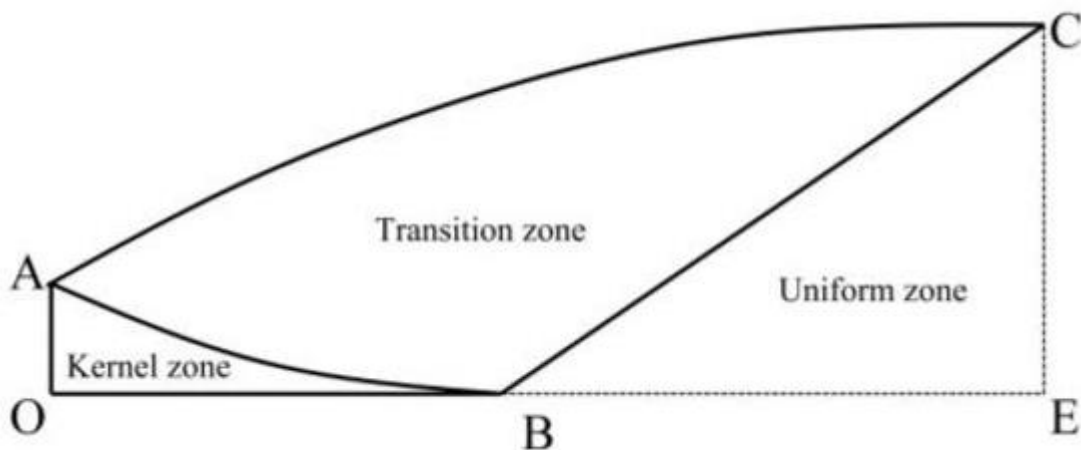


Figure 2.1 .: Diagramme des zones liées à la conception de la tuyere MOC

MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES TUYÈRES SUPERSONIQUES

Comme la valeur de θ au mur est imposée, ω peut être obtenu simplement $w_i = \theta \, l_i$ -. Les invariants positifs I_+ dans la zone de transition sont ensuite déterminés à partir de définitions. Les invariants dans tout le champ d'écoulement sont connues et les valeurs restantes de θ , ω , nombre de Mach et μ peuvent facilement être trouvées.

La dernière étape consiste à déterminer la position de chaque point dans les coordonnées cartésiennes. L'inclinaison des invariants est définie dans l'équation . Ainsi, la position des nœuds peut être trouvée par simple trigonométrie.

La longueur de la buse est le minimum qui fournit une vitesse de sortie uniforme. Cette condition est remplie lorsque la caractéristique finale coupe la paroi de la buse, ligne BC sur la figure 2.1.

Un exemple des résultats pour la conception de buse conique simple est présenté à la figure 2.2

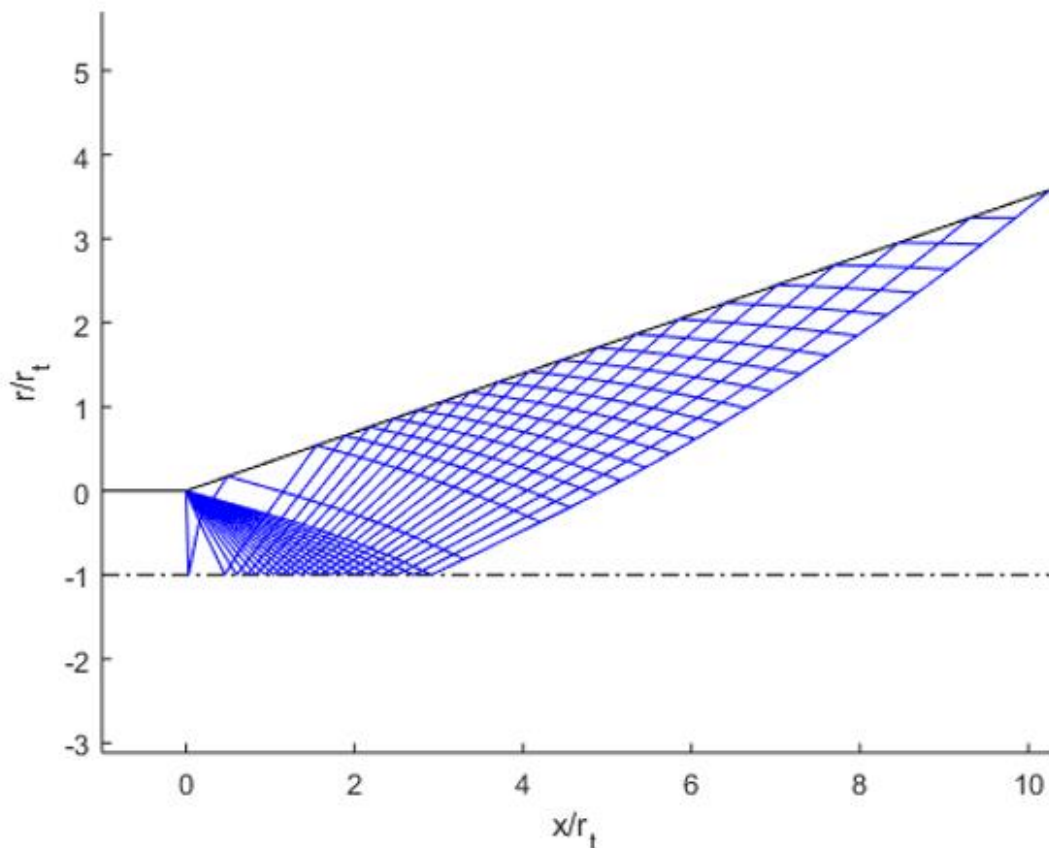


Figure 2.2.: Tuyère conique avec 20° demi-angle et 20 lignes caractéristiques.

- **Conception de tuyère de longueur minimale MLN**

Le code développé pour concevoir une buse MOC conique simple a été développé pour créer un code permettant de concevoir des buses supersoniques de longueur minimale avec des conditions de sortie uniformes en deux dimensions.

Les conditions initiales pour la buse de longueur minimale sont en grande partie les mêmes, cependant, au lieu de fournir un angle de paroi, le nombre de Mach de sortie est imposé.

Les étapes suivantes suivent le même algorithme mais au lieu de supposer une distribution linéaire des invariants, la distribution de Mach a été supposée linéaire et les invariants ont été calculés en fonction du nombre de Mach local, pour fournir une plus grande précision dans les calculs.

Un exemple simple du tracé résultant est illustré à la figure 2.3.

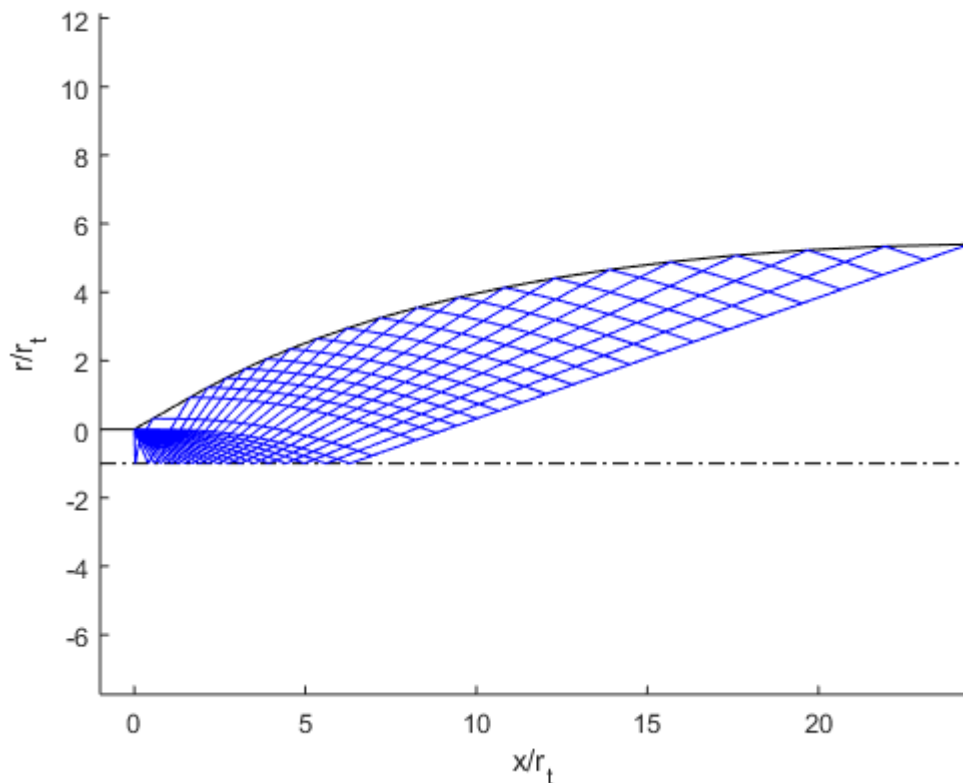


Figure 2.3.: Tuyère bidimensionnelle de longueur minimale avec $ME = 3$ et 20 lignes caractéristiques.

2.3 Modélisation tridimensionnelle des lignes de courant

Bien que la MOC fournisse un profil optimisé dans le plan axisymétrique, la réalité industrielle impose souvent des géométries 3D non circulaires. Pour prendre en compte ces formes (carrée, elliptique, hexagonale...), deux méthodes ont été adoptées.

2.3.1 Méthode 1 — Extrusion géométrique simple

Dans cette approche, le profil généré par la MOC est **extrudé** dans un plan non circulaire (ex. : carré, ellipse). On considère que l'expansion radiale reste équivalente, et l'on projette ce profil le long d'un contour défini par la section choisie.

Cette méthode a l'avantage de la simplicité :

- facile à modéliser dans **ANSYS DesignModeler**,
- compatible avec les maillages structurés ou balayés.

Toutefois, elle présente des limitations :

- elle suppose une **uniformité des lignes de courant**,
- elle **ne respecte pas les angles de paroi locaux** dans les coins,
- elle **surestime parfois les zones de compression** en 3D [25].

2.3.2 Méthode 2 — Interpolation surfacique multi-profils

La deuxième méthode consiste à générer plusieurs **profils MOC 2D** dans des plans azimutaux différents, puis à construire la **surface 3D complète** par **interpolation**. Cela permet d'adapter localement :

- les **angles de paroi**,
- la **progression du Mach**,
- et le **positionnement des lignes caractéristiques**.

Cette méthode est plus précise mais :

- plus complexe à modéliser,
- demande un **maillage raffiné** pour suivre les variations locales.

Dans notre étude, les deux méthodes ont été testées pour différentes formes de tuyères. Les résultats CFD montrent que la méthode 2 offre de meilleures prédictions en termes de stabilité de l'écoulement, de réduction des zones de stagnation et d'uniformité du champ de Mach [28].

2.4 Chaîne de conception intégrée

La méthodologie complète adoptée dans ce mémoire peut être résumée comme suit :

1. Conception analytique :

- Calcul du profil MOC (GP ou HT),
- Extraction du contour divergent.

2. Modélisation géométrique 3D :

- Choix d'une forme de section (carré, ellipse...),
- Application de la méthode 1 ou 2.

3. Simulation CFD :

- Mise en place du maillage (structuré ou non),
- Choix du modèle physique (GP ou HT),
- Simulation stationnaire dans ANSYS Fluent.

4. Analyse et validation :

- Extraction des lignes de courant,
- Comparaison des gradients de Mach, pression, température,
- Comparaison avec les hypothèses MOC.

CHAPITRE 3 :
SIMULATION NUMÉRIQUE
PAR ANSYS

CHAPITRE 3 : SIMULATION NUMÉRIQUE PAR ANSYS

3.1. INTRODUCTION

La simulation numérique constitue aujourd'hui un pilier fondamental de l'ingénierie moderne, en particulier dans le domaine aéronautique et spatial. L'essor des capacités de calcul et la sophistication croissante des logiciels spécialisés permettent de reproduire, avec un degré de précision remarquable, des phénomènes physiques complexes qui seraient difficiles, voire impossibles, à étudier expérimentalement. Dans le contexte de la propulsion aéronautique, la simulation numérique offre la possibilité de visualiser les écoulements internes, d'anticiper les performances des composants, et d'optimiser les géométries avant la phase de prototypage.

L'étude des tuyères, éléments essentiels des systèmes de propulsion, bénéficie grandement de ces avancées. Les écoulements qui y transitent sont souvent compressibles, turbulents, et soumis à des gradients de pression et de température très élevés. La simulation numérique permet de comprendre en détail la distribution des grandeurs physiques (pression, température, vitesse, nombre de Mach), d'identifier les zones de séparation ou de choc, et d'évaluer la poussée générée. Elle offre également la possibilité de tester virtuellement différentes configurations et conditions de fonctionnement, réduisant ainsi le coût et la durée des campagnes expérimentales.

Le logiciel **ANSYS Fluent** s'est imposé comme une référence dans le domaine de la dynamique des fluides numérique (CFD). Il propose une large gamme de modèles physiques (turbulence, transferts thermiques, réactions, multiphase), des outils performants de génération de maillage, et une interface de post-traitement avancée. Son intégration dans la plateforme **ANSYS Workbench** permet d'enchaîner de manière fluide toutes les étapes du processus de simulation, de la conception géométrique à l'analyse des résultats.

Dans ce chapitre, nous détaillons la méthodologie adoptée pour la simulation numérique de la tuyère MLN. Nous présenterons d'abord la plateforme ANSYS Workbench et l'architecture du logiciel Fluent, puis nous décrirons la procédure de résolution numérique, la préparation de la géométrie, la génération du maillage, la configuration des conditions aux limites, et enfin l'analyse et la validation des résultats obtenus [1,2,3].

3.2. Simulation ANSYS-Fluent

3.2.1. Présentation générale d'ANSYS Workbench

La plateforme ANSYS Workbench est conçue pour offrir un environnement intégré et modulaire, permettant de gérer l'ensemble du processus de simulation numérique. Elle centralise toutes les étapes du projet : conception de la géométrie, génération du maillage, configuration des modèles physiques, résolution numérique et post-traitement des résultats. Cette centralisation garantit la cohérence des données, facilite la traçabilité des modifications et permet une automatisation avancée des études paramétriques ou d'optimisation [2].

Les avantages d'ANSYS Workbench

- **Interface graphique intuitive :** Workbench propose un espace de travail visuel où chaque module (Design Modeler, Meshing, Fluent, CFD-Post) est représenté par un bloc connecté, facilitant la navigation entre les différentes étapes.
- **Interopérabilité :** Les données (géométrie, maillage, conditions aux limites) sont transférées automatiquement d'un module à l'autre, réduisant les risques d'erreur humaine.
- **Gestion de projet :** Il est possible de sauvegarder chaque étape, de revenir sur des versions antérieures, et de comparer différentes configurations.
- **Automatisation :** Workbench permet de lancer des études de sensibilité, des analyses paramétriques ou des optimisations multi-objectifs, en modifiant automatiquement les paramètres d'entrée et en collectant les résultats de sortie [2].

Utilisation typique dans un projet de tuyère

1. **Création de la géométrie :** Réalisée dans Design Modeler, la géométrie de la tuyère (souvent axisymétrique ou circulaire) est définie à partir des dimensions issues du dimensionnement théorique.
2. **Génération du maillage :** Dans ANSYS Meshing, le maillage est généré en tenant compte des zones critiques (col, divergence, parois), avec des stratégies avancées comme le multi-zone, l'inflation des couches limites, et le contrôle précis des tailles de cellule.

3. **Configuration de la simulation** : Dans Fluent, on importe le maillage, on définit les conditions aux limites (pression, température, parois adiabatiques), on sélectionne les modèles physiques (gaz parfait, turbulence k- ω SST), et on paramètre le solveur.
4. **Résolution numérique** : Le calcul est lancé, la convergence est suivie à l'aide des résidus et de la stabilité des grandeurs physiques.
5. **Post-traitement** : Dans CFD-Post, on analyse les résultats : profils de Mach, distribution de pression, visualisation des lignes de courant, extraction de la poussée, etc [2,4].

3.2.2. Architecture du logiciel FLUENT

Le logiciel **ANSYS Fluent** est structuré autour de plusieurs modules principaux, chacun jouant un rôle spécifique dans la chaîne de simulation :

3.2.2.1. Le processeur : Design Modeler et ANSYS Meshing

- **Design Modeler** : Permet de créer et de modifier la géométrie de la tuyère. Pour la MLN, une géométrie circulaire a été retenue, optimisée pour la symétrie de l'écoulement et la robustesse mécanique. On peut y appliquer des simplifications (symétries, suppression de détails secondaires) pour réduire le coût de calcul sans compromettre la physique essentielle.
- **ANSYS Meshing** : Génère le maillage du domaine. Les paramètres utilisés dans ce travail sont :
 - **Edge sizing** : contrôle la taille des cellules le long des arêtes principales
 - **Inflation** : des couches pour capter la couche limite près des parois
 - **Multi-zone** : Permet de combiner des maillages structurés et non structurés selon la complexité géométrique
 - **Face sizing** : sur les faces principales
 - **Nombre total d'éléments** : 197 911, issu d'une étude de sensibilité pour garantir la précision sans exploser le temps de calcul [2,5].

3.2.2.2. Le solveur Fluent

- **Fluent** : C'est le cœur du calcul CFD. Il permet de résoudre les équations de Navier-Stokes pour des écoulements compressibles et turbulents, en intégrant des modèles avancés (turbulence, transferts thermiques, réactions chimiques, multi-phase). L'utilisateur configure les conditions aux limites, sélectionne les modèles de turbulence (ici $k-\omega$ SST, adapté aux écoulements internes avec séparation possible), définit les propriétés du fluide (gaz parfait), puis lance la résolution numérique [2,5].

3.2.2.3. Le post-processeur CFD-Post

- **CFD-Post** : Outil d'analyse et de visualisation des résultats. Permet de générer des contours de pression, température, Mach, des lignes de courant, des coupes, des profils axiaux et radiaux, et d'extraire des grandeurs globales (débit massique, poussée, rendement). Le post-traitement est essentiel pour interpréter les résultats, valider la simulation et identifier d'éventuelles anomalies ou zones d'amélioration [2,5].

3.2.3. Limites et perspectives de la simulation numérique

Bien que la simulation numérique offre de nombreux avantages (précision, flexibilité, réduction des coûts), elle présente aussi des limites :

- **Dépendance à la qualité du maillage** et à la justesse des modèles physiques
- **Coût en temps de calcul** pour les géométries complexes ou les maillages très fins
- **Nécessité d'une validation expérimentale** pour garantir la pertinence des résultats

Les perspectives d'amélioration incluent l'utilisation de maillages adaptatifs, l'intégration de modèles multiphysiques (fluid-structure interaction), et l'automatisation des études d'optimisation [2,5].

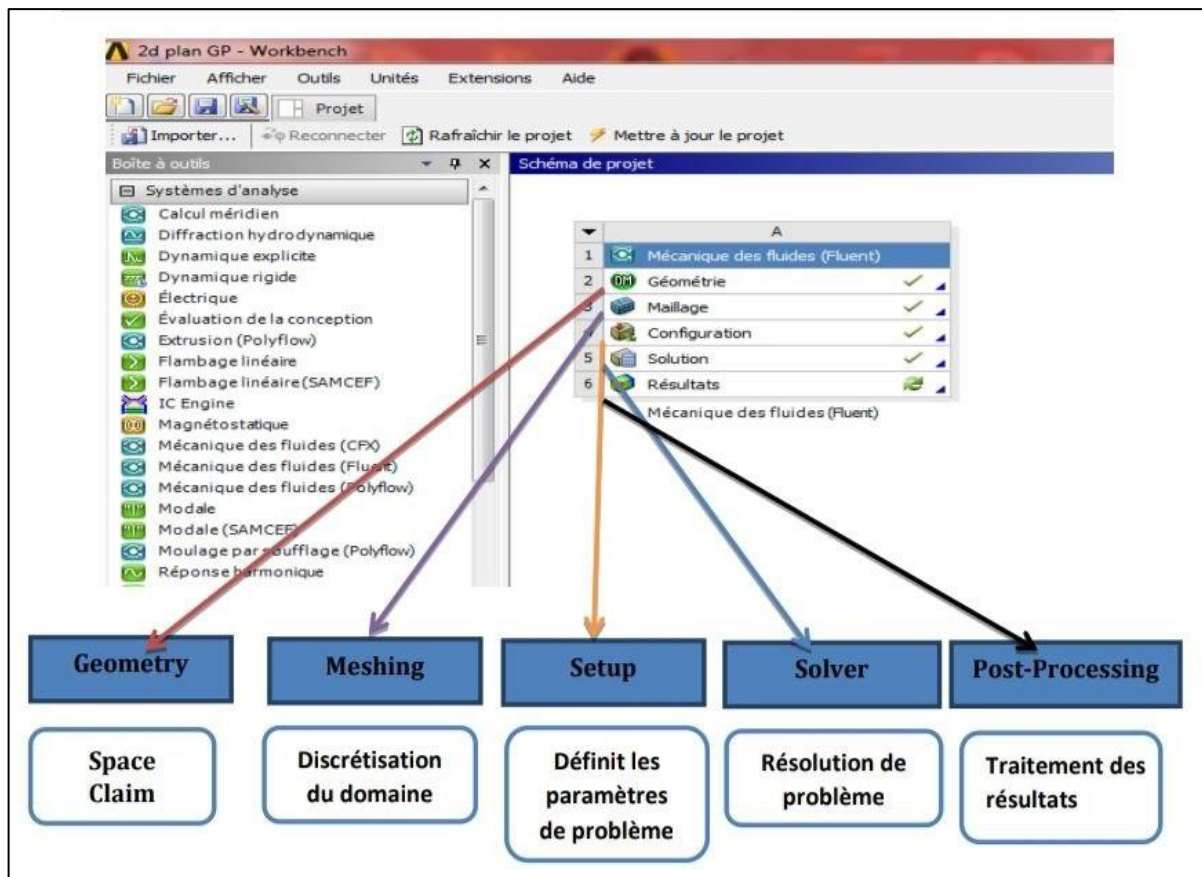


Figure 3.1 : les principales étapes d'ANSYS Fluent

3.3. Procédure de résolution numérique par « Fluent »

La résolution numérique des écoulements dans une tuyère supersonique nécessite une méthodologie rigoureuse et structurée. ANSYS Fluent utilise la méthode des volumes finis, qui consiste à discrétiser le domaine de calcul en un ensemble de volumes de contrôle, puis à résoudre les équations de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie) sur chacun de ces volumes. Cette approche garantit la conservation des flux à travers les interfaces des cellules, ce qui est particulièrement important pour les écoulements compressibles [2, 6, 7].

3.3.1. Équations fondamentales et modèles physiques

Les équations gouvernant l'écoulement dans une tuyère sont les équations de Navier-Stokes compressibles, qui s'écrivent sous forme conservative :

- **Équation de continuité** : Elle exprime la conservation de la masse.
- **Équations de quantité de mouvement** : Elles traduisent la conservation de la quantité de mouvement selon les trois directions de l'espace.
- **Équation d'énergie** : Elle représente la conservation de l'énergie totale.

Pour les écoulements turbulents, ces équations sont moyennées selon la décomposition de Reynolds (RANS - Reynolds-Averaged Navier-Stokes), ce qui introduit des termes supplémentaires (tensions de Reynolds) nécessitant des modèles de fermeture.

Le choix du modèle de turbulence est crucial pour la précision des résultats. Dans le cas des tuyères, le modèle $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) est souvent privilégié car il combine les avantages du modèle $k-\epsilon$ dans les zones d'écoulement libre et du modèle $k-\omega$ près des parois, ce qui le rend particulièrement adapté aux écoulements avec gradients de pression adverses et risques de séparation [2, 6,7].

3.3.2. Discrétisation et schémas numériques

La discrétisation spatiale des équations gouvernantes repose sur plusieurs schémas numériques :

- **Schémas de convection** : Upwind du premier ou du second ordre, QUICK, etc.
- **Schémas de diffusion** : Généralement du second ordre centré.
- **Couplage pression-vitesse** : Algorithmes SIMPLE, SIMPLEC, PISO ou Coupled.

Pour les écoulements supersoniques, les schémas upwind du second ordre sont recommandés pour la discrétisation des termes convectifs, car ils offrent un bon compromis entre précision et stabilité. Le solveur basé sur la densité (density-based) est généralement préféré pour les écoulements compressibles à haut nombre de Mach, car il résout simultanément les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie [2, 6,7].

3.3.3. Conditions aux limites et initialisation

Les conditions aux limites doivent être définies avec soin pour reproduire fidèlement les conditions de fonctionnement de la tuyère :

- **Entrée** : Pression totale, température totale, direction de l'écoulement.
- **Sortie** : Pression statique (atmosphérique pour une tuyère non adaptée).

- **Parois :** Condition de non-glissement (vitesse nulle) et condition thermique (adiabatique ou température imposée).
- **Axe :** Condition de symétrie axiale pour les tuyères axisymétriques.

L'initialisation du champ de calcul peut être uniforme (basée sur les conditions d'entrée) ou hybride (initialisation automatique par Fluent). Une bonne initialisation accélère la convergence et réduit le risque de divergence, particulièrement critique pour les écoulements supersoniques [2, 6,7].

3.3.4. Stratégie de convergence

La convergence d'une simulation de tuyère supersonique peut être délicate en raison des forts gradients et des discontinuités (chocs). Une stratégie efficace consiste à :

1. **Commencer par un cas simplifié :** Utiliser un modèle non visqueux ou un maillage grossier.
2. **Utiliser des facteurs de sous-relaxation adaptés :** Réduire ces facteurs pour stabiliser le calcul.
3. **Adopter une approche progressive :** Augmenter graduellement la pression d'entrée ou le rapport de détente.
4. **Surveiller plusieurs indicateurs de convergence :** Résidus, débits massiques, forces, grandeurs intégrales.

La convergence est généralement considérée comme atteinte lorsque les résidus normalisés sont inférieurs à 10^{-4} ou 10^{-5} , et que les grandeurs d'intérêt (débit, poussée) ne varient plus significativement [2, 6,7].

3.4. Simulation de la Tuyère axisymétrique de forme circulaire MLN

Nous avons réalisé une simulation portant sur un total de 12 tuyères appartenant à deux géométries différentes : MLN et Double Galbe. Dans ce travail, nous présentons les étapes de simulation pour une seule tuyère (Tuyère axisymétrique de forme circulaire MLN) à titre d'exemple. Les mêmes étapes seront appliquées aux autres configurations.

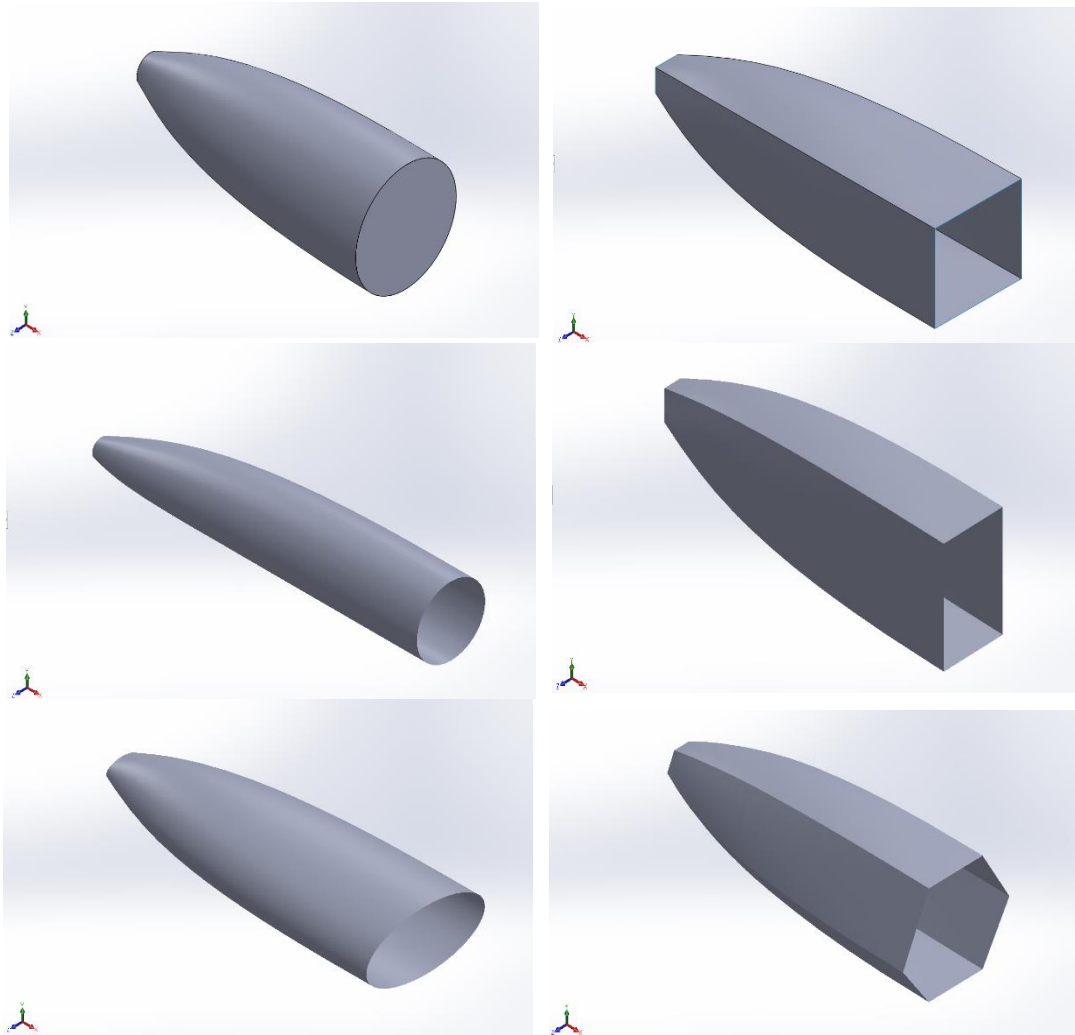


Figure 3.2 : les géométrie des tuyères MLN

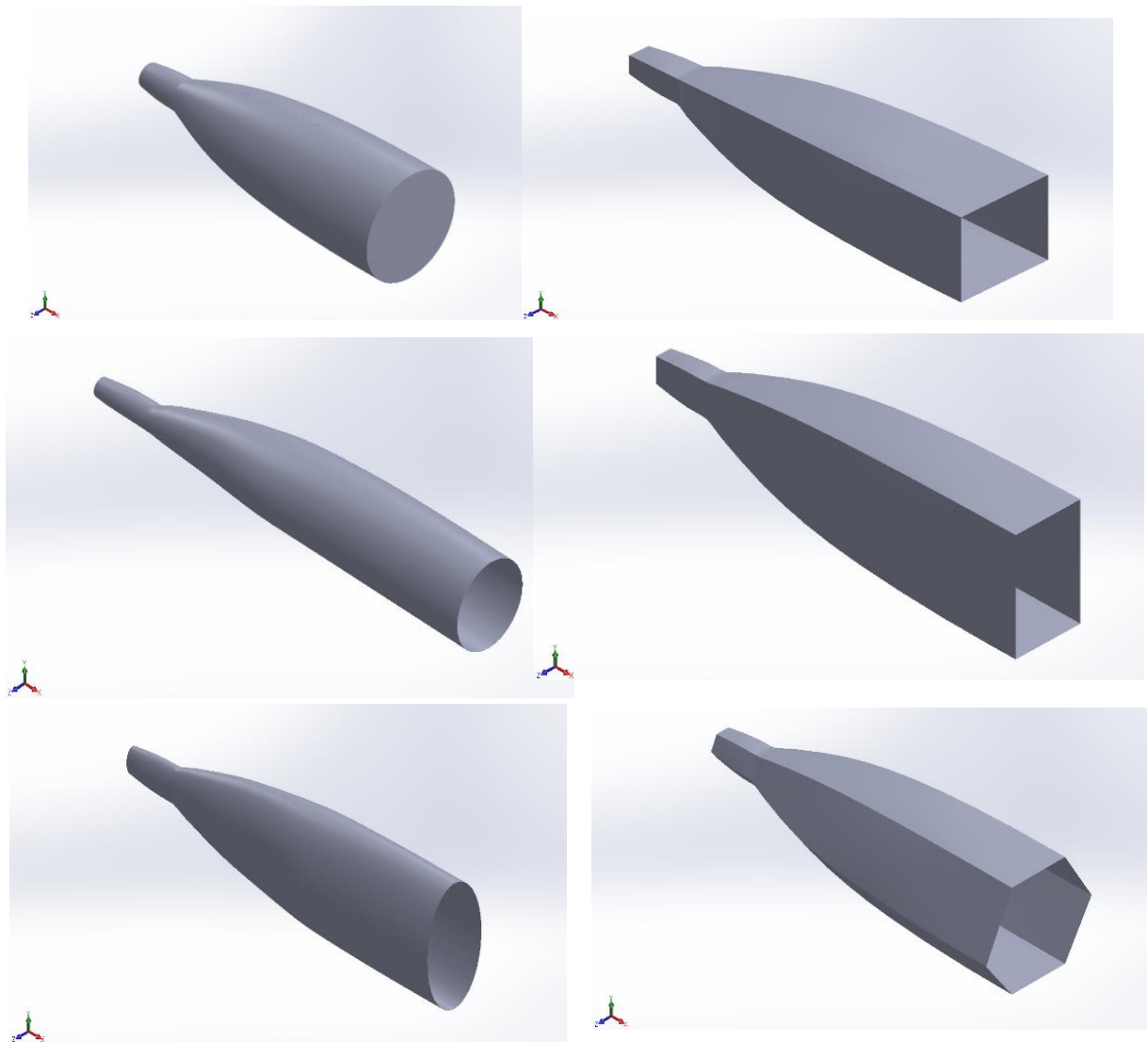


Figure 3.3 : Les géométries des tuyères double galbe

3.4.1. Géométrie de la tuyère

La géométrie de la tuyère axisymétrique de forme circulaire MLN (Minimum Length Nozzle) a été créée dans SolidWorks et modélisée en respectant les dimensions issues du dimensionnement théorique présenté dans les chapitres précédents. La tuyère est de forme circulaire, configuration classique dans l'industrie aéronautique pour garantir la symétrie de l'écoulement et une distribution homogène des contraintes mécaniques.

Caractéristiques géométriques principales

- **Col** : Section critique où l'écoulement atteint Mach 1
- **Divergent** : Profil optimisé selon la méthode des caractéristiques pour minimiser la longueur tout en évitant les chocs internes

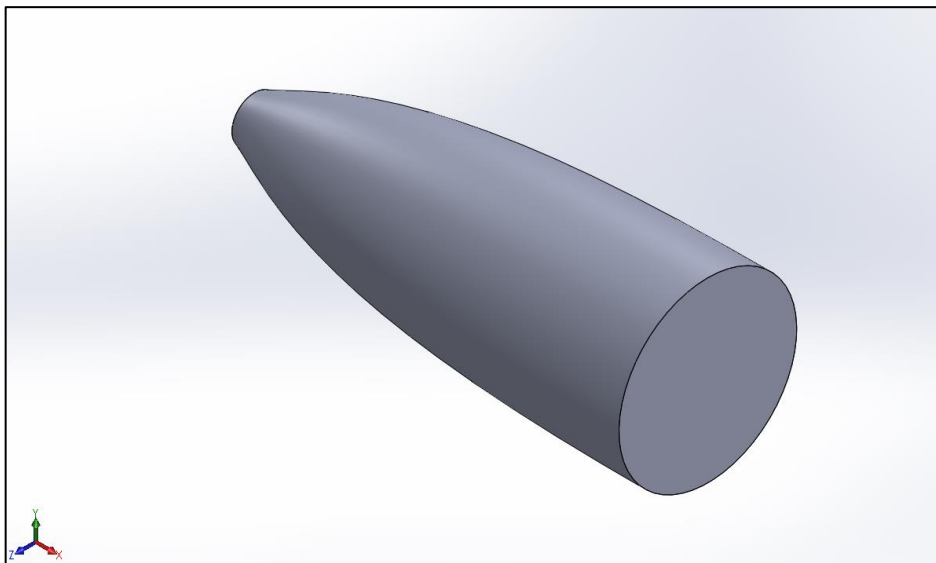


Figure 3.4 : la géométrie de la tuyère

Optimisation géométrique

La tuyère axisymétrique de forme circulaire MLN est conçue pour minimiser la longueur tout en assurant une détente uniforme et sans choc. Cette optimisation repose sur la méthode des caractéristiques, qui permet de déterminer le profil idéal du divergent en fonction du nombre de Mach de sortie souhaité. La minimisation de la longueur présente plusieurs avantages [8, 9] :

- Réduction de la masse de la tuyère
- Diminution des pertes par frottement
- Compacité du système propulsif

3.4.2. Maillage

Le maillage constitue une étape déterminante pour la qualité et la fiabilité des résultats de simulation. Pour la tuyère axisymétrique de forme circulaire MLN, une stratégie de maillage avancée a été mise en œuvre, combinant plusieurs techniques pour optimiser la résolution dans les zones critiques tout en maintenant un coût de calcul raisonnable [10, 11].

Paramètres de maillage utilisés

- **Méthode multi-zone :** Cette approche permet de diviser la géométrie en plusieurs régions, chacune étant maillée selon la technique la plus appropriée. Elle offre un contrôle précis sur la distribution des cellules et facilite la génération d'un maillage de haute qualité, particulièrement important pour les écoulements supersoniques avec chocs.
- **Edge sizing (taille des arêtes) :** Une valeur de 1000 a été appliquée sur les arêtes principales de la géométrie. Ce paramètre contrôle la densité des nœuds le long des arêtes et assure une transition progressive entre les différentes zones du maillage. Une valeur élevée permet d'obtenir un maillage fin, capable de capturer les gradients importants, notamment au niveau du col et dans la région de détente.

- **Inflation** : 25 couches d'inflation ont été générées le long des parois de la tuyère. Cette technique est essentielle pour résoudre correctement la couche limite, où les gradients de vitesse sont très élevés. L'inflation permet d'obtenir des cellules très fines près des parois, qui s'élargissent progressivement vers le centre de l'écoulement. Le nombre élevé de couches (25) garantit une résolution adéquate de la couche limite, même pour des écoulements à haut nombre de Reynolds.
- **Face sizing (taille des faces)** : Une taille de maille de 0,8 m a été imposée sur les faces principales. Ce paramètre détermine la taille maximale des éléments sur les faces sélectionnées, assurant ainsi une résolution suffisante dans les zones d'intérêt, comme la région du col ou la zone de détente supersonique.
- **Nombre total d'éléments** : Le maillage final comporte 197 911 éléments. Ce nombre résulte d'une étude de sensibilité au maillage, qui a permis de déterminer la densité optimale pour garantir l'indépendance des résultats vis-à-vis du maillage, tout en limitant le temps de calcul.

Qualité du maillage et validation

La qualité du maillage a été évaluée selon plusieurs critères :

- **Orthogonalité** : Mesure l'angle entre les vecteurs normaux aux faces adjacentes. Une orthogonalité proche de 1 est idéale.
- **Aspect ratio** : Rapport entre la plus grande et la plus petite dimension d'une cellule. Des valeurs élevées peuvent affecter la précision et la stabilité du calcul.
- **Skewness** : Mesure la déviation par rapport à une forme idéale (tétraèdre ou hexaèdre parfait). Une skewness faible est préférable.

Une étude de sensibilité au maillage a été réalisée pour s'assurer que les résultats (distribution de pression, nombre de Mach, poussée) ne varient pas significativement avec un raffinement supplémentaire. Cette étape est cruciale pour garantir la fiabilité des conclusions tirées de la simulation [10, 11].

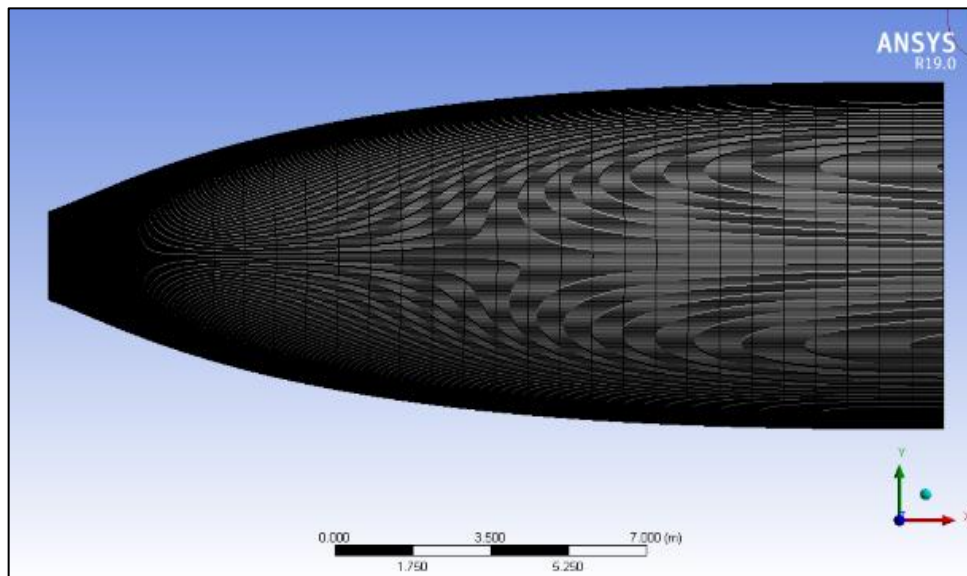


Figure 3.5 : maillage finale de la tuyère

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	179193
<input type="checkbox"/> Elements	162760

Figure 3.6 : Statistiques du maillage précédent

Critère de qualité de maillage :

Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.37653
<input type="checkbox"/> Max	0.99996
<input type="checkbox"/> Average	0.94545
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	6.1044e-002

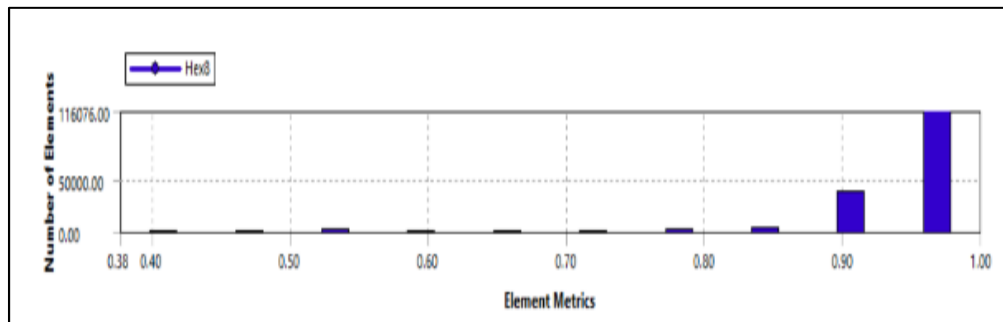


Figure 3.7 : Vérification du critère d'orthogonalité

3.4.3. Configuration

La configuration de la simulation dans ANSYS Fluent comprend la définition des modèles physiques, des conditions aux limites, des méthodes de résolution et des critères de convergence. Ces paramètres doivent être choisis avec soin pour reproduire fidèlement le comportement réel de l'écoulement dans la tuyère [2].

Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont définies pour reproduire les conditions de fonctionnement réelles de la tuyère [2] :

- Pression totale : définie selon les conditions de fonctionnement du moteur
- Température totale : variable selon les cas d'étude (effet de la température)
- Intensité de turbulence : 5% (valeur typique pour les écoulements internes)
- Diamètre hydraulique : correspondant au diamètre d'entrée de la tuyère
- **Sortie (outlet)** : Condition de pression statique (pressure-outlet) correspondant à la pression atmosphérique pour une tuyère non adaptée, ou à une pression spécifique pour simuler différentes altitudes.

- Pression statique : pression atmosphérique au niveau de la mer (101325 Pa) ou pression adaptée à l'altitude
- Condition de reflux : température et direction spécifiées en cas de recirculation
- **Parois (walls)** : Condition de non-glissement (no-slip) et paroi adiabatique (heat flux = 0) ou isotherme selon le cas d'étude.
 - Rugosité : considérée comme nulle (paroi lisse)
 - Condition thermique : adiabatique pour isoler les effets thermodynamiques purs
- **Axe (axis)** : Condition de symétrie axiale, exploitant la géométrie circulaire de la tuyère pour réduire le domaine de calcul.

3.4.4. Paramètres de configuration

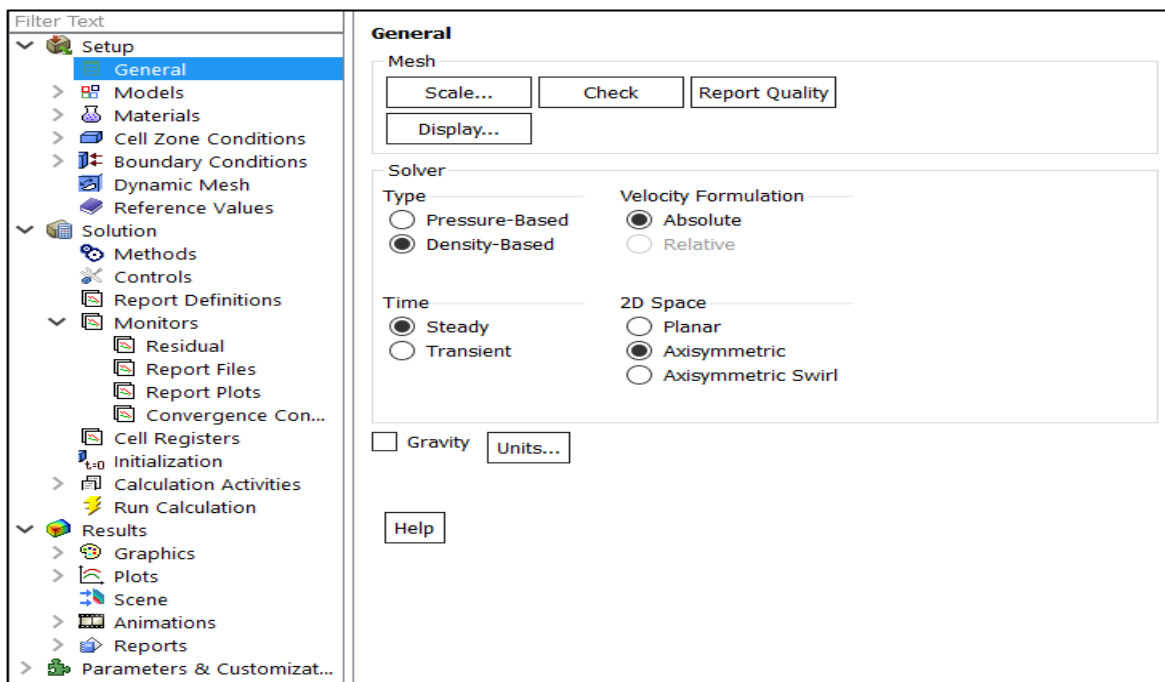
Modèles physiques

- **Solveur** : Basé sur la densité (density-based), adapté aux écoulements compressibles à haut nombre de Mach. Ce solveur résout simultanément les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie, ce qui est particulièrement important pour capturer les interactions entre les différentes variables dans les écoulements supersoniques.
- **Formulation** : Implicite, offrant une meilleure stabilité numérique que la formulation explicite, au prix d'un coût de calcul plus élevé par itération.
- **Modèle énergétique** : Activé pour prendre en compte les effets de compressibilité et les transferts thermiques.
- **Modèle de turbulence** : k- ω SST (Shear Stress Transport), qui combine les avantages du modèle k- ε dans les zones d'écoulement libre et du modèle k- ω près des parois. Ce modèle est particulièrement adapté aux écoulements avec gradients de pression adverses et risques de séparation, comme ceux rencontrés dans les tuyères supersoniques.

- **Modèle de gaz :** Air comme gaz parfait, avec une chaleur spécifique constante (C_p) ou variable selon la température (polynomial). Pour certaines études paramétriques, d'autres gaz (monoatomiques, biatomiques, triatomiques) ont été considérés pour évaluer l'effet du rapport des chaleurs spécifiques (γ) sur les performances de la tuyère [2, 12,13].

Schémas numériques

- **Discrétisation spatiale :**
 - Gradient : Least Squares Cell Based, offrant un bon compromis entre précision et stabilité.
 - Flux : Upwind du second ordre pour toutes les équations (continuité, quantité de mouvement, énergie, turbulence), assurant une précision suffisante tout en limitant les oscillations numériques.
- **Discrétisation temporelle :** Stationnaire (steady-state), l'écoulement dans la tuyère étant considéré comme permanent dans les conditions normales de fonctionnement [2, 12,13].



SIMULATION NUMÉRIQUE PAR ANSYS

Le modèle énergie est choisie car il couple correctement la vitesse avec la température statique pour un écoulement compressible. FLUENT nécessite que l'équation d'énergie soit résolue si la loi des gaz parfaits est incorporée.

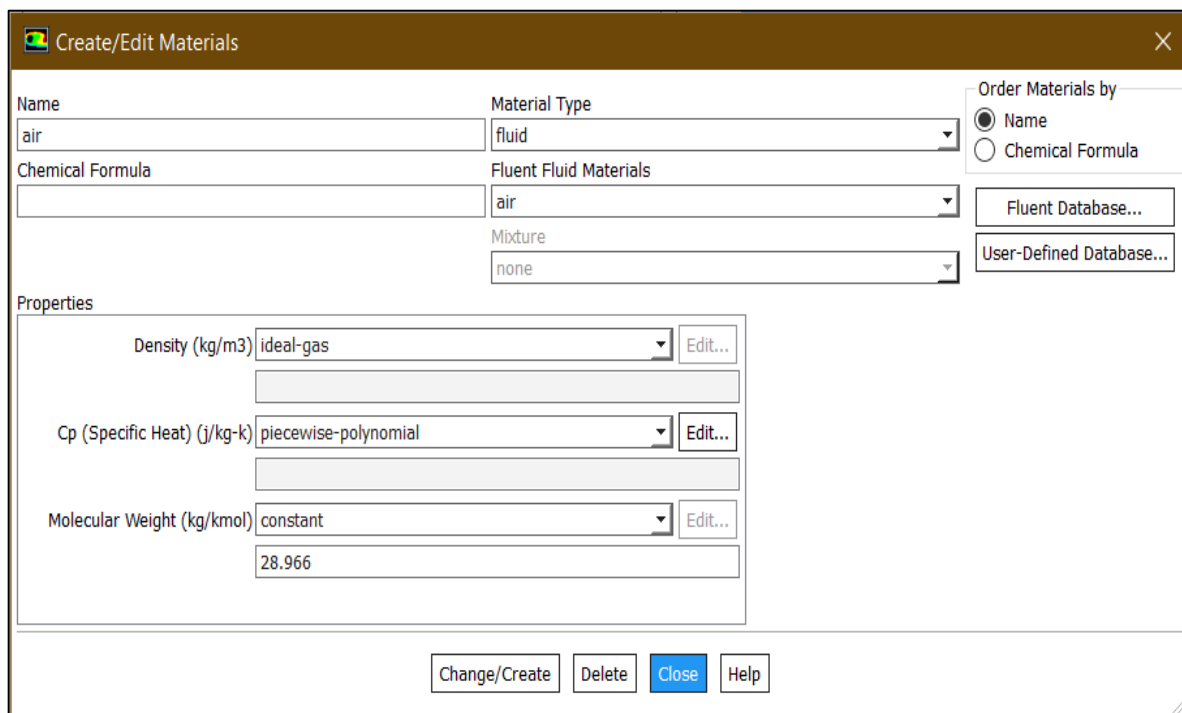
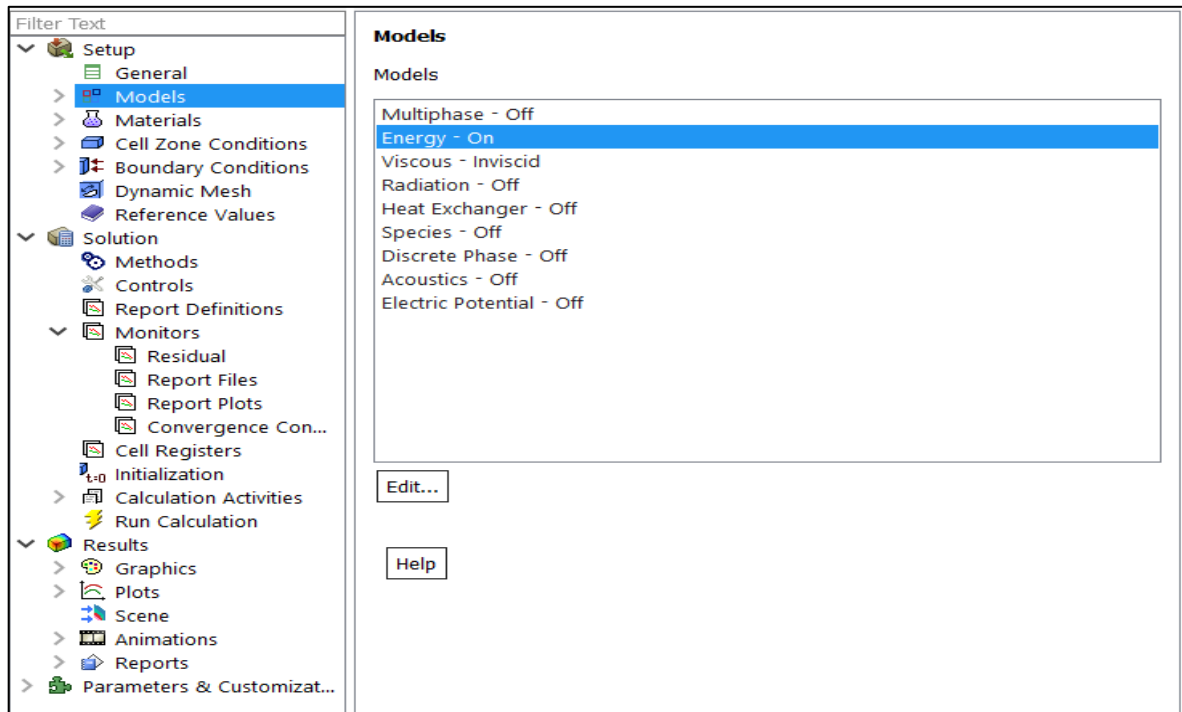


Figure 3.8 : Les paramètres pour un gaz parfait

SIMULATION NUMÉRIQUE PAR ANSYS

Pour le cas d'écoulement à haute température C_p varie en fonction de température donc on utilise l'option < polynôme > pour entrer les coefficients de C_p .

The dialog box 'Piecewise-Polynomial Profile' is shown. The 'Define' section has 'Cp' selected. The 'In Terms of' dropdown is 'Temperature'. The 'Ranges' section shows '2' ranges. The 'Range' section shows '1' with 'Minimum' 100 and 'Maximum' 1000. The 'Coefficients' section shows 8 coefficients:

Coefficient	Value
1	1161.482
2	-2.368819
3	0.01485511
4	-5.034909e-05
5	9.92857e-08
6	-1.111097e-10
7	6.540196e-14
8	-1.573588e-17

Figure 3.9 : coefficients d'un gaz à haute température comprise entre 100 et 1000

The dialog box 'Piecewise-Polynomial Profile' is shown. The 'Define' section has 'Cp' selected. The 'In Terms of' dropdown is 'Temperature'. The 'Ranges' section shows '2' ranges. The 'Range' section shows '2' with 'Minimum' 1000 and 'Maximum' 3000. The 'Coefficients' section shows 8 coefficients:

Coefficient	Value
1	-7069.814
2	33.70605
3	-0.0581276
4	5.421615e-05
5	-2.936679e-08
6	9.237533e-12
7	-1.565553e-15
8	1.112335e-19

Figure 3.10 : coefficients d'un gaz à haute température comprise entre 1000 et 3000

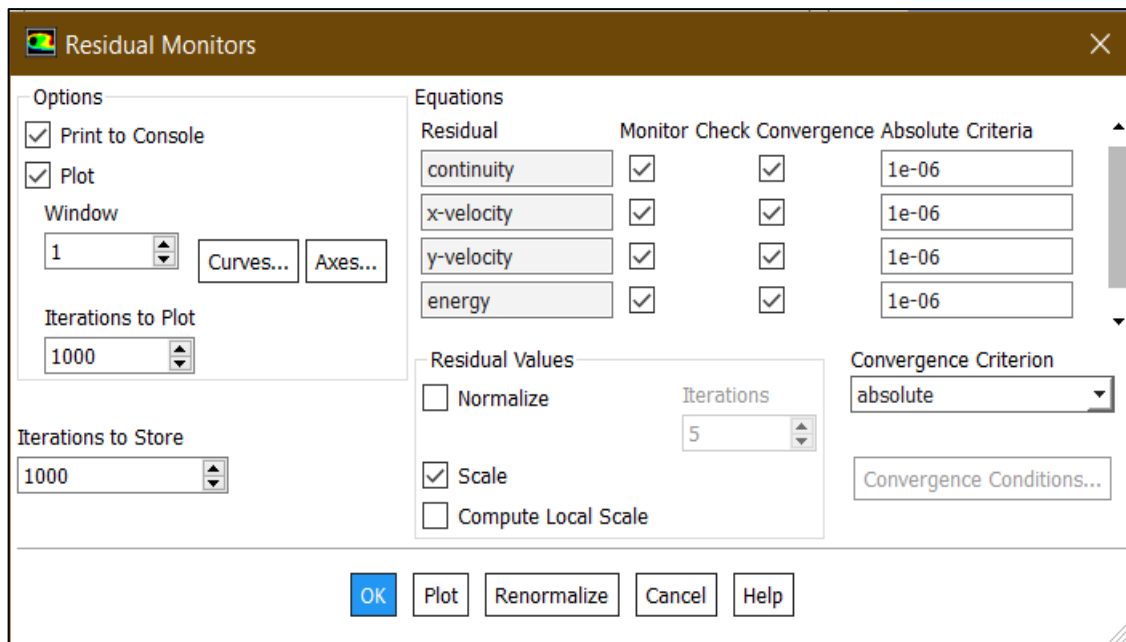


Figure 3.11 : Précision de la convergence

3.4.5. Schéma de convergence

- La convergence de la simulation est un aspect critique, particulièrement pour les écoulements supersoniques où les non-linéarités et les discontinuités (chocs) peuvent compliquer la résolution numérique. Un suivi rigoureux de la convergence a été mis en place pour garantir la fiabilité des résultats [2].

Critères de convergence

- **Résidus** : Les résidus normalisés des équations de continuité, quantité de mouvement, énergie et turbulence sont suivis à chaque itération. La convergence est considérée comme atteinte lorsque ces résidus descendent en dessous de 10^{-4} ou 10^{-5} , selon la précision requise.
- **Grandeurs intégrales** : Le débit massique à l'entrée et à la sortie, ainsi que la poussée générée par la tuyère, sont également surveillés. La stabilisation de ces grandeurs est un indicateur fiable de convergence, même si les résidus peuvent parfois stagner à des valeurs plus élevées en raison des discontinuités dans l'écoulement.

- **Bilans globaux :** Les bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie sont vérifiés pour s'assurer de la conservation des grandeurs physiques à travers le domaine de calcul [2,14].

Stratégie de convergence

Pour faciliter la convergence des simulations de la tuyère axisymétrique de forme circulaire MLN, une approche progressive a été adoptée [2,14] :

1. **Initialisation adaptée :** Utilisation de l'initialisation hybride de Fluent, qui génère un champ initial basé sur les conditions aux limites et une solution potentielle.
2. **Démarrage avec des paramètres conservatifs :**
 - Facteurs de sous-relaxation réduits
 - Nombre de Courant (CFL) faible
 - Schémas numériques du premier ordre
3. **Progression graduelle :**
 - Augmentation progressive du nombre de Courant
 - Passage aux schémas du second ordre après stabilisation initiale
 - Ajustement des facteurs de sous-relaxation selon l'évolution des résidus
4. **Surveillance multi-critères :**
 - Suivi simultané des résidus et des grandeurs intégrales
 - Vérification régulière des profils de pression, température et Mach pour détecter d'éventuelles anomalies

SIMULATION NUMÉRIQUE PAR ANSYS

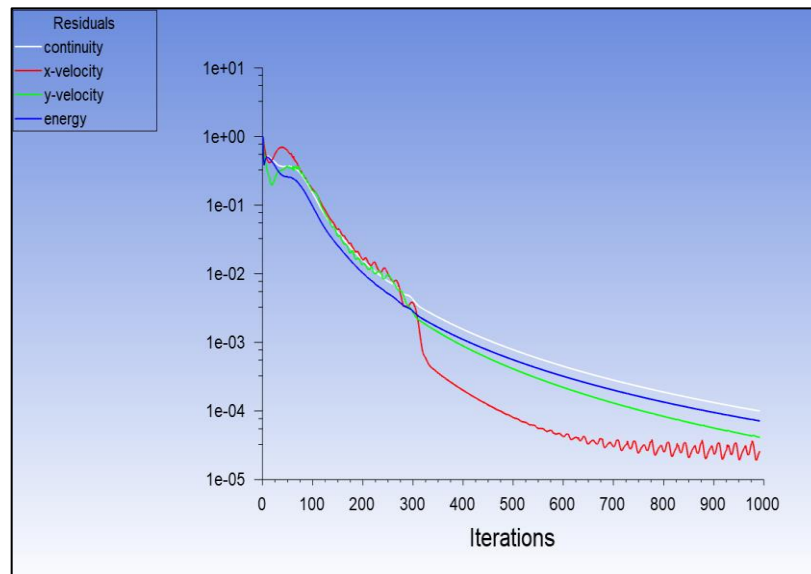


Figure 3.12 : Schéma de convergence pour tuyère axisymétrique

966	1.0782e-04	2.6172e-05	4.4817e-05	7.7240e-05	0:01:29	4034
967	1.0748e-04	2.4311e-05	4.4631e-05	7.6984e-05	0:01:11	4033
968	1.0714e-04	2.3043e-05	4.4473e-05	7.6736e-05	0:00:57	4032
iter	continuity	x-velocity	y-velocity	energy	time/iter	
969	1.0681e-04	2.2803e-05	4.4318e-05	7.6499e-05	0:00:46	4031
970	1.0648e-04	2.3165e-05	4.4159e-05	7.6268e-05	0:00:36	4030
971	1.0616e-04	2.4060e-05	4.3996e-05	7.6043e-05	0:00:29	4029
972	1.0585e-04	2.5755e-05	4.3838e-05	7.5826e-05	0:00:23	4028
973	1.0555e-04	2.8107e-05	4.3681e-05	7.5620e-05	0:00:19	4027
974	1.0525e-04	3.0719e-05	4.3525e-05	7.5421e-05	0:00:15	4026
975	1.0495e-04	3.2813e-05	4.3371e-05	7.5222e-05	0:00:12	4025
976	1.0464e-04	3.3564e-05	4.3219e-05	7.5006e-05	0:13:34	4024
977	1.0506e-04	3.6958e-05	4.3068e-05	7.5613e-05	0:10:51	4023
978	1.0448e-04	3.4967e-05	4.4110e-05	7.5021e-05	0:08:41	4022
979	1.0404e-04	3.3236e-05	4.4534e-05	7.4629e-05	0:06:57	4021
iter	continuity	x-velocity	y-velocity	energy	time/iter	
980	1.0365e-04	3.0442e-05	4.4215e-05	7.4305e-05	0:05:33	4020
981	1.0328e-04	2.7128e-05	4.3731e-05	7.4013e-05	0:04:27	4019
982	1.0293e-04	2.3834e-05	4.3280e-05	7.3741e-05	0:03:33	4018
983	1.0260e-04	2.1171e-05	4.2915e-05	7.3487e-05	0:02:50	4017
984	1.0228e-04	1.9538e-05	4.2629e-05	7.3247e-05	0:02:16	4016
985	1.0196e-04	1.9011e-05	4.2391e-05	7.3020e-05	0:01:49	4015
986	1.0166e-04	1.9386e-05	4.2183e-05	7.2803e-05	0:01:27	4014
987	1.0136e-04	2.0322e-05	4.1989e-05	7.2592e-05	0:01:10	4013
988	1.0106e-04	2.1513e-05	4.1810e-05	7.2384e-05	0:00:56	4012
989	1.0076e-04	2.2753e-05	4.1640e-05	7.2179e-05	0:00:45	4011
990	1.0047e-04	2.3932e-05	4.1481e-05	7.1975e-05	0:00:36	4010
iter	continuity	x-velocity	y-velocity	energy	time/iter	
991	1.0018e-04	2.5024e-05	4.1331e-05	7.1772e-05	0:00:29	4009
! 992	solution is converged					
992	9.9887e-05	2.6051e-05	4.1192e-05	7.1570e-05	0:00:23	4008
Writing data to C:\Users\acer\Desktop\ESSAI SIMULATION\PROFILE_files\dp0\FFF\Fluent\FFF.2.ip ...						
x-coord						
y-coord						
pressure						
x-velocity						
y-velocity						
temperature						
hyb_init=0						
hyb_init=1						
Done.						
Calculation complete.						

3.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté de manière détaillée la méthodologie de simulation numérique appliquée à la tuyère axisymétrique de forme circulaire MLN à l'aide du logiciel ANSYS Fluent. L'ensemble des étapes, de la préparation de la géométrie à la configuration des paramètres de simulation, en passant par la génération du maillage et la stratégie de convergence, a été décrit avec précision.

La simulation numérique constitue un outil puissant pour l'analyse et l'optimisation des tuyères supersoniques, permettant d'accéder à des informations détaillées sur l'écoulement (champs de pression, température, vitesse, nombre de Mach) qui seraient difficiles, voire impossibles, à obtenir expérimentalement. Elle offre également la possibilité de tester rapidement différentes configurations et conditions de fonctionnement, accélérant ainsi le processus de conception.

Les choix méthodologiques effectués dans ce travail (géométrie circulaire, maillage multi-zone avec inflation, modèle de turbulence $k-\omega$ SST, solveur basé sur la densité) sont adaptés aux spécificités des écoulements dans les tuyères supersoniques et garantissent la fiabilité des résultats obtenus. La stratégie de convergence progressive mise en œuvre permet de surmonter les difficultés numériques inhérentes aux écoulements compressibles à haut nombre de Mach.

Les résultats de ces simulations, présentés et analysés dans le chapitre suivant, permettront d'évaluer les performances de la tuyère axisymétrique de forme circulaire MLN dans différentes conditions de fonctionnement, d'étudier l'influence de paramètres clés (température, rapport de détente, nature du gaz), et de valider les méthodes de dimensionnement théoriques développées dans les chapitres précédents [2, 15,16,17,18].

CHAPITRE 4 :

Résultats et commentaires

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET COMMENTAIRES

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente les divers résultats obtenus par nos simulations numériques CFD sur le logiciel Ansys-Fluent pour des tuyères supersoniques tridimensionnelles asymétriques de types à détente centrée (Minimum Length Nozzle). Des configurations tridimensionnelles ont été choisies pour notre étude, telles que la forme circulaire, carrée, rectangle, l'ellipse ainsi que la forme demi-circulaire. Le but de ces figures est de présenter les différents cas possibles de conception et les différents paramètres qui influents sur le dimensionnement et la conception des tuyères tridimensionnelles. Ces résultats sont divisés en quatre parties. La première partie comporte les résultats obtenus pour les contours des iso-Mach, des iso-pressions, des iso-températures et des iso-densités des tuyères tridimensionnelles MLN. Une comparaison a été faite entre les résultats obtenus par simulation CFD avec ceux du programme de calcul (MOC). La deuxième partie comporte les résultats de conception des tuyères double galbe 3D asymétriques (Dual Bell Nozzle). Pour ce cas, des conceptions tridimensionnelles, choisies pour notre étude, ont été choisies telles que la forme circulaire, carrée, rectangle, l'ellipse ainsi que la forme demi-circulaire. Ces tuyères double galbe sont de type à détente centrée pour le premier et le deuxième galbe.

4.2. Contour des tuyères asymétrique tridimensionnelle MLN

4.2.1. Tuyère axisymétrique de forme circulaire

La figure 4.1 présente la variation du nombre de Mach le long du contour de la tuyère supersonique axisymétrique à détente centrée (Minimum Length Nozzle) de section de sortie circulaire où le nombre de Mach de sortie $M_s = 4,00$ et la température de stagnation $T_0 = 2\,000\text{ K}$ pour le modèle HT. Elle montre une augmentation rapide du nombre de Mach à travers la paroi juste après le col. Ensuite, une progression plus lente est observée jusqu'à ce que la valeur de Mach atteigne la valeur de Mach de conception à la sortie de la tuyère $M_s = 4,00$.

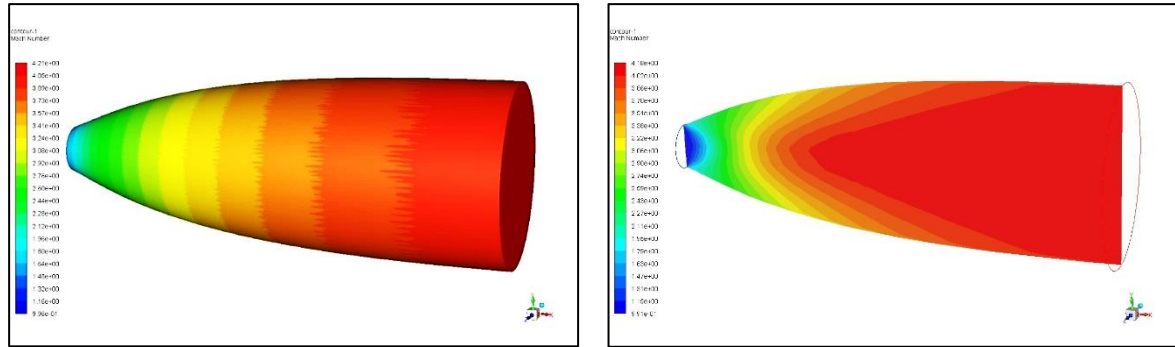


Figure 4.1 : Allure des contours du nombre de mach le long de la tuyère MLN tridimensionnelle à section de sortie circulaire

Des allures des contours du nombre de Mach ont été présentées. La figure 4.2 illustre ses contours sous formes de section le long de la tuyère MLN tridimensionnelle à section de sortie circulaire allant du col a la section de sortie.

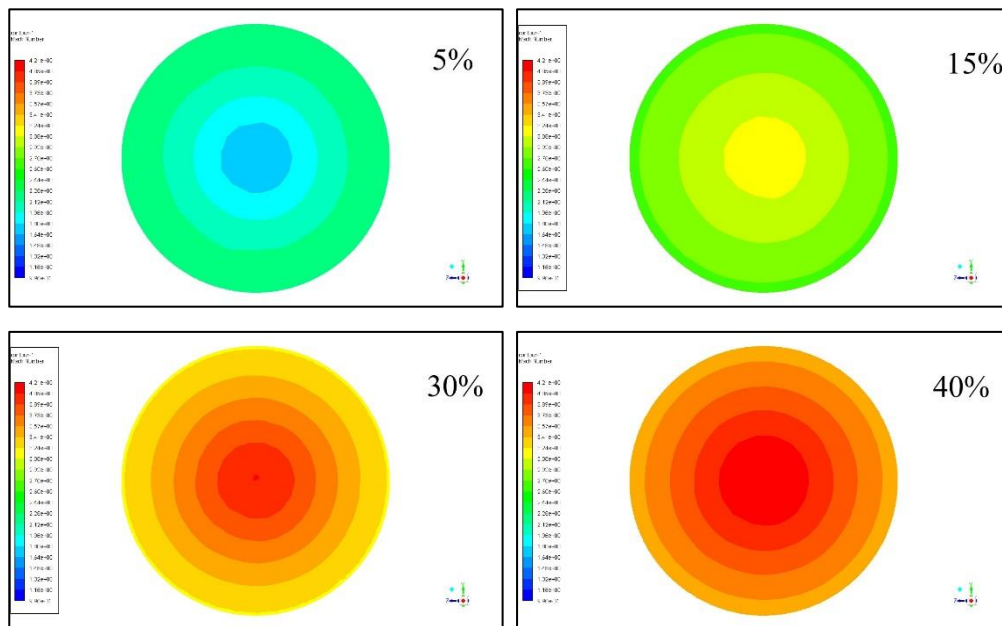


Figure 4.2 : Allure des contours du nombre de Mach le long de la tuyère MLN à section circulaire

La figure 4.3 présente une comparaison de nombre de mach de l'écoulement d'un gaz à haute température calculer par simulation sur Ansys-Fluent et par simulation numériquement (Fortran). On remarque une bonne correspondance entre les deux résultats avec une erreur de l'ordre de 0%.

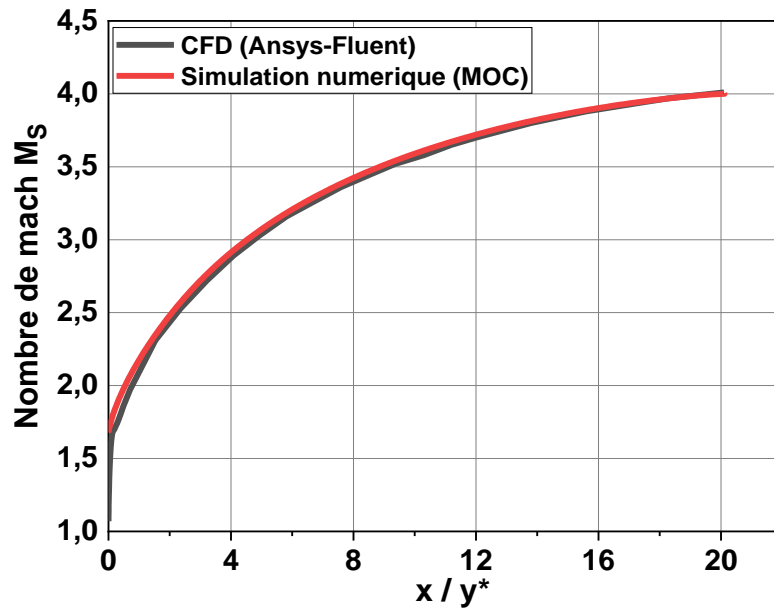


Figure 4.3 : Comparaison des résultats du nombre de mach le long du contour de la tuyère MLN entre CFD (Ansys-Fluent) et la simulation numérique (MOC)

La figure 4.4 ci-dessous représentent la variation de la température statique le long du contour de la tuyère MLN. Le rapport T/T_0 donne une indication sur le choix convenable du matériau qui va résister à cette température.

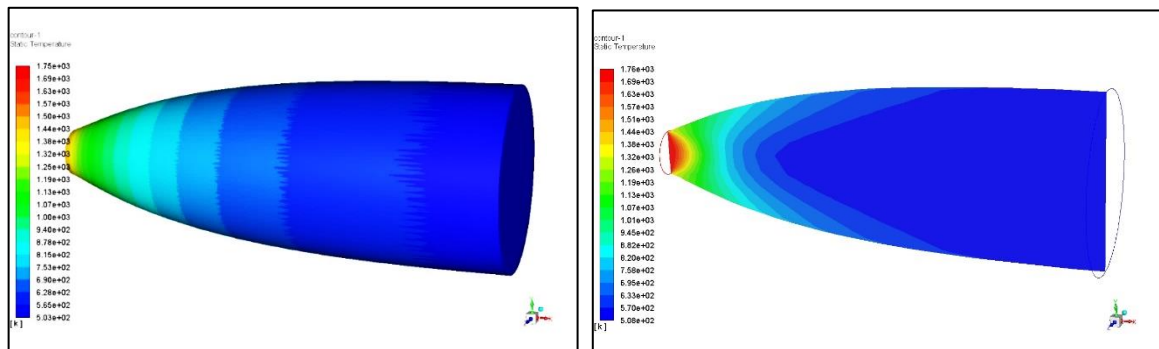


Figure 4.4 : Allure des contours du rapport de température T/T_0 de la tuyère tridimensionnelle MLN à section de sortie circulaire

La figure 4.5 représente une comparaison du rapport de température T/T_0 le long de la tuyère tridimensionnelle MLN à section de sortie circulaire calculer par simulation sur Ansys-Fluent et par simulation numériquement (Fortran). Selon les résultats, nous notons que la température normalisée diminue le long de la tuyère, ce qui s'aligne bien avec les prédictions théoriques de l'expansion isentropique. Une excellente corrélation entre les deux résultats confirme la validité des hypothèses d'écoulement.

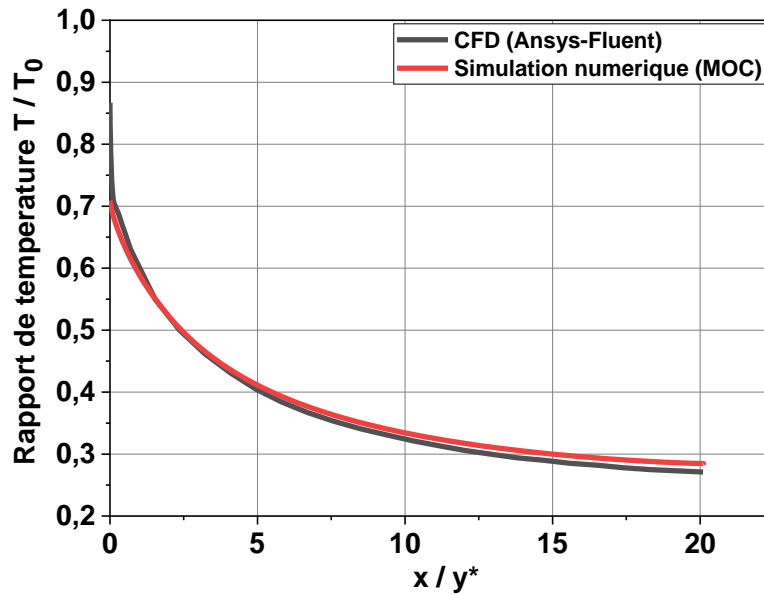


Figure 4.5 : Comparaison des résultats du rapport de la température T/T_0 le long du contour de la tuyère MLN entre CFD (Ansys-Fluent) et la simulation numérique (MOC)

La figure 4.6 ci-dessous présente la variation de pression statique le long du contour de la tuyère MLN. On présente la variation du rapport de pression qui sert à déterminer la force de pression exercé sur la paroi de la tuyère.

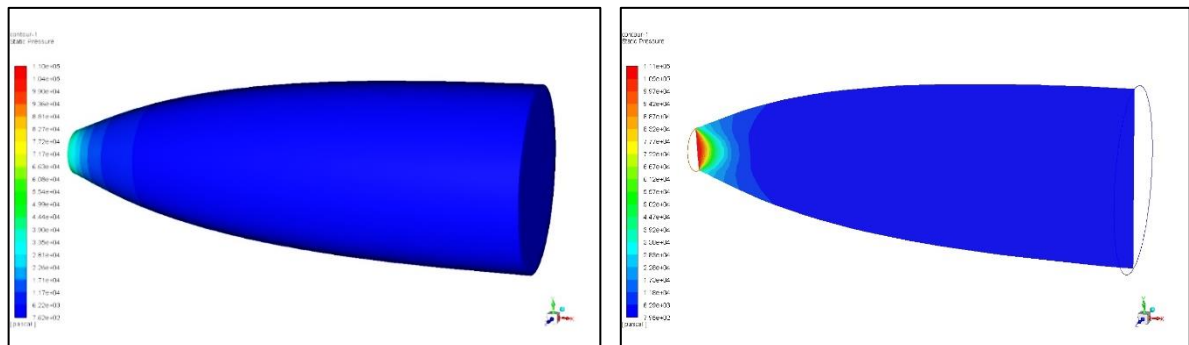


Figure 4.6 : Allure des contours du rapport de pression P/P_0 de la tuyère tridimensionnelle MLN à section de sortie circulaire

La figure 4.7 représente une comparaison du rapport de pression P/P_0 le long de la tuyère tridimensionnelle MLN à section de sortie circulaire calculer par simulation sur Ansys-Fluent et par simulation numériquement (Fortran). On présente la variation du rapport de pression qui sert à déterminer la force de pression exercé sur la paroi de la tuyère. Selon les résultats, nous notons que la pression diminue le long de la tuyère du moment que l'énergie de pression est transformée en énergie de vitesse tout au long de la tuyère supersonique, ce qui s'aligne bien avec les prédictions théoriques. Une excellente corrélation entre les deux résultats confirme la validité des hypothèses d'écoulement.

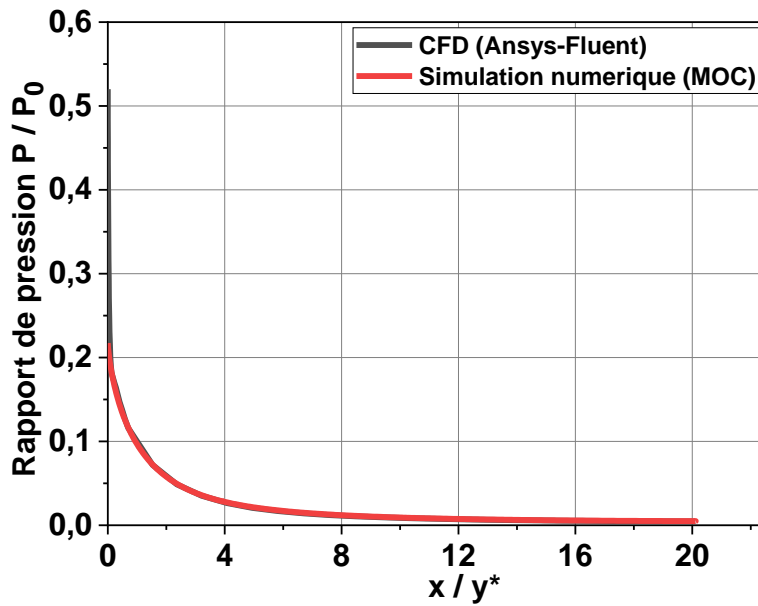


Figure 4.7 : Comparaison des résultats du rapport de pression P/P_0 le long du contour de la tuyère MLN entre CFD (Ansys-Fluent) et la simulation numérique (MOC)

La figure 4.8 ci-dessous présente la variation de densité de ρ/ρ_0 le long du contour de la tuyère MLN. On présente la variation du rapport de pression qui sert à déterminer la force de pression exercé sur la paroi de la tuyère.

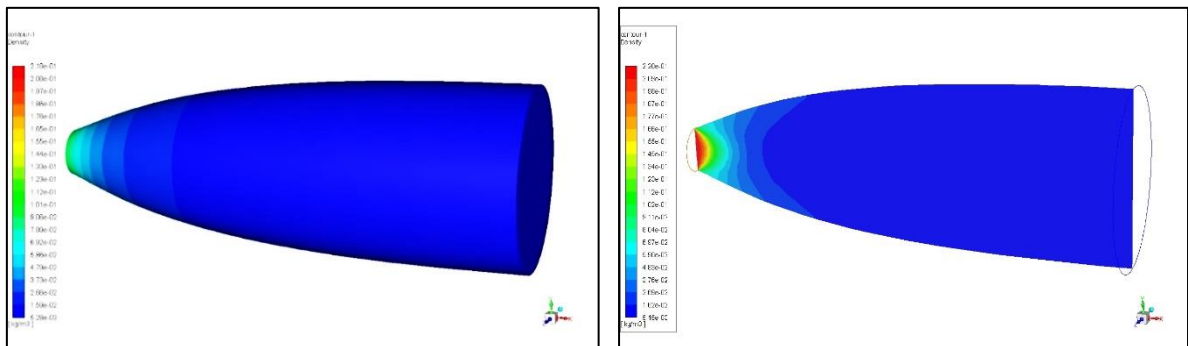


Figure 4.8 : Allure des contours du rapport densité de ρ/ρ_0 de la tuyère tridimensionnelle MLN à section de sortie circulaire

La figure 4.9 représente une comparaison du rapport densité de ρ/ρ_0 le long de la tuyère tridimensionnelle MLN à section de sortie circulaire calculer par simulation sur Ansys-Fluent et par simulation numériquement (Fortran). nous notons que la densité diminue progressivement avec l'augmentation du nombre de Mach, comme prédit par les relations d'écoulement isentropique. L'alignement entre le modèle numérique et la simulation indique une gestion appropriée des effets de compressibilité. La précision globale des résultats suggère que les équations gouvernantes et les conditions

aux limites ont été mises en œuvre efficacement.

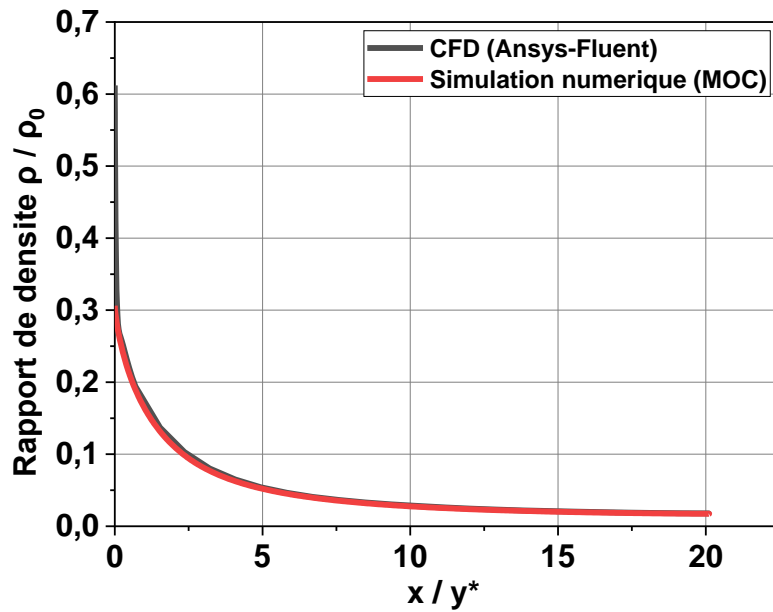


Figure 4.9 : Comparaison des résultats du rapport de densité ρ/ρ_0 le long du contour de la tuyère MLN entre CFD (Ansys-Fluent) et la simulation numérique (MOC)

Après avoir comparé les résultats du numérique et ceux obtenus par la simulation, on va directement calculer l'erreur. On peut définir l'erreur comme étant la différence entre la valeur numérique et celle obtenue par simulation fluent :

$$Erreur = ((x_n - x_s) / x_n) * 100 \quad (4.1)$$

Tableau 4.1 : Calcul d'erreur entre les résultats par simulation Ansys-Fluent et numérique

	Mach	T / T ₀	P / P ₀	ρ / ρ_0
Programme numérique	4,00	0,28422	0,00489	0,01721
Simulation fluent	4,00	0,27300	0,00465	0,01700
Erreur (%)	0,00	3,95	4,91	1,22

4.2.2. Tuyère axisymétrique de forme carré

Dans cette partie, on va présenter les résultats de la tuyère tridimensionnelle de type MLN de section de sortie carré, entre autres les contours des iso-Mach, des iso-pression, des iso-température et des iso-densité. La figure 4.10 montre les résultats de ses contours.

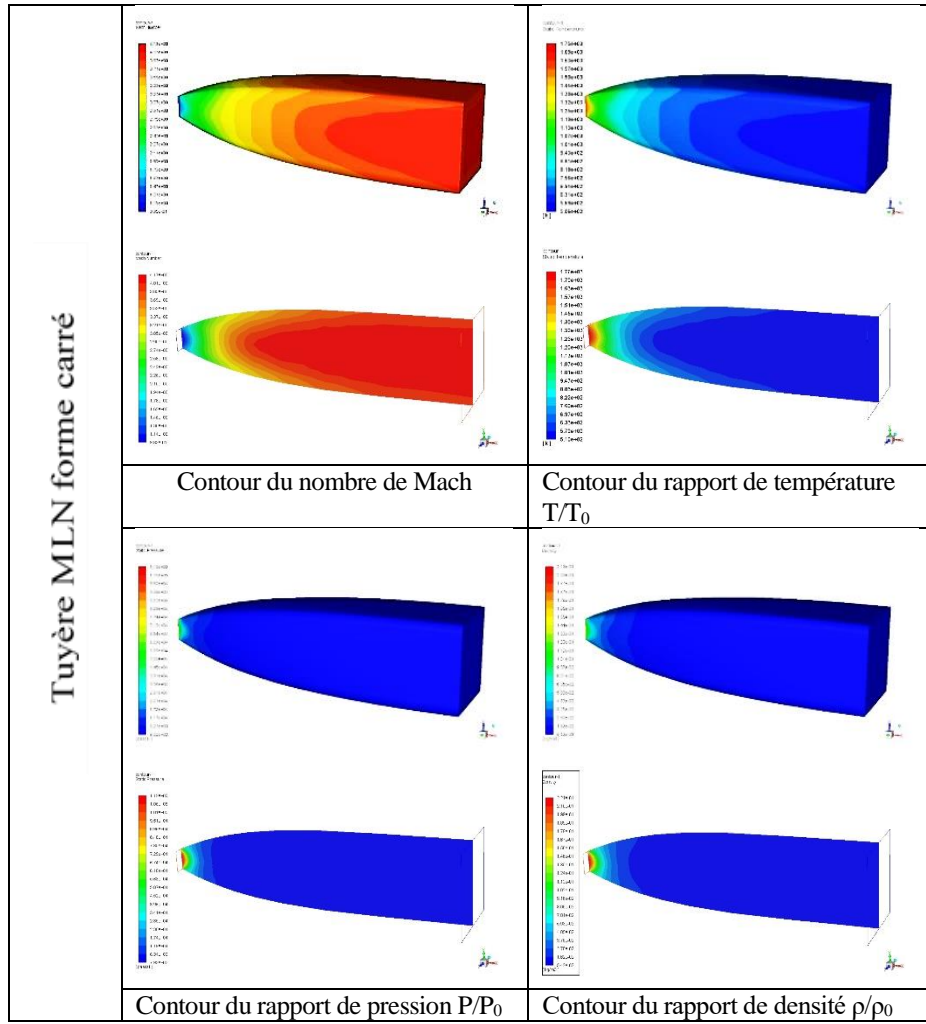


Figure 4.10 : Allure des contours de la tuyère tridimensionnelle

MLN à section de sortie carré

Des allures des contours du nombre de Mach ont été présentées. La figure 4.11 illustre ses contours sous formes de section le long de la tuyère MLN tridimensionnelle à section de sortie carré allant du col a la section de sortie.

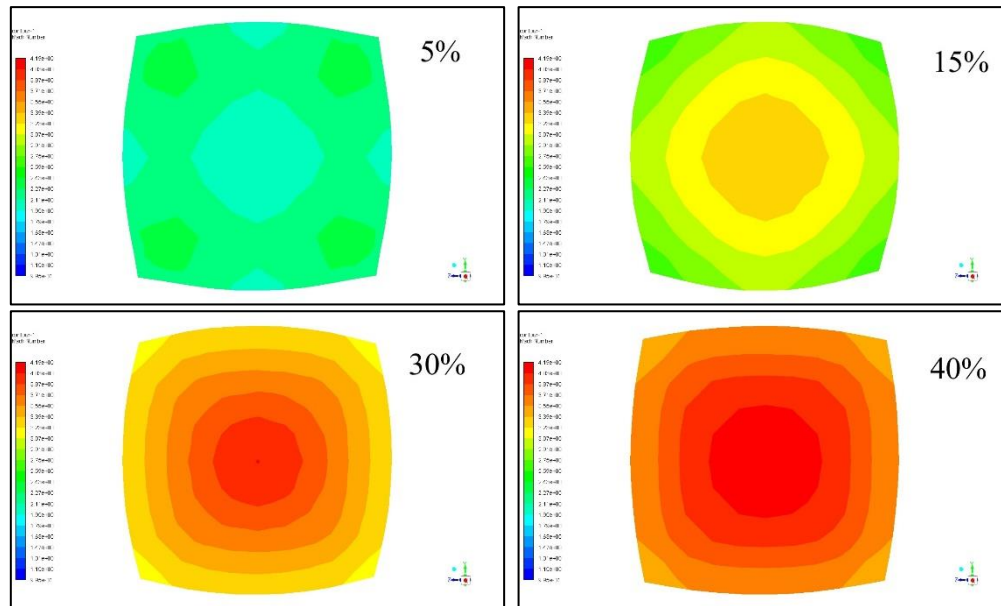


Figure 4.11 : Allure des contours du nombre de Mach le long de la tuyère MLN
à section carré

Après avoir comparé les résultats du numérique à ceux obtenus par la simulation, on va directement calculer la Différence. On peut définir la Différence comme étant la différence entre la valeur numérique et celle obtenue par simulation fluent : la Différence = $((x_n - x_s) / x_n) * 100$

Tableau 4.2 : Calcul d'erreur entre les résultats des tuyères MLN
de forme circulaire et carré

	Mach	T / T_0	P / P_0	ρ / ρ_0
Tuyère MLN forme circulaire	4,00	0,273	0,004650	0,0170
Tuyère MLN forme carré	3,93	0,280	0,004794	0,0181
Différence (%)	1,75	2,50	3,004	6,077

4.2.3. Tuyère axisymétrique de forme circulaire placée verticalement

Dans cette partie, on va présenter les résultats de la tuyère tridimensionnelle de type MLN de section de sortie circulaire placée verticalement, entre autres les contours des iso-Mach, des iso-pression, des iso-température et des iso-densité.

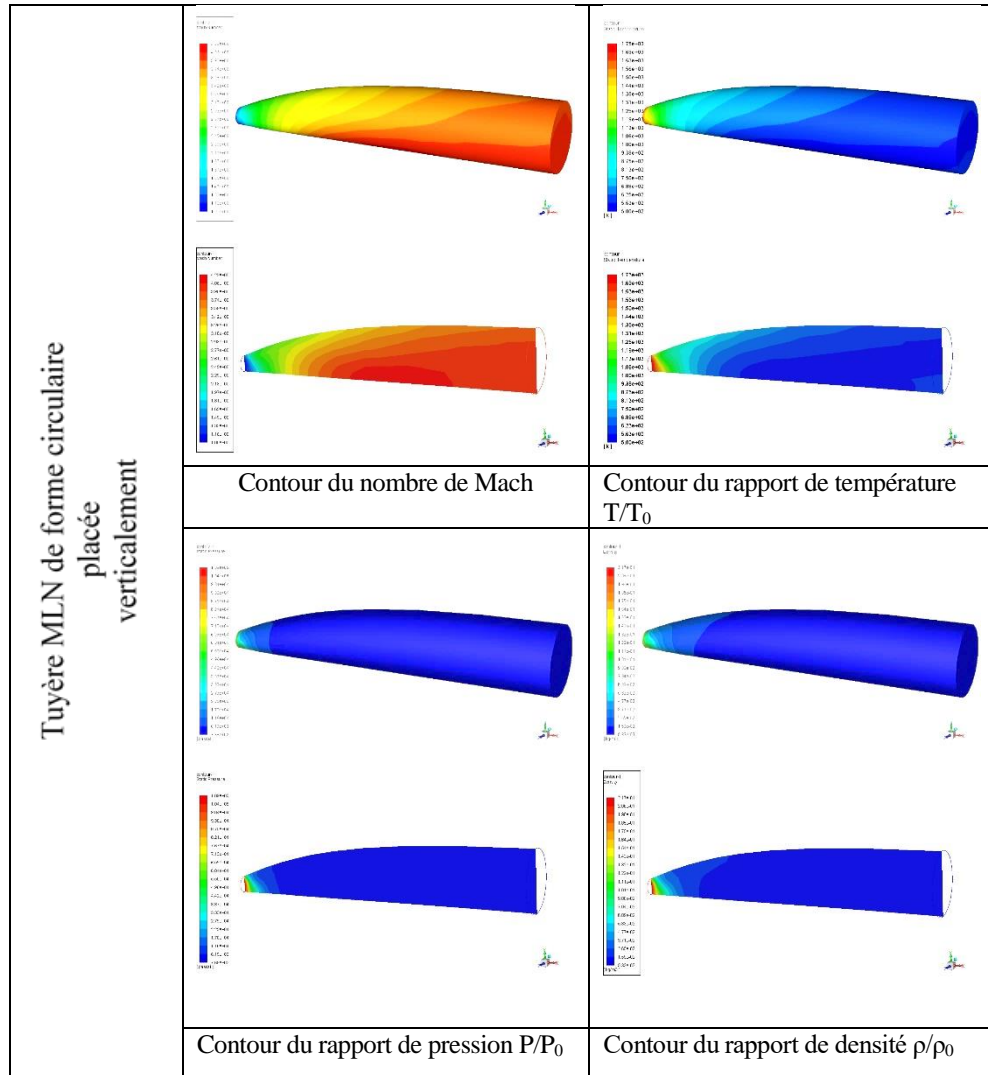


Figure 4.12 : Allure des contours de la tuyère tridimensionnelle

MLN à section de sortie circulaire placée verticalement

Des allures des contours du nombre de Mach ont été présentées. La figure 4.13 illustre ses contours sous formes de section le long de la tuyère MLN tridimensionnelle à section de sortie circulaire placée verticalement allant du col a la section de sortie.

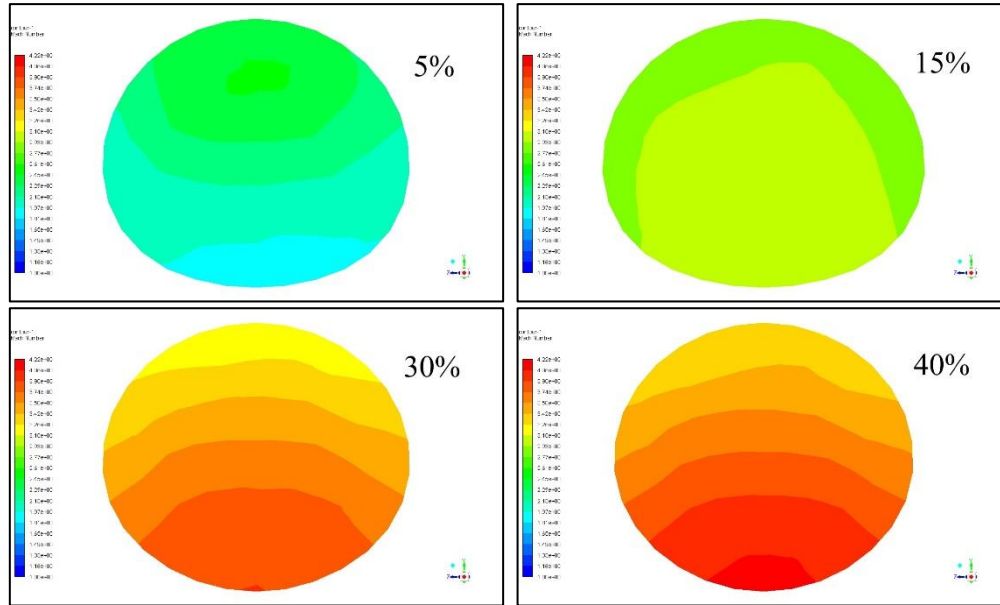


Figure 4.13 : Allure des contours du nombre de Mach le long de la tuyère MLN à section circulaire placée verticalement

Tableau 4.3 : Calcul d'erreur entre les résultats des tuyères MLN de forme circulaire et circulaire placée verticalement

	Mach	T / T_0	P / P_0	ρ / ρ_0
Tuyère MLN forme circulaire	4,00	0,273	0,00465	0,0170
Tuyère MLN forme circulaire placée verticalement	3,67	0,310	0,00560	0,0192
Différence (%)	8,25	11,94	16,96	11,46

4.2.4. Tuyère axisymétrique de forme hexagonale

Dans cette partie, on va présenter les résultats de la tuyère tridimensionnelle de type MLN de section de sortie hexagonale, entre autres les contours des iso-Mach, des iso-pression, des iso-température et des iso-densité.

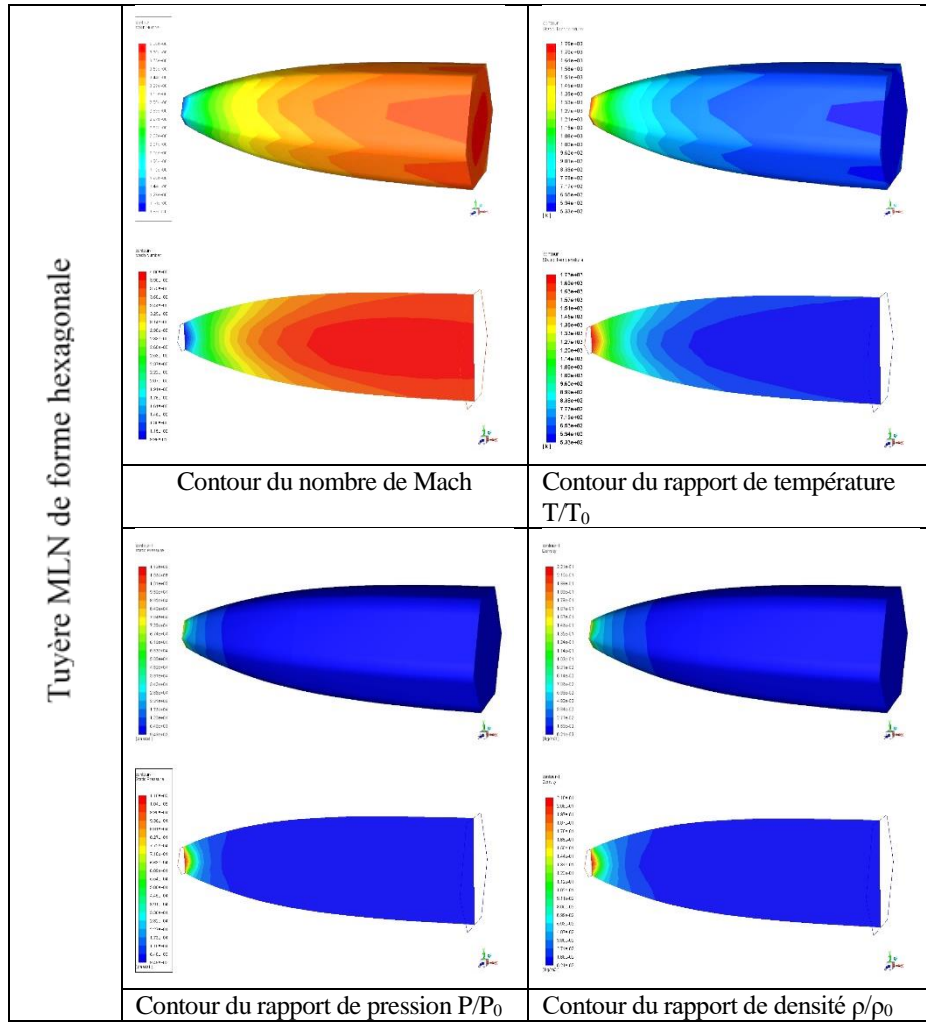


Figure 4.14 : Allure des contours de la tuyère tridimensionnelle

MLN à section de sortie hexagonale

Des allures des contours du nombre de Mach ont été présentées. La figure 4.15 illustre ses contours sous formes de section le long de la tuyère MLN tridimensionnelle à section de sortie hexagonale allant du col a la section de sortie.

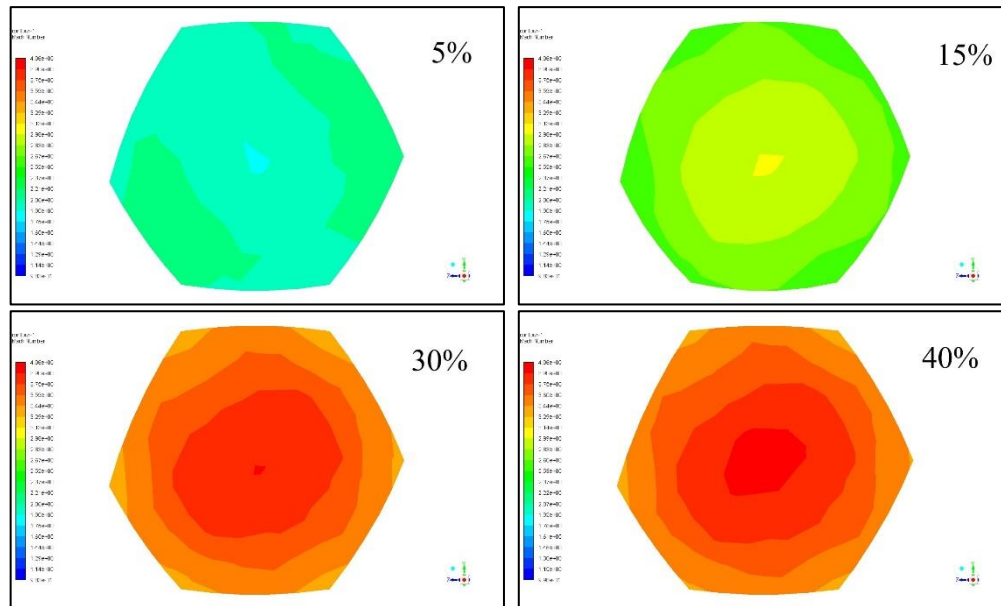


Figure 4.15 : Allure des contours du nombre de Mach le long de la tuyère MLN à section hexagonale

Tableau 4.4 : Calcul d'erreur entre les résultats des tuyères MLN de forme circulaire et hexagonale

	Mach	T / T_0	P / P_0	ρ / ρ_0
Tuyère MLN forme circulaire	4,00	0,273	0,00465	0,0170
Tuyère MLN forme hexagonale	3,73	0,303	0,00611	0,0213
Différence (%)	6,75	9,901	23,895	20,188

4.2.5. Tuyère axisymétrique de forme rectangulaire

Dans cette partie, on va présenter les résultats de la tuyère tridimensionnelle de type MLN de section de sortie rectangulaire, entre autres les contours des iso-Mach, des iso-pression, des iso-température et des iso-densité.

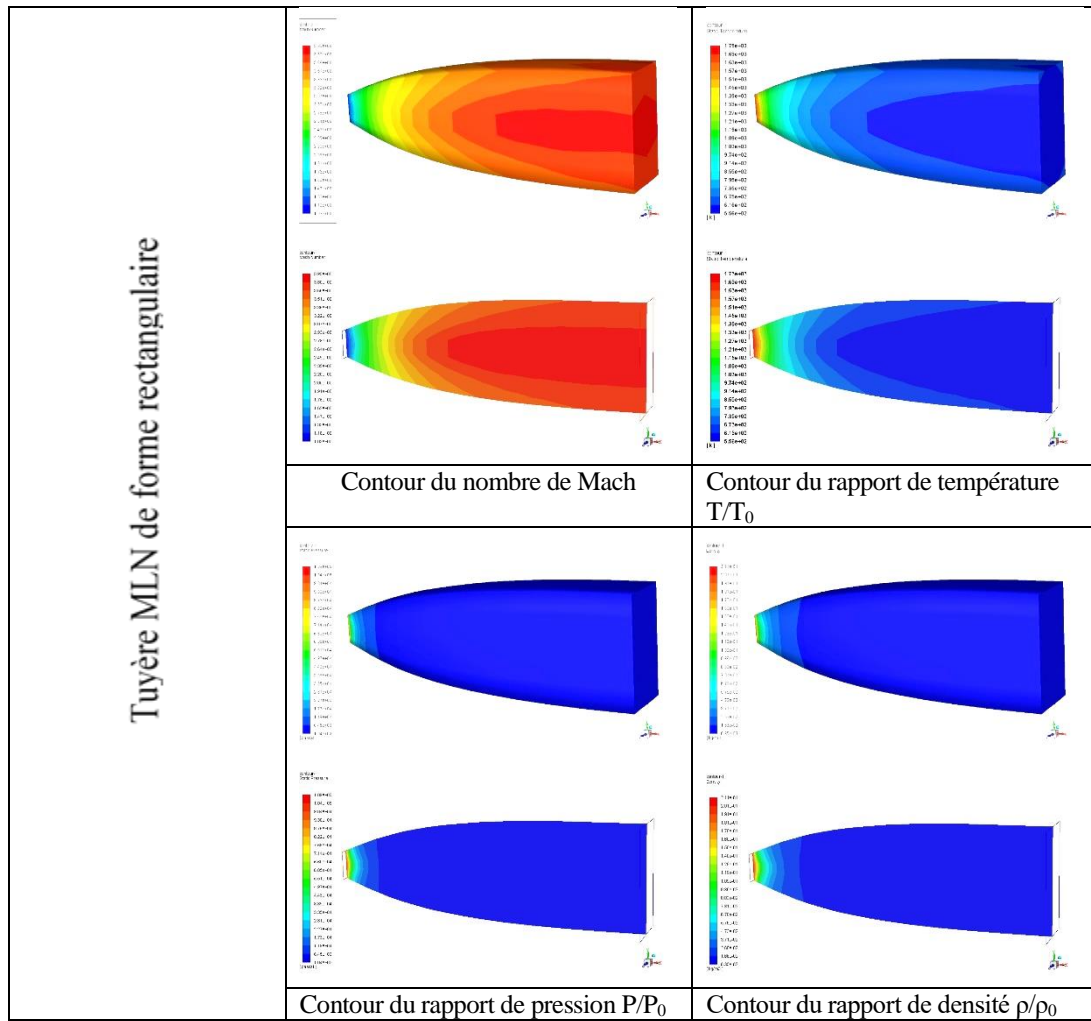


Figure 4.16 : Allure des contours de la tuyère tridimensionnelle

MLN à section de sortie rectangulaire

Des allures des contours du nombre de Mach ont été présentées. La figure 4.17 illustre ses contours sous formes de section le long de la tuyère MLN tridimensionnelle à section de sortie rectangulaire allant du col a la section de sortie.

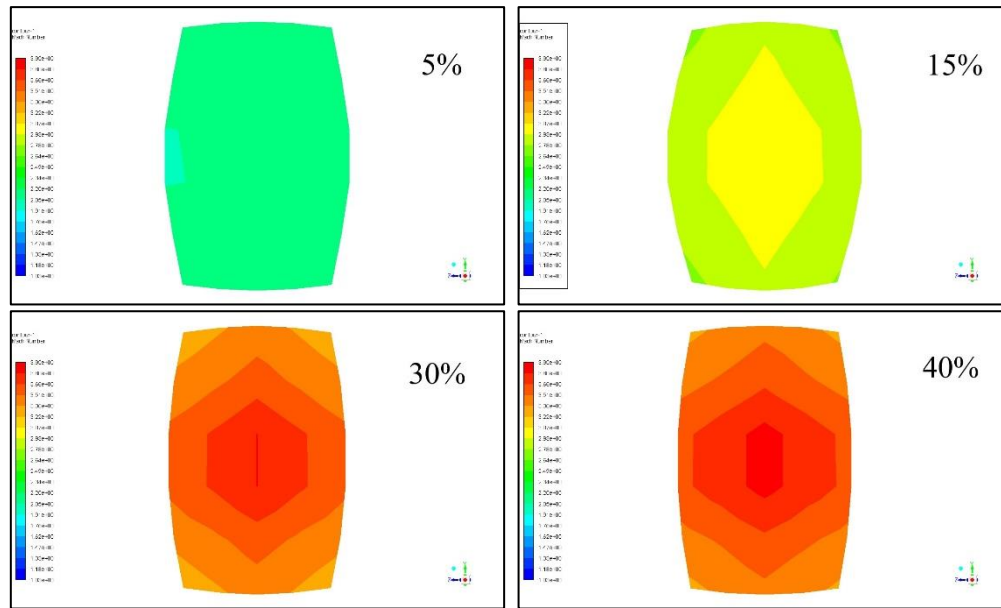


Figure 4.17 : Allure des contours du nombre de Mach le long de la tuyère MLN à section rectangulaire

Tableau 4.5 : Calcul d'erreur entre les résultats des tuyères MLN de forme circulaire et rectangulaire

	Mach	T / T_0	P / P_0	ρ / ρ_0
Tuyère MLN forme circulaire	4,00	0,273	0,00465	0,0170
Tuyère MLN forme rectangulaire	3,78	0,297	0,00595	0,0212
Différence (%)	5,50	8,081	23,849	19,811

4.2.6. Tuyère axisymétrique de forme elliptique

Dans cette partie, on va présenter les résultats de la tuyère tridimensionnelle de type MLN de section de sortie elliptique, entre autres les contours des iso-Mach, des iso-pression, des iso-température et des iso-densité.

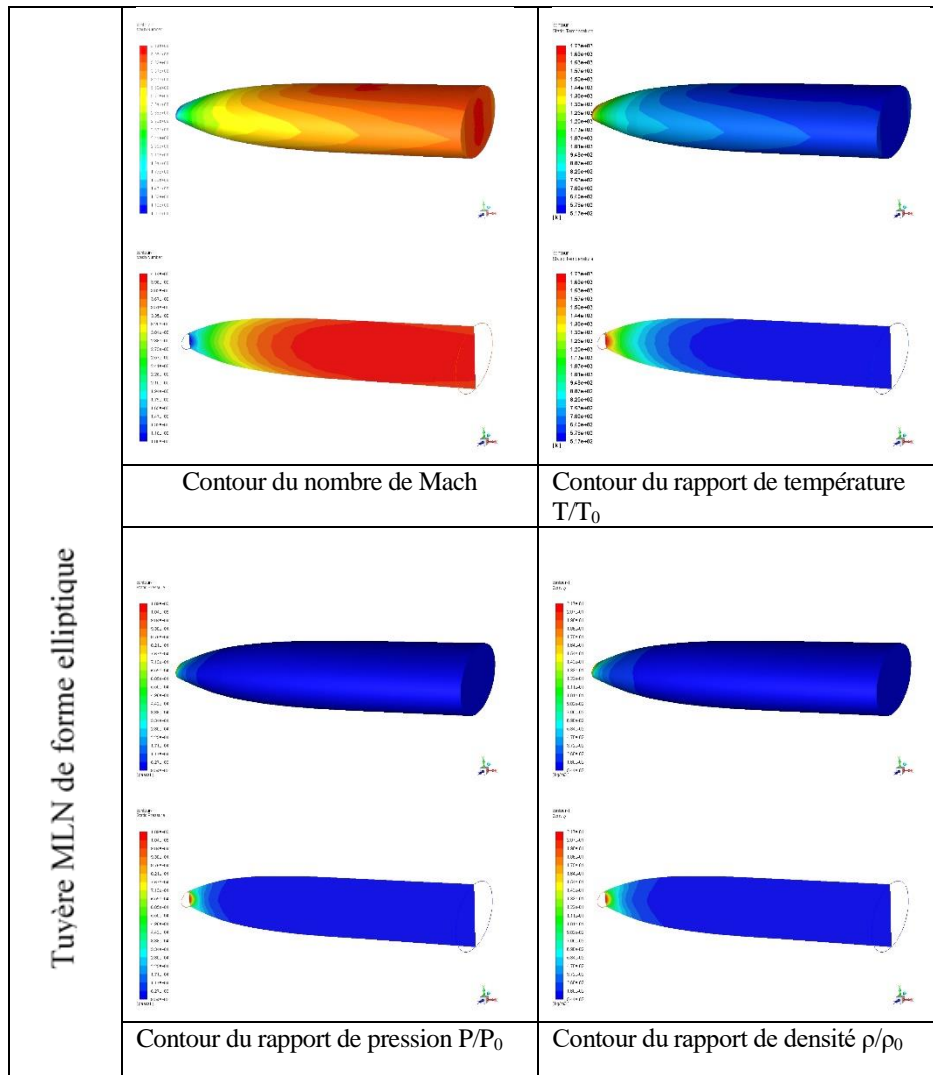


Figure 4.18 : Allure des contours de la tuyère tridimensionnelle
MLN à section de sortie elliptique

Des allures des contours du nombre de Mach ont été présentées. La figure 4.19 illustre ses contours sous formes de section le long de la tuyère MLN tridimensionnelle à section de sortie elliptique allant du col a la section de sortie.

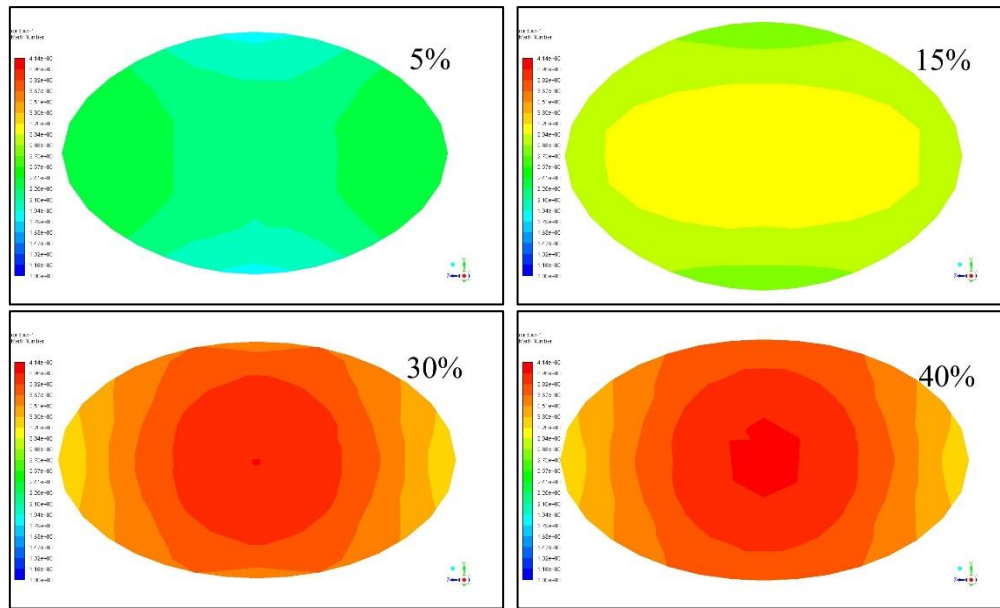


Figure 4.19 : Allure des contours du nombre de Mach le long de la tuyère MLN à section elliptique

Tableau 4.6 : Calcul d'erreur entre les résultats des tuyères MLN de forme circulaire et elliptique

	Mach	T / T_0	P / P_0	ρ / ρ_0
Tuyère MLN forme circulaire	4,00	0,273	0,00465	0,0170
Tuyère MLN forme elliptique	3,73	0,297	0,00595	0,0212
Différence (%)	6,75	9,901	26,772	23,423

4.2.7. Comparaison des tuyères tridimensionnelle asymétrique MLN

Dans cette section, on va présenter une comparaison entre les différentes formes des tuyères tridimensionnelles asymétriques avec celle de la tuyère axisymétrique de section de sortie circulaire qui donne un nombre de Mach de sortie $M_s=4,00$. La figure 4.20 représente une comparaison du nombre de mach le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type MLN, on remarque que le nombre de Mach augmente progressivement le long de la tuyère en raison de l'expansion du flux. Les tuyères circulaire et elliptique présentent une augmentation plus régulière, indiquant un écoulement stable et symétrique. Les tuyères à angles vifs (carrée et hexagonale) montrent des variations plus abruptes du nombre de Mach en raison des effets des bords et des angles qui génèrent des ondes de choc et des séparations d'écoulement. Les tuyères excentrées peuvent provoquer une distribution asymétrique du nombre de Mach, ce qui peut affecter la stabilité de l'écoulement.

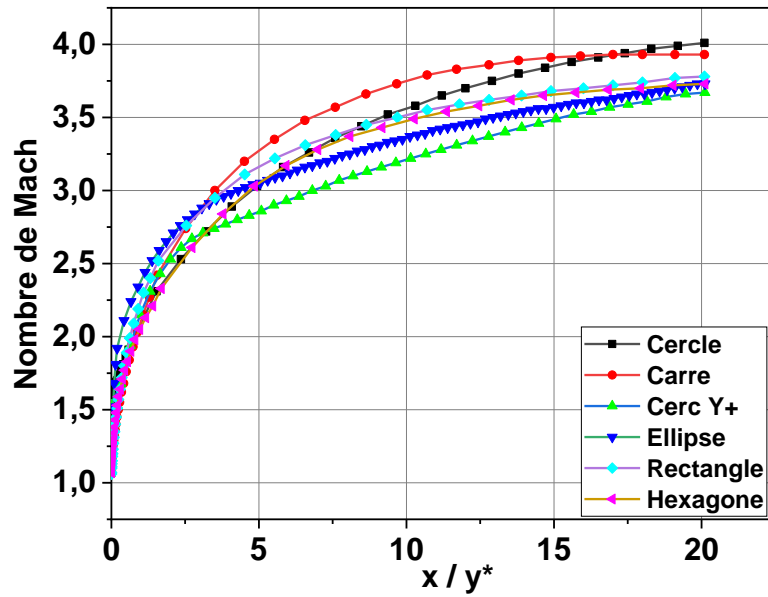


Figure 4.20 : Variation du nombre de mach le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type MLN

La figure 4.21 représente une comparaison du rapport de température T/T_0 le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type MLN, on remarque que la température relative diminue au fur et à mesure que l'écoulement avance, car l'énergie thermique est convertie en énergie cinétique. Les tuyères circulaire et elliptique présentent une diminution plus progressive de la température, indiquant un écoulement régulier. Les tuyères à angles vifs montrent des variations brusques de température, causées par des ondes de choc qui réchauffent localement certaines régions du flux. Les tuyères excentrées provoquent une distribution asymétrique de la température, ce qui peut affecter la gestion thermique du système.

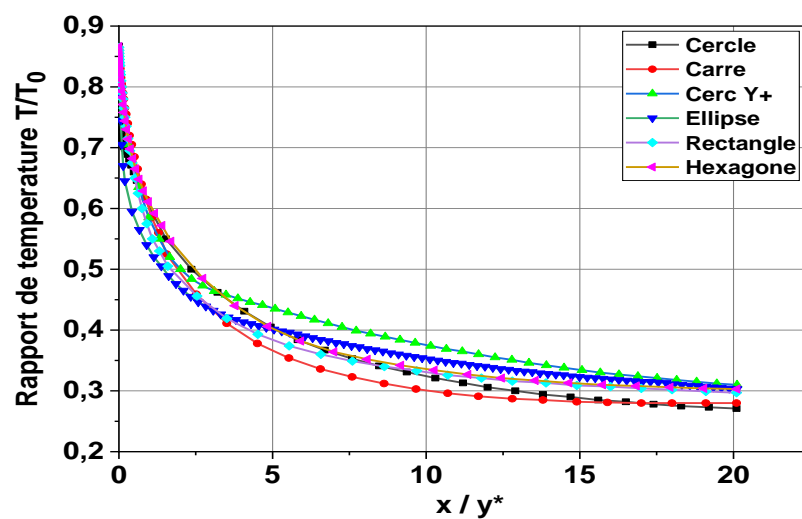


Figure 4.21 : Variation du rapport de température T/T_0 le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type MLN

La figure 4.22 représente une comparaison du rapport de pression P/P_0 le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type MLN, on remarque que la pression relative diminue le long de la tuyère en raison de l'expansion continue de l'écoulement. Dans les tuyères circulaire et elliptique, la diminution de pression est progressive, indiquant un écoulement bien contrôlé. Les tuyères carrées et hexagonales montrent des variations soudaines de la pression, ce qui suggère la présence d'ondes de choc ou de turbulences. Les tuyères excentrées présentent une distribution asymétrique de la pression, ce qui peut entraîner des forces irrégulières sur les parois internes.

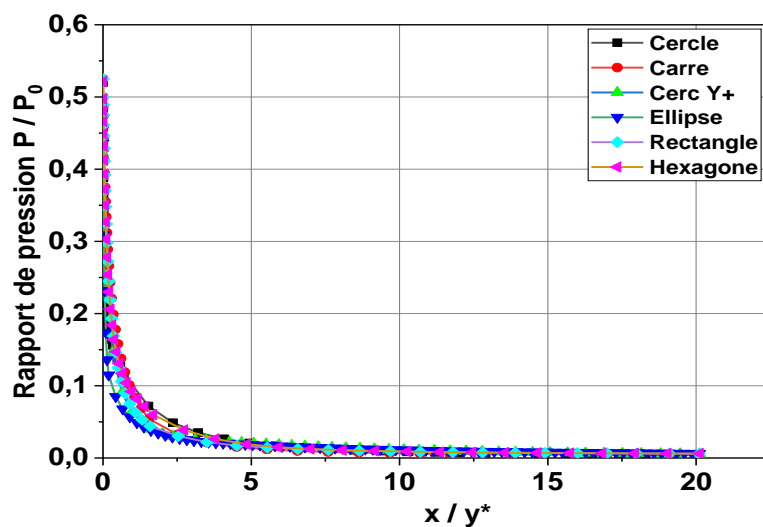


Figure 4.22 : Variation du rapport de pression P/P_0 le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type MLN

La figure 4.23 représente une comparaison du rapport de densité ρ/ρ_0 le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type MLN, on remarque que la densité diminue avec l'avancement dans la tuyère, conséquence de l'expansion du flux et de l'accélération de la vitesse. Les tuyères circulaire et elliptique montrent une réduction progressive et stable de la densité. Les tuyères à angles vifs (carrée et hexagonale) présentent des changements brusques de densité, causés par des ondes de choc et des séparations d'écoulement. Les tuyères excentrées peuvent entraîner une distribution irrégulière de la densité, ce qui influence l'équilibre des forces dans le système. D'après la figure 4.38, on remarque que les courbes de densité suivent le même comportement que la pression, du fait de leur interdépendance thermodynamique. Les tuyères Cerc Y+ et hexagonale présentent la diminution de densité la plus rapide, ce qui traduit une expansion volumique intense du jet. Les formes circulaire et rectangulaire affichent un profil de densité plus modéré.

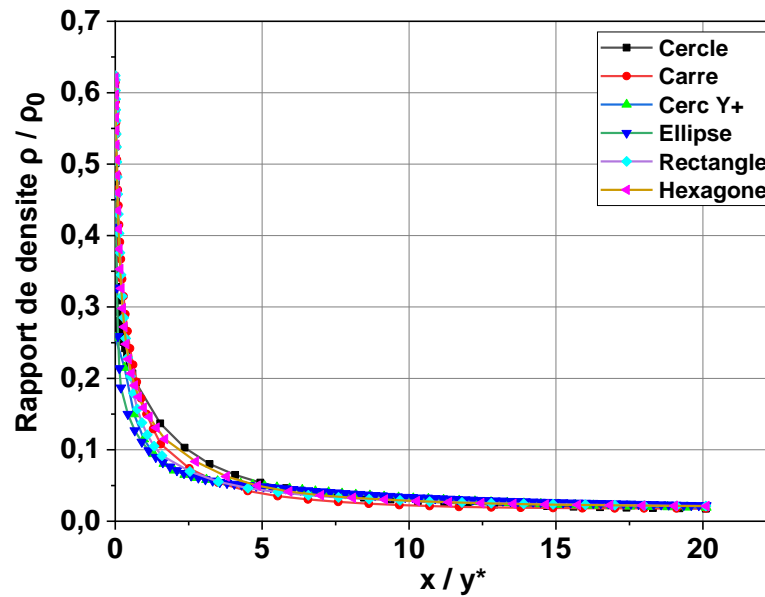


Figure 4.23 : Variation du rapport de densité ρ/ρ_0 le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type MLN

4.3. Contour des tuyères asymétrique tridimensionnelle double galbe

4.3.1. Tuyère axisymétrique de forme circulaire

La figure 4.24 présente la variation du nombre de Mach le long du contour de la tuyère supersonique axisymétrique double galbe de section de sortie circulaire où le nombre de Mach de sortie $M_S = 4,00$ et la température de stagnation $T_0 = 2\,000\text{ K}$ pour le modèle HT. Elle montre une augmentation rapide du nombre de Mach à travers la paroi juste après le col. Ensuite, une progression plus lente est observée jusqu'à ce que la valeur de Mach atteigne la valeur de Mach de conception à la sortie de la tuyère $M_S = 4,00$.

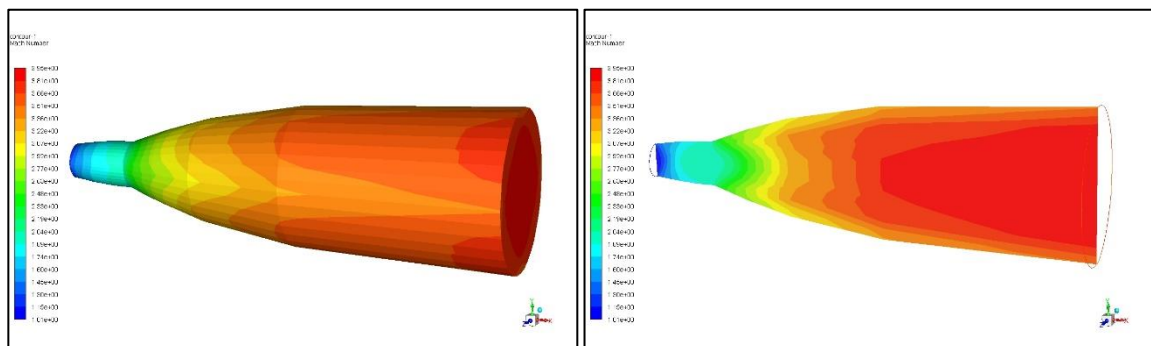


Figure 4.24 : Allure des contours du nombre de mach le long de la tuyère double galbe tridimensionnelle à section de sortie circulaire

Résultats et commentaires

La figure 4.25 présente une comparaison de nombre de mach de l'écoulement d'un gaz à haute température calculer par simulation sur Ansys-Fluent et par simulation numériquement (Fortran), nous notons que le nombre de Mach augmente progressivement après le col, confirmant l'accélération du flux supersonique. La discontinuité vers $X/y^* \approx 5$ correspond au passage par le col. Les légères différences entre les deux courbes reflètent probablement des variations dans le traitement numérique de l'expansion ou la position des ondes de choc faibles. L'accord global reste satisfaisant.

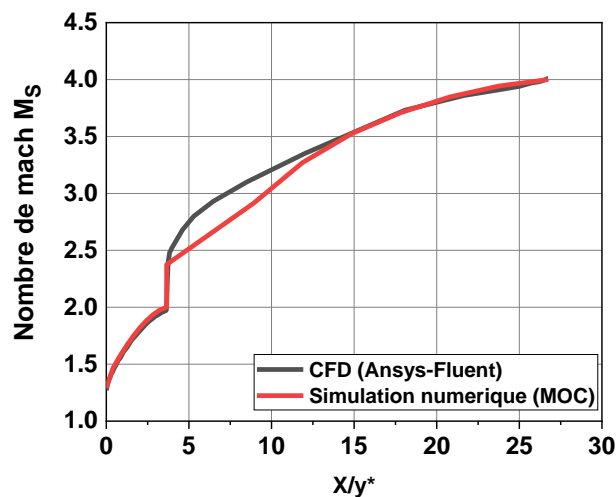


Figure 4. 25 : Comparaison des résultats du nombre de mach le long du contour de la tuyère double galbe entre CFD (Ansys-Fluent) et la simulation numérique (MOC)

La figure 4.26 ci-dessous représentent la variation de la température statique le long du contour de la tuyère double galbe. Le rapport T/T_0 donne une indication sur le choix convenable du matériau qui va résister à cette température.

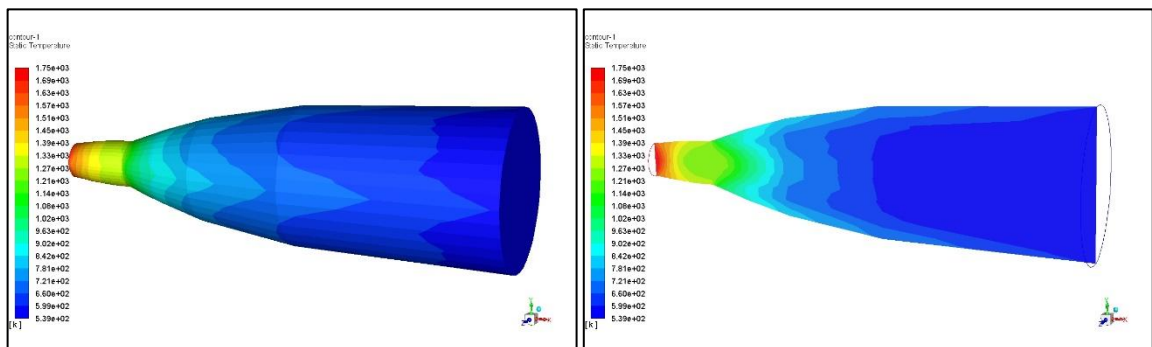


Figure 4.26 : Allure des contours du rapport de température T/T_0 de la tuyère tridimensionnelle double galbe à section de sortie circulaire

Résultats et commentaires

La figure 4.27 représente une comparaison du rapport de température T/T_0 le long de la tuyère tridimensionnelle double galbe à section de sortie circulaire calculer par simulation sur Ansys-Fluent et par simulation numériquement (Fortran) , nous notons que ce graphique illustre l'évolution du rapport de température le long de la tuyère. Une chute nette de T/T_0 est observée juste après le col, traduisant une expansion isentropique rapide. L'écart entre les courbes "Simulation" et "Numérique" dans la zone aval peut être attribué à des différences de modélisation thermique ou à la résolution du maillage. Malgré cela, la tendance générale est cohérente.

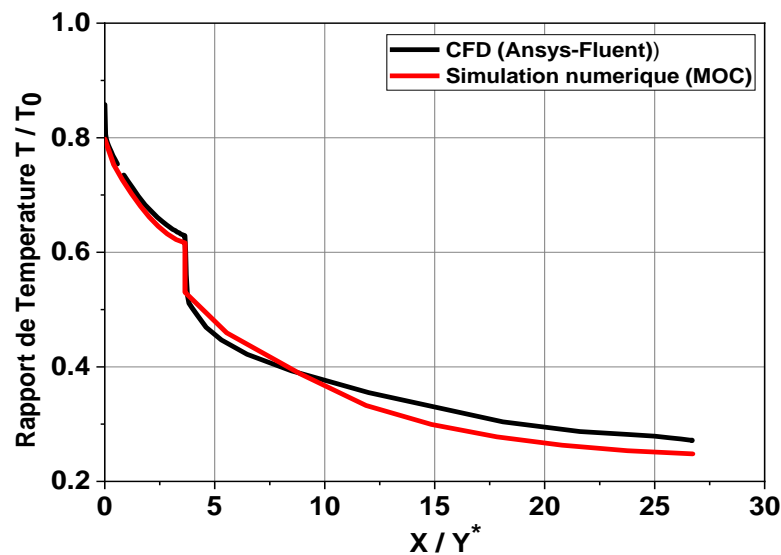


Figure 4. 27 : Comparaison des résultats du rapport de la température T/T_0 le long du contour de la tuyère double galbe entre CFD (Ansys-Fluent) et la simulation numérique (MOC)

La figure 4.28 ci-dessous présente la variation de pression statique le long du contour de la tuyère double galbe. On présente la variation du rapport de pression qui sert à déterminer la force de pression exercé sur la paroi de la tuyère.

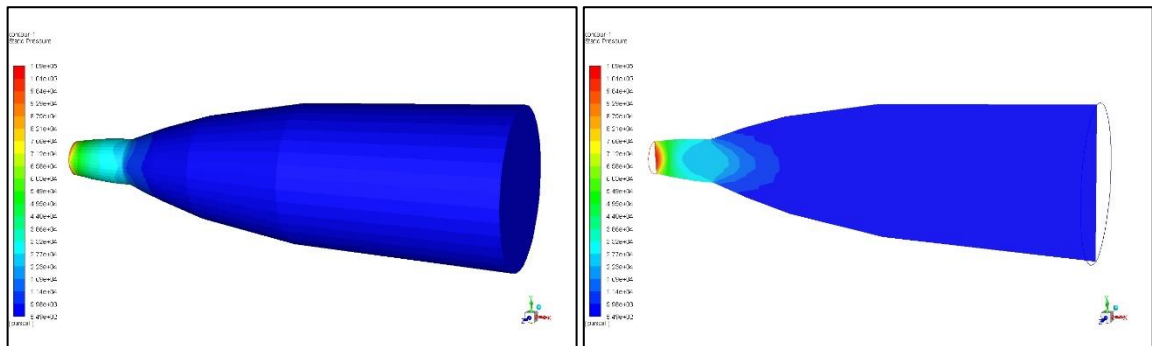


Figure 4.28 : Allure des contours du rapport de pression P/P_0 de la tuyère tridimensionnelle double galbe à section de sortie circulaire

Résultats et commentaires

La figure 4.29 représente une comparaison du rapport de pression P/P_0 le long de la tuyère tridimensionnelle double galbe à section de sortie circulaire calculer par simulation sur Ansys-Fluent et par simulation numériquement (Fortran) , on remarque que la pression relative chute brutalement après le col, comme prévu dans une expansion supersonique. Le modèle numérique prédit une dépression plus prononcée par rapport à la simulation, ce qui peut indiquer une surestimation de l'expansion ou une différence dans la modélisation des effets visqueux. Le comportement global reste similaire.

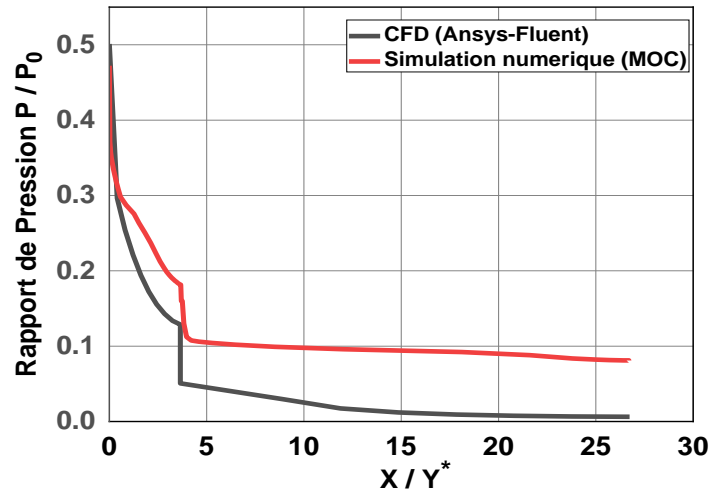


Figure 4. 29 : Comparaison des résultats du rapport de pression P/P_0 le long du contour de la tuyère double galbe entre CFD (Ansys-Fluent) et la simulation numérique (MOC)

La figure 4.30 ci-dessous présente la variation de densité de ρ/ρ_0 le long du contour de la tuyère double galbe. On présente la variation du rapport de pression qui sert à déterminer la force de pression exercé sur la paroi de la tuyère.

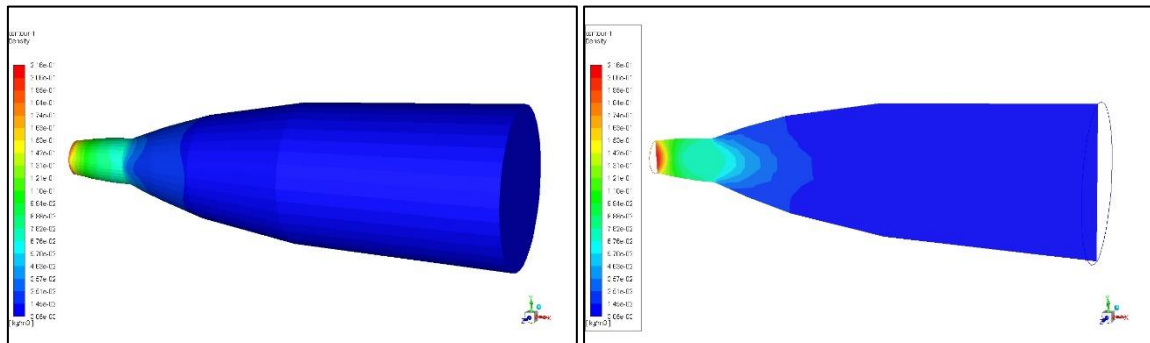


Figure 4.30 : Allure des contours du rapport densité de ρ/ρ_0 de la tuyère tridimensionnelle double galbe à section de sortie circulaire

Résultats et commentaires

La figure 4.31 représente une comparaison du rapport de densité de ρ/ρ_0 le long de la tuyère tridimensionnelle double galbe à section de sortie circulaire calculer par simulation sur Ansys-Fluent et par simulation numériquement (Fortran) , nous notons que le rapport de densité suit la même tendance que celui de la pression, avec une diminution continue après le col. Les écarts entre les deux courbes à l'aval peuvent s'expliquer par des choix numériques ou des hypothèses différentes dans le traitement des gradients de densité. La cohérence des profils confirme la validité de la simulation.

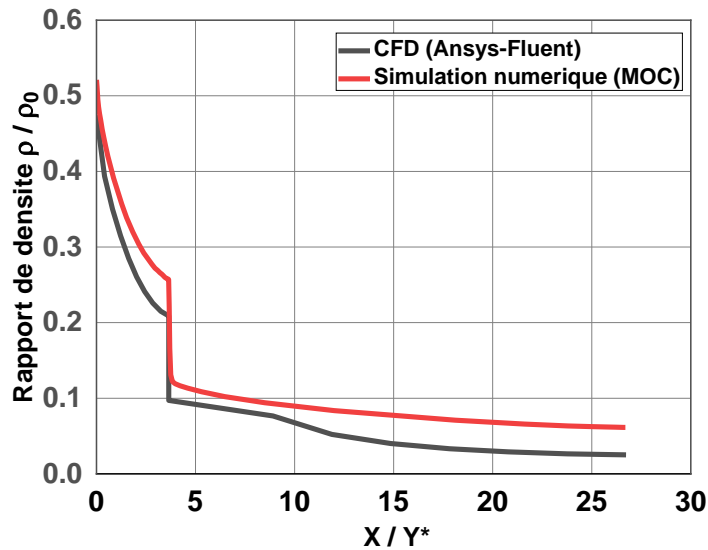


Figure 4. 31 : Comparaison des résultats du rapport de densité ρ/ρ_0 le long du contour de la tuyère double galbe entre CFD (Ansys-Fluent) et la simulation numérique (MOC)

Après avoir comparé les résultats du numérique et ceux obtenus par la simulation, on va directement calculer l'erreur. On peut définir l'erreur comme étant la différence entre la valeur numérique et celle obtenue par simulation fluent d'après la relation (4.1) précédente.

Tableau 4.7 : Calcul d'erreur entre les résultats par simulation Ansys-Fluent et numérique

	Mach	T / T_0	P / P_0	ρ / ρ_0
Programme numérique	4,00	0.27472	0.005477	0.01993
Simulation fluent	4	0.272	0.00312	0.0115
Erreur (%)	0,00	0.99	42.962	42.298

4.3.2. Tuyère axisymétrique de forme carré

Dans cette partie, on va présenter les résultats de la tuyère tridimensionnelle de type double galbe de section de sortie carré, entre autres les contours des iso-Mach, des iso-pression, des iso-température et des iso-densité. La figure 4.32 montre les résultats de ses contours.

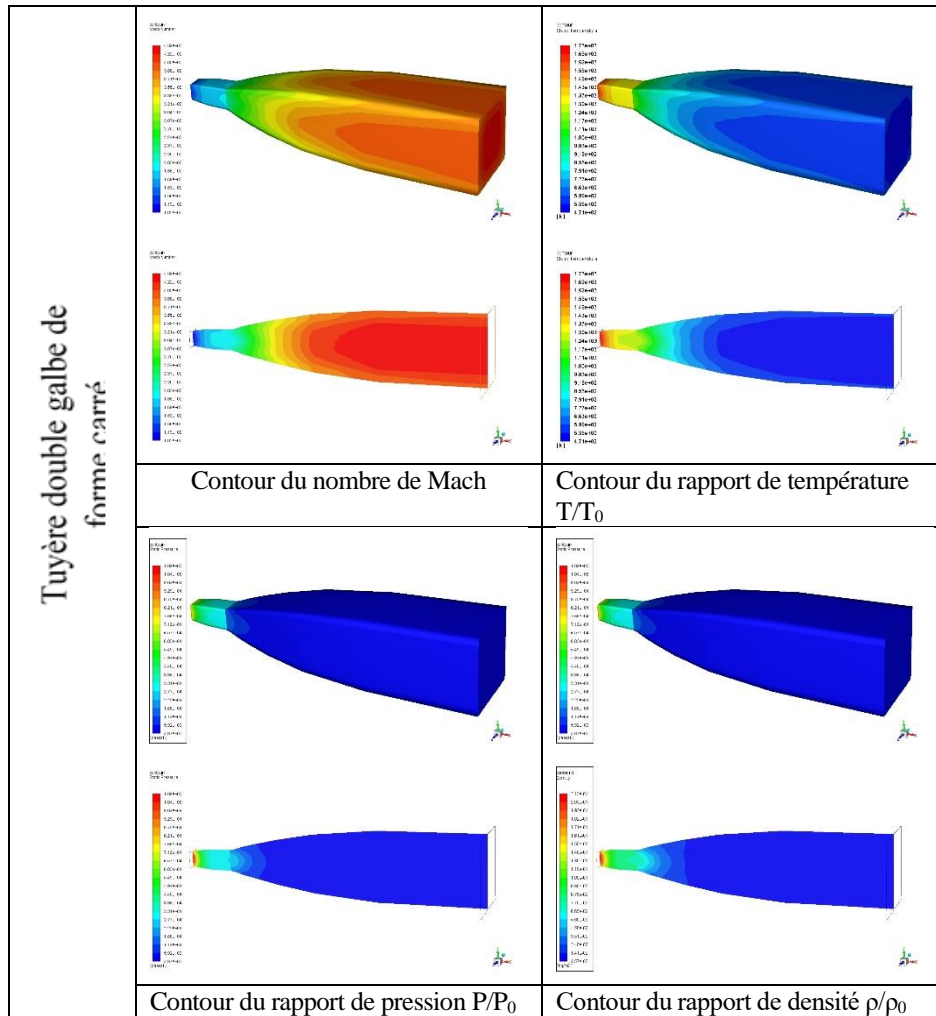


Figure 4.32 : Allure des contours de la tuyère tridimensionnelle double galbe à section de sortie carré

Après avoir comparé les résultats du numérique à ceux obtenus par la simulation, on va directement calculer la Différence. On peut définir la Différence comme étant la différence entre la valeur numérique et celle obtenue par simulation fluent en utilisant l'expression (4.1).

Tableau 4.8 : Calcul d'erreur entre les résultats des tuyères double galbe de formes circulaire et carré

	Mach	T / T_0	P / P_0	ρ / ρ_0
Tuyère double galbe forme circulaire	4,00	0.272	0.00312	0.0115
Tuyère double galbe forme carré	3.92	0.28	0.00405	0.015
Différence (%)	2	2.5	22.962	23.333

4.3.3. Tuyère axisymétrique de forme circulaire placée verticalement

Dans cette partie, on va présenter les résultats de la tuyère tridimensionnelle de type double galbe de section de sortie circulaire placée verticalement, entre autres les contours des iso-Mach, des iso-pression, des iso-température et des iso-densité.

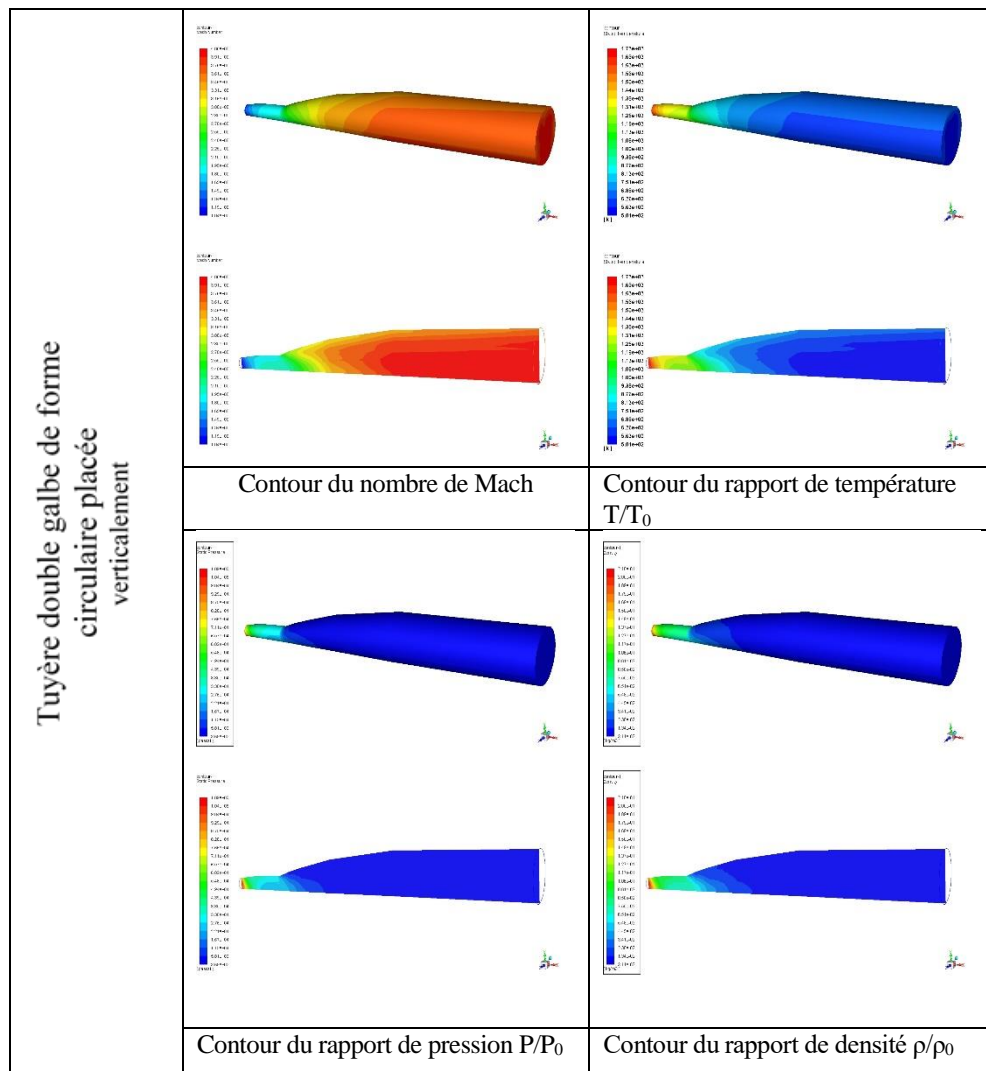


Figure 4.33 : Allure des contours de la tuyère tridimensionnelle double galbe à section de sortie circulaire placée verticalement

Résultats et commentaires

Tableau 4.9 : Calcul d'erreur entre les résultats des tuyères double galbe de formes circulaire et circulaire placée verticalement

	Mach	T / T_0	P / P_0	ρ / ρ_0
Tuyère double galbe forme circulaire	4,00	0.272	0.00312	0.0115
Tuyère double galbe forme circulaire placée verticalement	3.71	0.318	0.00509	0.0179
Différence (%)	7.25	14.465	38.703	35.754

4.3.4. Tuyère axisymétrique de forme hexagonale

Dans cette partie, on va présenter les résultats de la tuyère tridimensionnelle de type double galbe de section de sortie hexagonale, entre autres les contours des iso-Mach, des iso-pression, des iso-température et des iso-densité.

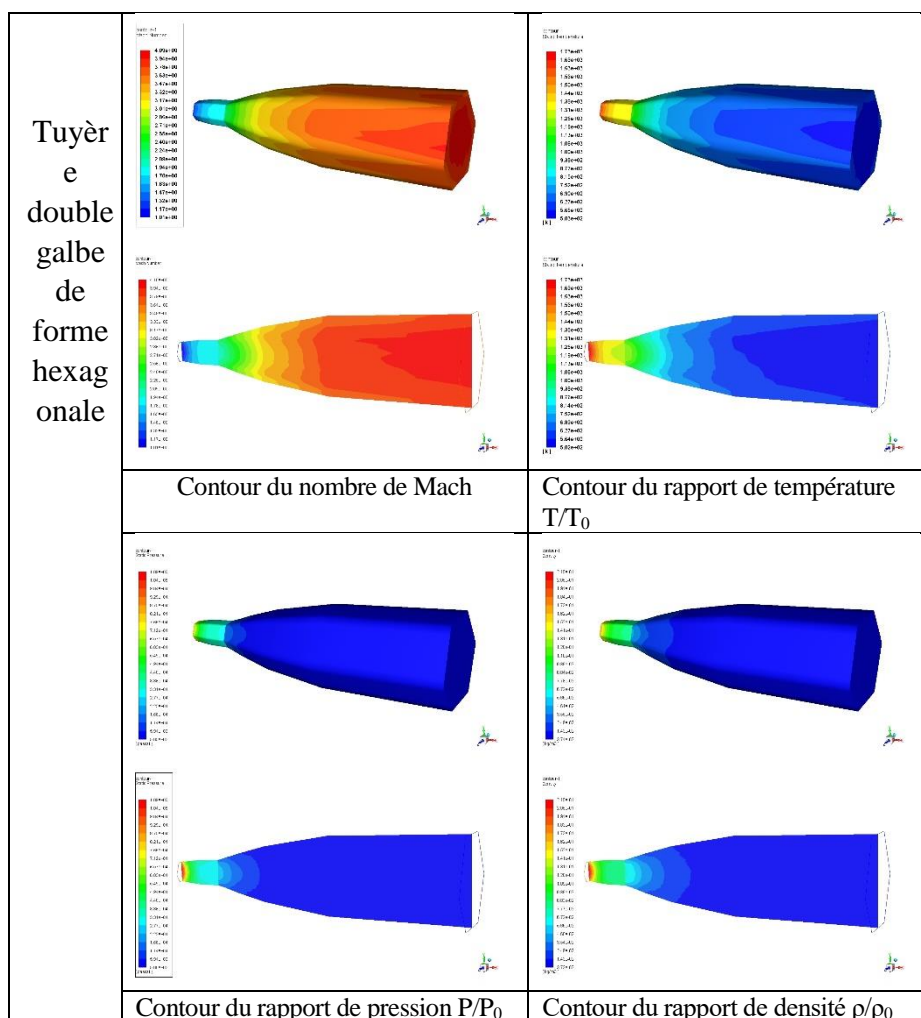


Figure 4.34 : Allure des contours de la tuyère tridimensionnelle double galbe à section de sortie hexagonale

Tableau 4.10 : Calcul d'erreur entre les résultats des tuyères double galbe de formes circulaire et hexagonale

	Mach	T / T_0	P / P_0	ρ / ρ_0
Tuyère double galbe forme circulaire	4,00	0.272	0.00312	0.0115
Tuyère double galbe forme hexagonale	3.87	0.266	0.00348	0.0165
Différence (%)	3.25	2.206	10.345	30.303

4.3.5. Tuyère axisymétrique de forme rectangulaire

Dans cette partie, on va présenter les résultats de la tuyère tridimensionnelle de type double galbe de section de sortie rectangulaire, entre autres les contours des iso-Mach, des iso-pression, des iso-température et des iso-densité.

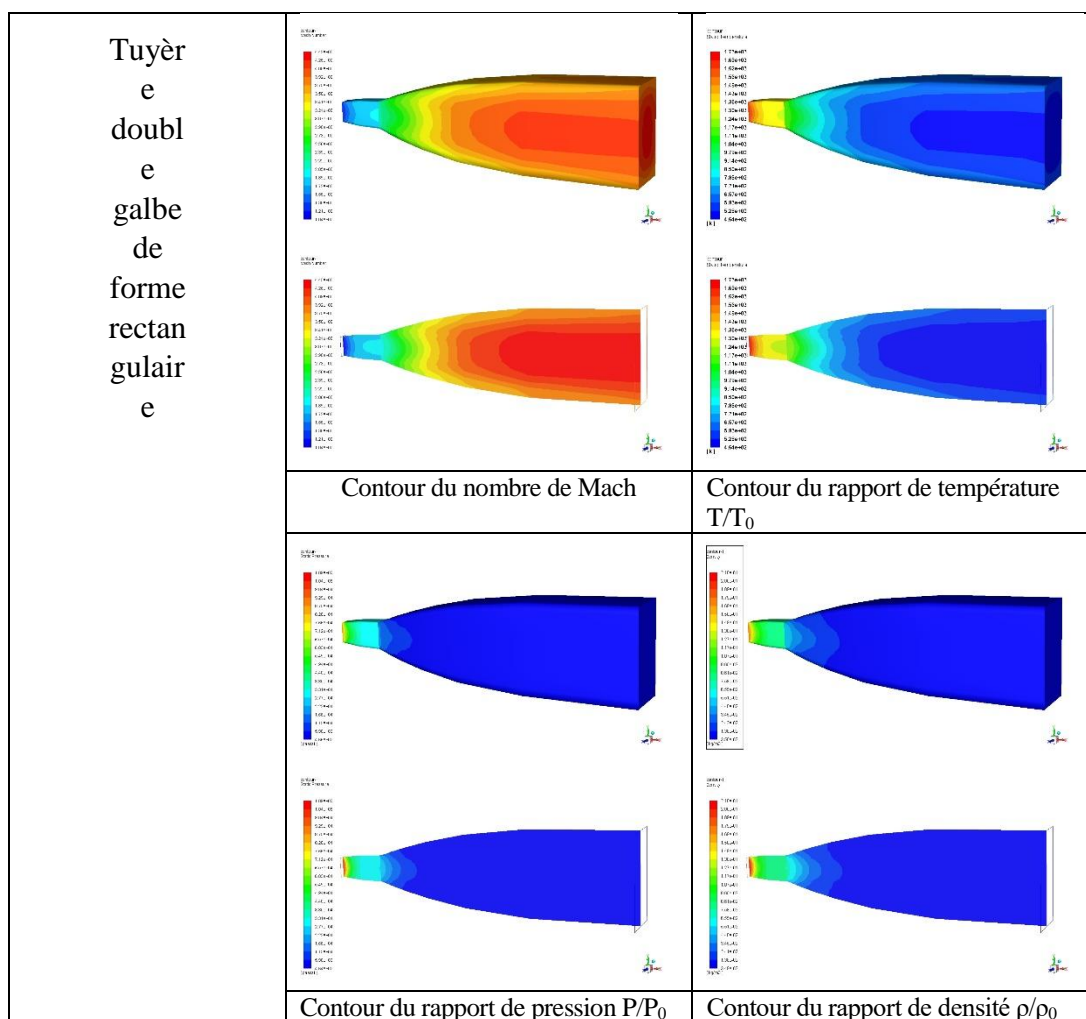


Figure 4.35 : Allure des contours de la tuyère tridimensionnelle double galbe à section de sortie rectangulaire

Résultats et commentaires

Tableau 4.11 : Calcul d'erreur entre les résultats des tuyères double galbe de formes circulaire et rectangulaire

	Mach	T / T_0	P / P_0	ρ / ρ_0
Tuyère double galbe forme circulaire	4,00	0.272	0.00312	0.0115
Tuyère double galbe forme rectangulaire	3.77	0.303	0.00562	0.0195
Différence (%)	5.75	10.231	44.484	41.025

4.3.6. Tuyère axisymétrique de forme elliptique

Dans cette partie, on va présenter les résultats de la tuyère tridimensionnelle de type double galbe de section de sortie elliptique, entre autres les contours des iso-Mach, des iso-pression, des iso-température et des iso-densité.

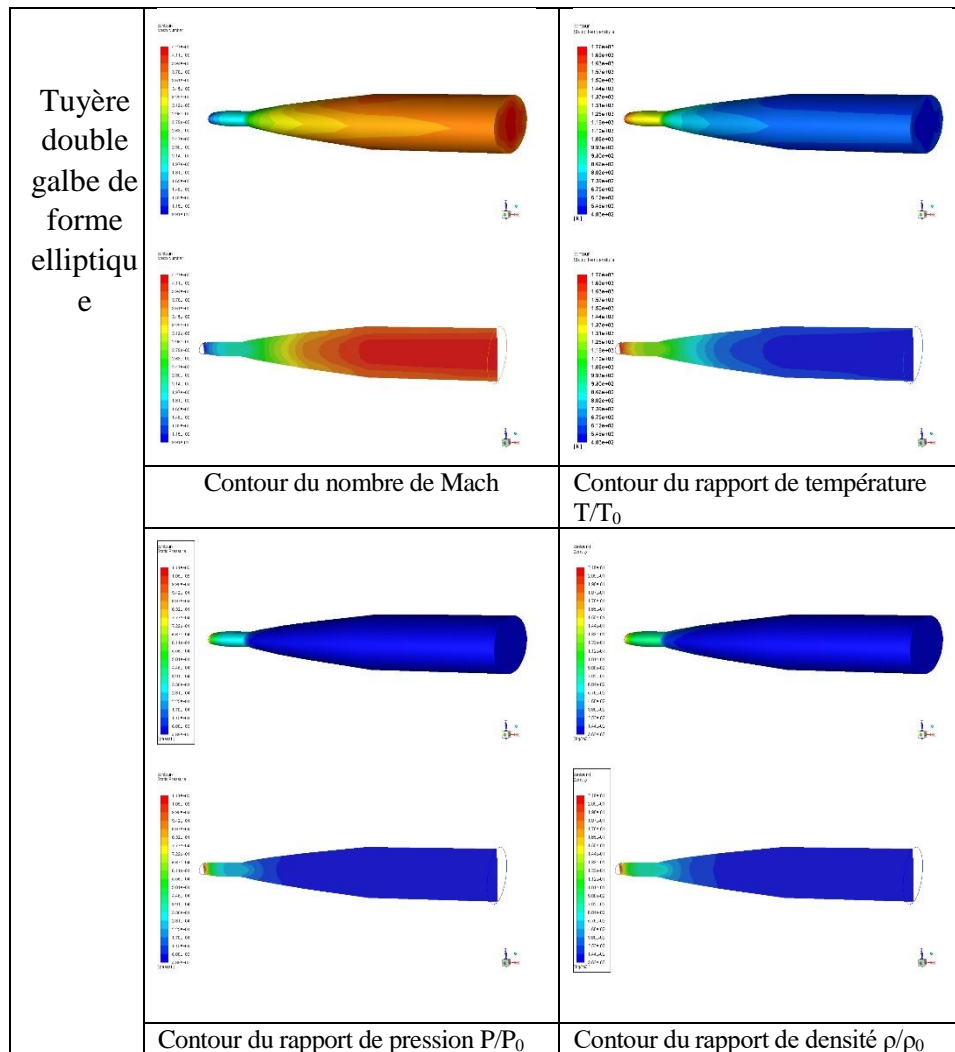


Figure 4.36 : Allure des contours de la tuyère tridimensionnelle double galbe à section de sortie elliptique

Tableau 4.12 : Calcul d'erreur entre les résultats des tuyères double galbe
de formes circulaire et elliptique

	Mach	T / T_0	P / P_0	ρ / ρ_0
Tuyère double galbe forme circulaire	4,00	0.272	0.00312	0.0115
Tuyère double galbe forme elliptique	3.79	0.296	0.00488	0.0165
Différence (%)	5.25	8.108	36.066	30.303

4.3.7. Comparaison des tuyères tridimensionnelle asymétrique double galbe

Dans cette section, on va présenter une comparaison entre les différentes formes des tuyères tridimensionnelles asymétriques avec celle de la tuyère axisymétrique de section de sortie circulaire qui donne un nombre de Mach de sortie $M_s=4,00$. La figure 4.37 représente une comparaison du nombre de mach le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type double galbe, on remarque que toutes les configurations présentent une forte accélération du jet après le col, avec une transition nette vers l'écoulement supersonique ($Mach > 1,5$) dès $x/y^* \approx 3$. La géométrie Cerc Y+ atteint les valeurs de Mach les plus élevées, dépassant Mach 4, ce qui indique qu'elle favorise l'accélération du jet plus efficacement que les autres formes. Les tuyères elliptique et carrée montrent des vitesses légèrement inférieures.

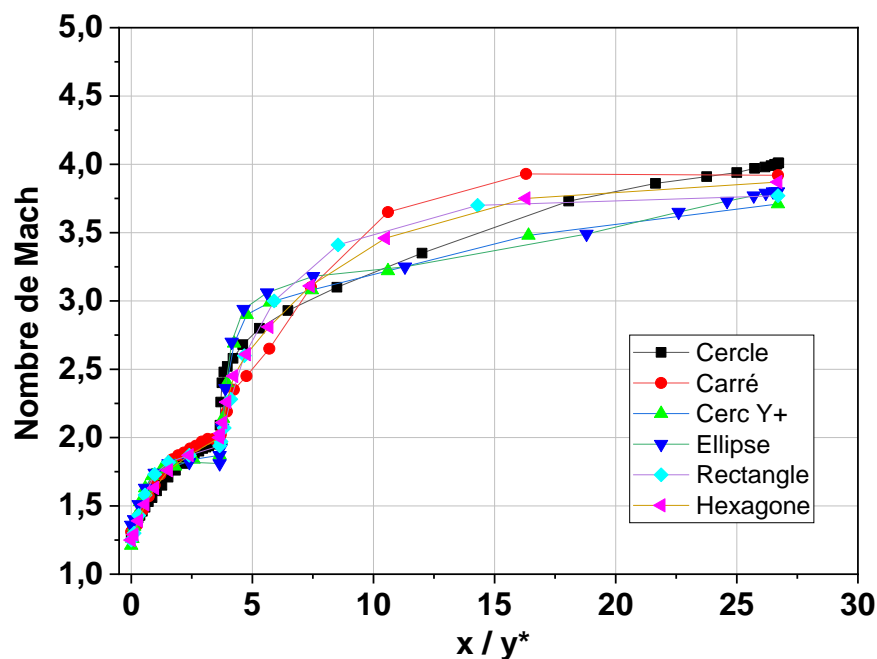


Figure 4.37 : Variation du nombre de mach le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type double galbe

La figure 4.38 représente une comparaison du rapport de température T/T_0 le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type double galbe, on remarque que la courbe T/T_0 montre une diminution rapide de la température après la sortie de la tuyère, suivie d'un régime quasi-stationnaire à partir de $X/y^* \approx 10$. Les géométries circulaire et rectangulaire conservent une température réduite relativement plus élevée dans la zone post-décompression, traduisant un ralentissement du processus d'expansion. En revanche, la tuyère de forme circulaire aplatie à la base (Cerc Y+) affiche une chute de température plus marquée, révélant une expansion plus agressive du jet ou des phénomènes de turbulence accrus.

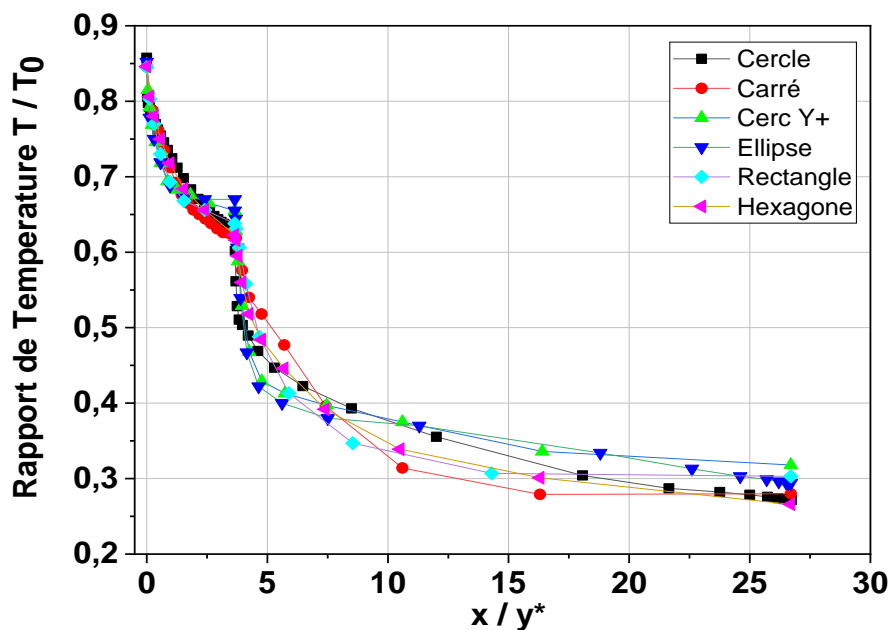


Figure 4.38 : Variation du rapport de température T/T_0 le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type double galbe

La figure 4.39 représente une comparaison du rapport de pression P/P_0 le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type double galbe, on remarque que la pression chute brutalement en aval du col, avec un léger palier ou rebond autour de $X/y^* \approx 4-5$, probablement dû à des ondes de choc ou à des variations locales de pression. Les différences entre les géométries sont minimales, bien que la Cercle Y+ présente une chute de pression légèrement plus rapide, ce qui souligne sa capacité à générer une expansion efficace.

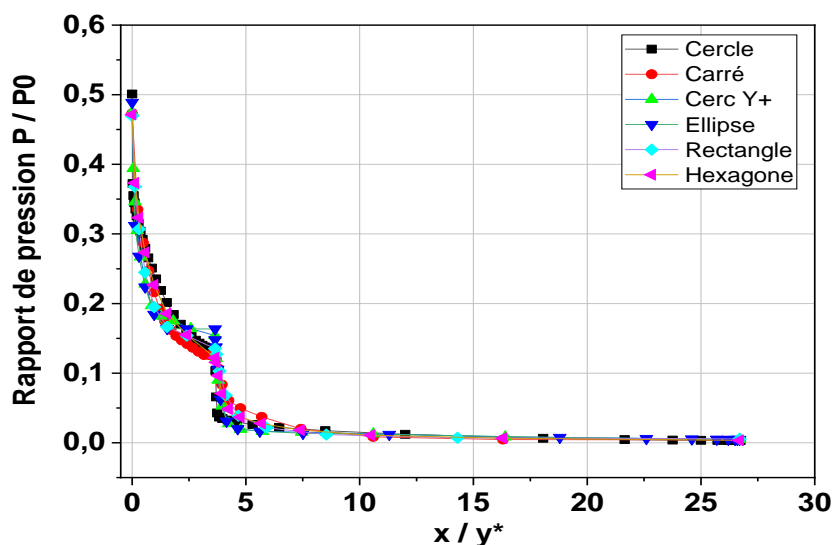


Figure 4.39 : Variation du rapport de pression P/P_0 le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type double galbe

La figure 4.40 représente une comparaison du rapport de densité ρ/ρ_0 le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type double galbe, on remarque que les courbes de densité suivent le même comportement que la pression, du fait de leur interdépendance thermodynamique. Les tuyères Cerc Y+ et hexagonale présentent la diminution de densité la plus rapide, ce qui traduit une expansion volumique intense du jet. Les formes circulaire et rectangulaire affichent un profil de densité plus modéré.

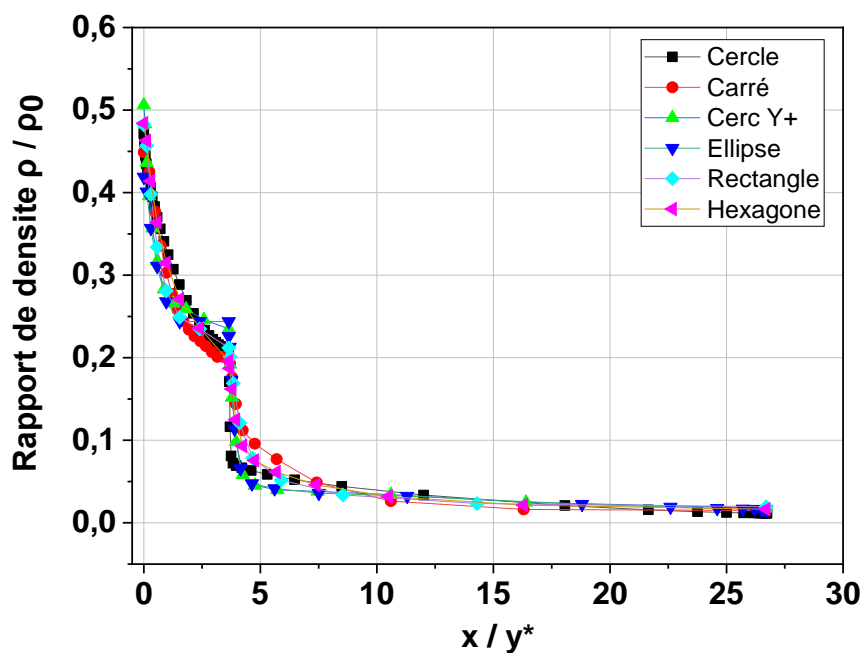


Figure 4.40 : Variation du rapport de densité ρ/ρ_0 le long des contours des tuyères tridimensionnelles de type double galbe

4.4. Impact des modèles de turbulences comparé au modèle non visqueux

Dans cette partie, on évalue l'effet de la viscosité sur la distribution du rapport de pression P/P_0 dans deux types de tuyères supersoniques tridimensionnelles à section circulaire : MLN et double galbe. Deux modèles de turbulence ont été pris en compte : $k-\varepsilon$ et $k-\omega$ SST, et ont été comparés à un modèle non visqueux. L'objectif est d'observer l'écart entre les modèles dans la prédiction du champ de pression, principalement affecté par les effets de couche limite.

4.4.1. L'impact sur la Tuyère axisymétrique de forme circulaire MLN

La figure 4.41 montre la variation du rapport de pression statique P/P_0 le long de la tuyère MLN circulaire pour les trois modèles : le modèle non visqueux et les modèles turbulents $k-\varepsilon$ et $k-\omega$ SST. Les résultats montrent une chute rapide de pression en aval du col, avec des différences mineures entre les modèles turbulents, principalement dans les zones de forts gradients de pression. Le modèle non visqueux surestime légèrement l'expansion en négligeant les effets de couche limite.

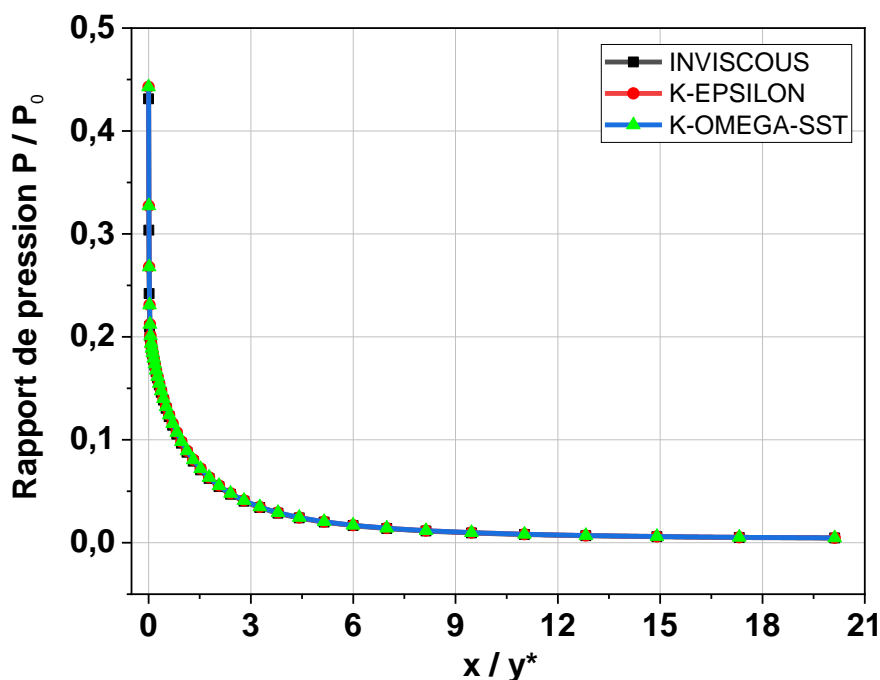


Figure 4.41 : Comparaison du rapport de pression P/P_0 dans une tuyère MLN circulaire pour les modèles non visqueux, $k-\varepsilon$ et $k-\omega$ SST.

4.4.2. L'impact sur la Tuyère axisymétrique de forme circulaire double galbe

Dans cette configuration plus complexe, la figure suivante met en évidence les différences dans la distribution de P/P_0 entre les modèles non visqueux et turbulents. On observe une baisse plus marquée et plus précoce du rapport de pression, due à la géométrie optimisée favorisant une expansion plus agressive. Les différences entre modèles sont visibles en aval de la gorge, où l'influence de la couche limite devient plus apparente.

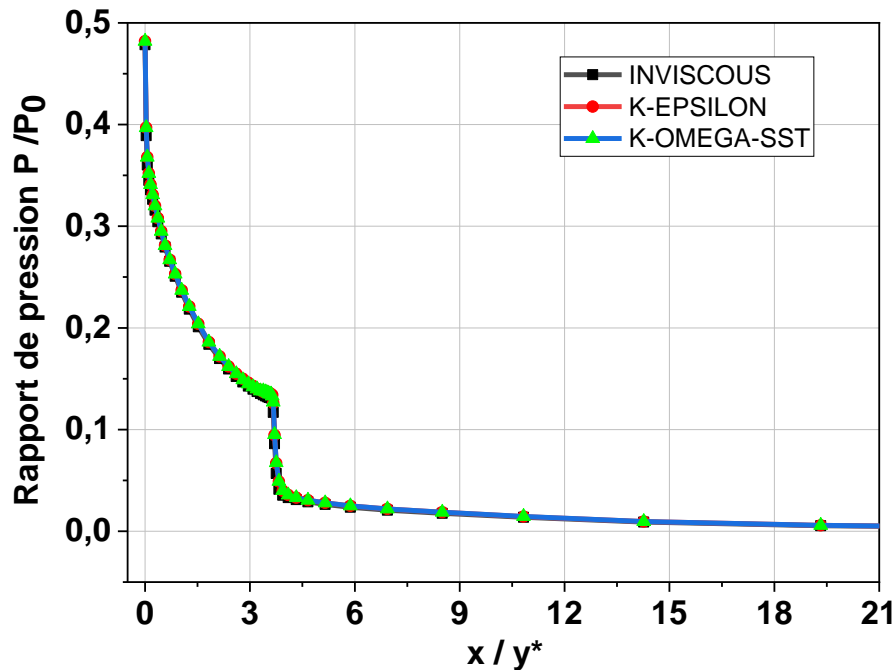


Figure 4.42: Comparaison du rapport de pression P/P_0 dans une tuyère double galbe circulaire pour les modèles non visqueux, $k-\epsilon$ et $k-\omega$ SST.

4.5. Impact de l'NPR

4.5.1. L'impact sur la Tuyère axisymétrique de forme circulaire MLN

La figure 4.43 montre l'évolution du champ d'écoulement dans la tuyère MLN circulaire pour différentes valeurs de NPR. À mesure que le NPR varie, on observe des modifications nettes dans la structure de l'écoulement, notamment l'apparition ou la disparition de chocs et zones d'expansion. Lorsque le NPR augmente, l'écoulement devient rapidement supersonique et des chocs obliques apparaissent plus tôt dans la tuyère. À $\text{NPR} = 200$, l'écoulement est quasi intégralement supersonique avec une forte expansion, ce qui indique un fonctionnement en régime fortement sur-expansé.

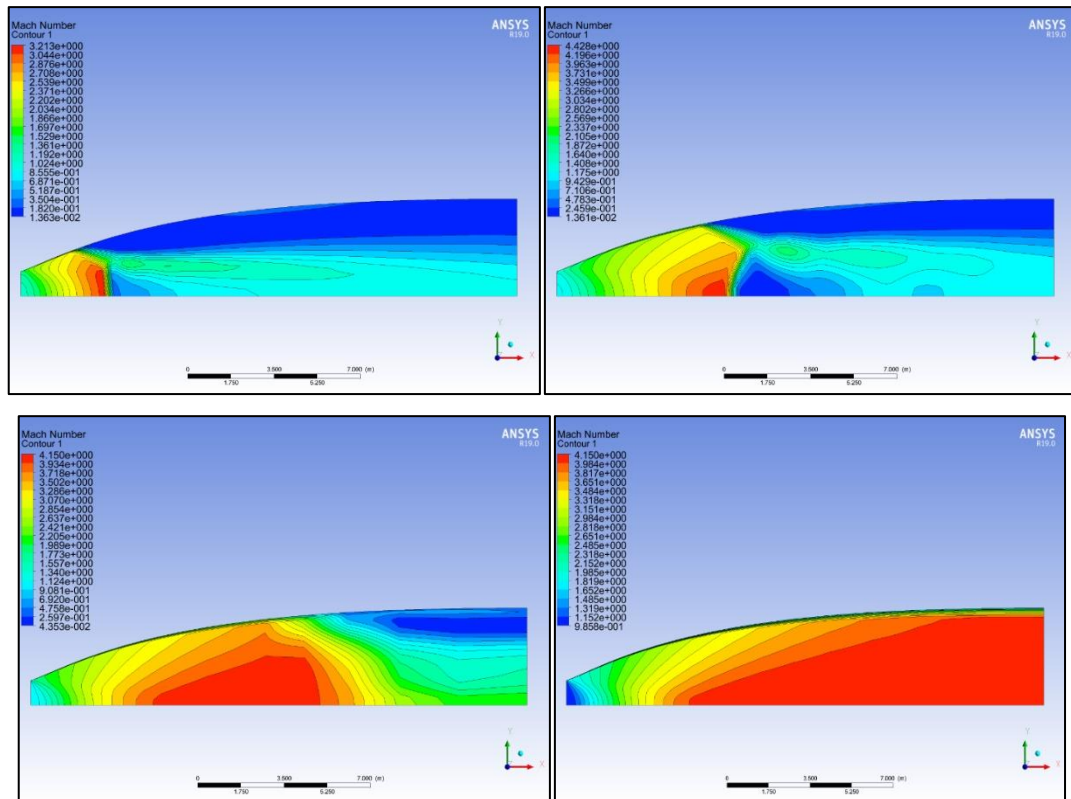


Figure 4.43 : Allure des contours du nombre de Mach le long de la tuyère MLN circulaire sous différentes valeurs de NPR.

Les courbes suivantes comparent la distribution du rapport de la pression statique P/P_0 le long de l'axe central de la tuyère pour chaque valeur de NPR. Ces profils permettent de visualiser clairement l'effet de la contre-pression sur la performance de la tuyère. Plus la valeur de NPR est élevée, plus la chute de pression est rapide, marquant un passage plus prononcé au régime supersonique. Les plateaux observés à certaines distances indiquent la présence de zones de pseudo-équilibre après les chocs.

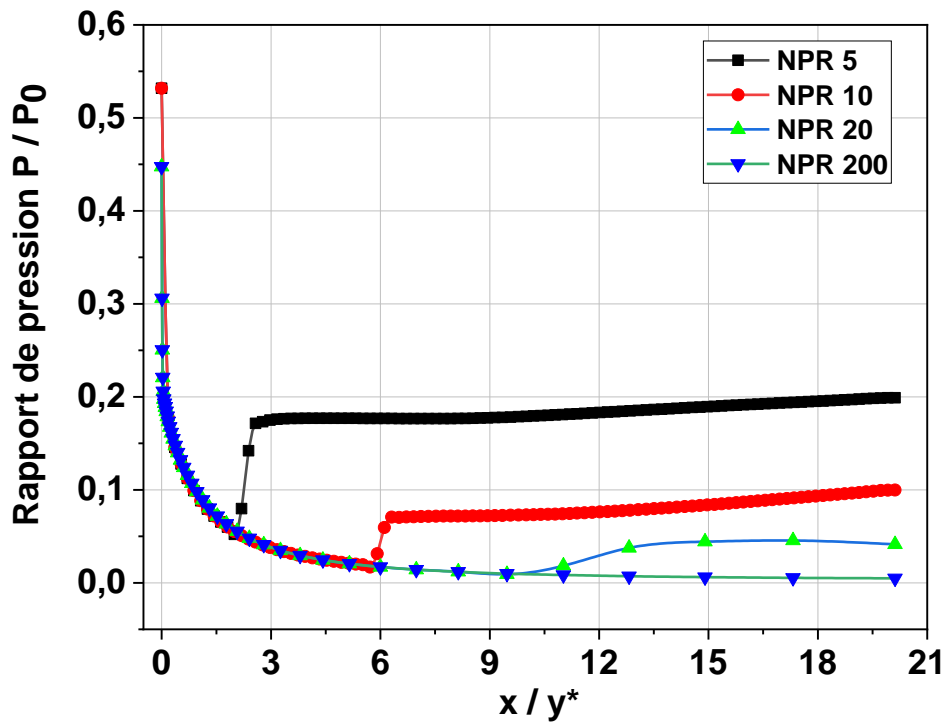


Figure 4.44 : Variation du rapport de la pression statique P/P_0 le long de la tuyère MLN circulaire pour différentes valeurs de NPR.

4.5.2. L'impact sur la Tuyère axisymétrique de forme circulaire double galbe

La figure 4.45 présente la réponse de la géométrie double galbe aux variations du NPR. Ce type de tuyère, plus sensible à la variation de pression, montre des régimes d'écoulement complexes avec apparition de zones de séparation et de chocs internes selon les cas. Les cartes de Mach révèlent que la tuyère double galbe permet une expansion plus progressive et mieux contrôlée de l'écoulement. Les chocs sont plus faibles et situés plus loin en aval qu'avec la tuyère MLN, ce qui suggère une meilleure performance en termes de stabilité et de régularité de l'écoulement, surtout à haut NPR [31].

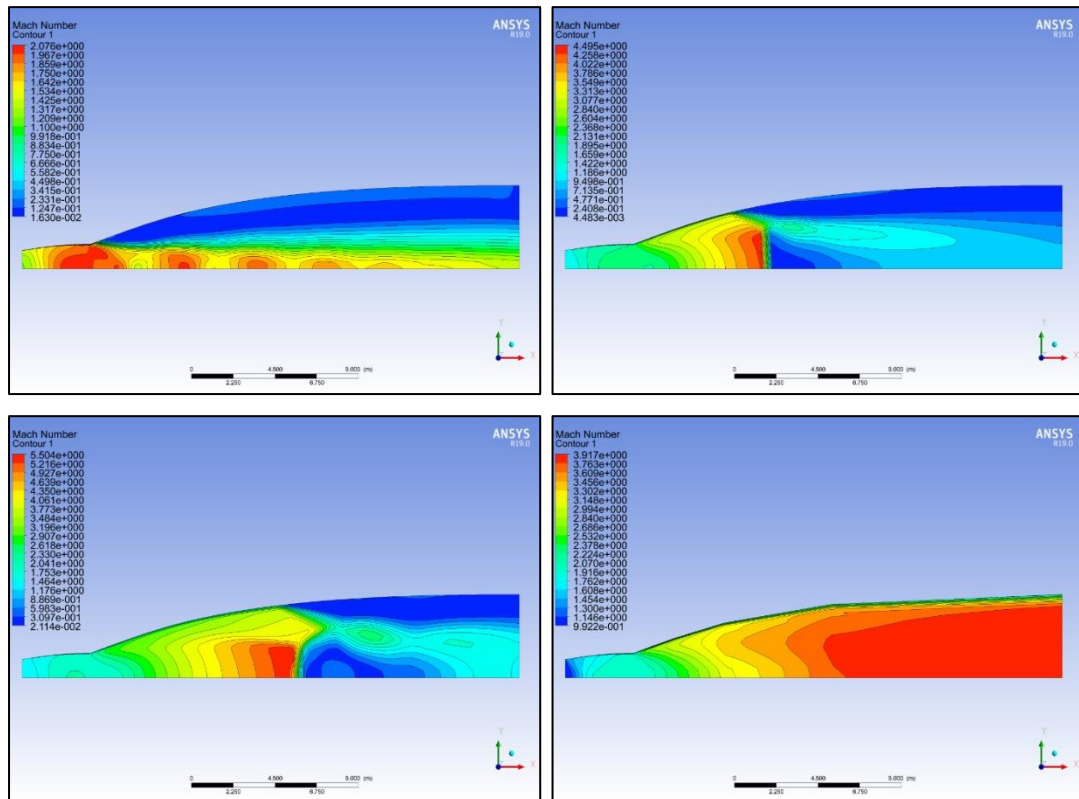


Figure 4.45 : Allure des contours du nombre de Mach le long de la tuyère double galbe circulaire sous différentes valeurs de NPR.

Les courbes de rapport de la pression statique P/P_0 le long de la tuyère mettent en évidence la variation du régime de fonctionnement selon le NPR, révélant des différences nettes en termes d'expansion et de stabilité de l'écoulement. Ce graphique montre que la tuyère double galbe assure une réduction plus douce de la pression statique par rapport à la tuyère MLN. La présence de courbes plus lisses à haut NPR reflète une expansion efficace avec moins de pertes dues aux chocs, ce qui améliore le rendement global de la tuyère en fonctionnement supersonique.

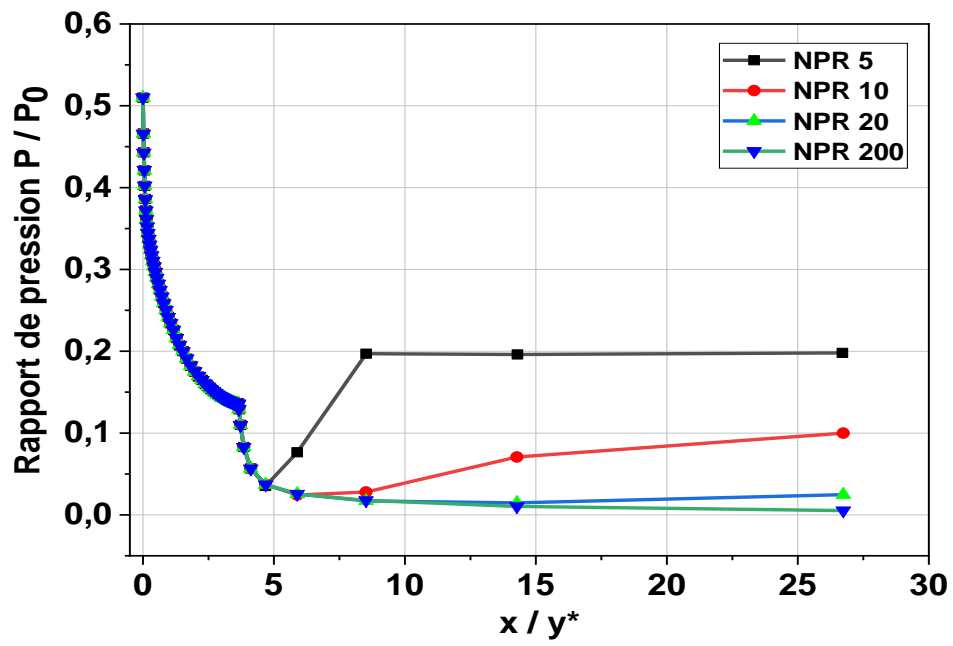


Figure 4.46 : Variation du rapport de la pression statique P/P_0 le long de la tuyère double galbe circulaire pour différentes valeurs de NPR.

Conclusion générale

Conclusion générale

La comparaison entre les tuyères MLN et les tuyères à double galbe a révélé des différences notables en termes de comportement de l'écoulement. Les tuyères MLN permettent une accélération rapide du jet juste après le col, mais elles s'avèrent plus sensibles aux conditions externes et aux variations de pression en sortie. En revanche, les tuyères à double galbe assurent une transition progressive du flux, grâce à deux phases successives d'expansion, ce qui permet de minimiser les pertes par chocs et d'améliorer la stabilité globale de l'écoulement, notamment à des rapports de pression élevés.

L'analyse de l'impact du rapport NPR (Nozzle Pressure Ratio) a confirmé que l'augmentation de cette valeur entraîne une accélération plus intense de l'écoulement et une chute plus rapide de la pression. Dans les configurations à haut NPR, l'écoulement devient fortement supersonique, avec formation de chocs obliques et, parfois, d'interactions complexes entre ondes de choc. Les tuyères à double galbe ont mieux réagi à cette variation grâce à leur conception plus adaptée à la gestion des gradients de pression.

Concernant l'effet des modèles d'écoulement, les résultats ont montré que la différence entre le modèle non visqueux et les modèles turbulents ($k-\epsilon$ et $k-\omega$ SST) reste relativement modérée. Cela s'explique par la nature dominée par l'expansion de l'écoulement supersonique, où les effets de viscosité sont majoritairement confinés près des parois. Toutefois, une perte de pression plus marquée est observée avec les modèles turbulents, en particulier le modèle $k-\omega$ SST, qui offre une meilleure résolution des gradients près des zones de séparation et d'accélération rapide.

Les grandeurs thermodynamiques ont suivi une évolution cohérente avec le comportement attendu en régime supersonique isentropique. La température relative T/T_0 décroît progressivement, la pression chute brutalement après le col, et la densité suit une tendance similaire à celle de la pression. L'accord observé entre les résultats obtenus par CFD et ceux issus du code numérique MOC, utilisant la méthode des caractéristiques, valide les hypothèses physiques et le maillage utilisé dans cette étude.

Conclusion générale

En somme, cette analyse approfondie confirme que le choix de la géométrie, du modèle d'écoulement et des conditions d'entrée constitue un levier majeur dans l'optimisation des performances d'une tuyère supersonique. Les tuyères à double galbe se sont révélées plus efficaces et robustes face aux variations de conditions, tandis que les MLN nécessitent une conception fine et précise pour éviter les pertes par instabilité ou sur-expansion.

RÉFÉRENCES

- [1] **Versteeg, H.K., & Malalasekera, W.** (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Pearson Education.
- [2] **ANSYS, Inc.** (2023). ANSYS Fluent User's Guide. [en ligne](#)
- [3] **Anderson, J.D.** (2010). Fundamentals of Aerodynamics. McGraw-Hill.
- [4] **Ferziger, J.H., & Perić, M.** (2020). Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer.
- [5] **Anderson, J.D.** (2010). Modern Compressible Flow: With Historical Perspective. McGraw-Hill.
- [6] **Blazek, J.** (2015). Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Butterworth-Heinemann.
- [7] **Menter, F.R.** (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal, 32(8), 1598-1605.
- [8] **Rao, G.V.R.** (1958). Exhaust nozzle contour for optimum thrust. Journal of Jet Propulsion, 28(6), 377-382.
- [9] **Sutton, G.P., & Biblarz, O.** (2016). Rocket Propulsion Elements. John Wiley & Sons.
- [10] **Thompson, J.F., Soni, B.K., & Weatherill, N.P.** (1999). Handbook of Grid Generation. CRC Press.
- [11] **Celik, I.B., Ghia, U., Roache, P.J., Freitas, C.J., Coleman, H., & Raad, P.E.** (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. Journal of Fluids Engineering, 130(7), 078001.
- [12] **Wilcox, D.C.** (2006). Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries.
- [13] **Menter, F.R., Kuntz, M., & Langtry, R.** (2003). Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. Turbulence, Heat and Mass Transfer, 4(1), 625-632.
- [14] **Hirsch, C.** (2007). Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. Butterworth-Heinemann.
- [15] **Anderson, J.D.** (2010). Modern Compressible Flow: With Historical Perspective. McGraw-Hill.
- [16] **Sutton, G.P., & Biblarz, O.** (2016). Rocket Propulsion Elements. John Wiley & Sons.
- [17] **Blazek, J.** (2015). Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Butterworth-Heinemann.

RÉFÉRENCES

- [18] **Menter, F.R.** (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605.
- [19] **Anderson, J.D.** (2001). *Fundamentals of Aerodynamics* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- [20] **Hill, P.G., & Peterson, C.R.** (1992). *Mechanics and Thermodynamics of Propulsion*. Addison-Wesley.
- [21] **Rao, G.V.R.** (1958). *Exhaust Nozzle Contour for Optimum Thrust*. NASA TN 1376.
- [22] **Zucrow, M.J., & Hoffman, J.D.** (1976). *Gas Dynamics*. Wiley.
- [23] **Teske, M.E.** (2009). *High-Temperature Gas Dynamics and Thermochemistry*. NASA Report.
- [24] **Versteeg, H.K., & Malalasekera, W.** (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics* (2nd ed.). Pearson.
- [25] **Amghar Dyhia .** (2023) .*Simulation de la tuyère MLN 3D* (Fourni par l'utilisateur).
- [26] **Hagemann, G., et al.** (2002). *Advanced Rocket Nozzles*. *Journal of Propulsion and Power*, 18(1).
- [27] **Nasuti, F., et al.** (2004). *Flow Transition in Dual-Bell Nozzles*. *AIAA Journal*, 42(4).
- [28] **Chaban Abderaouf .** (2023) *Simulation HT Double Galbe*.
- [29] **Versteeg, H.K., & Malalasekera, W.** (2007). *An Introduction to CFD*. Pearson.
- [30] **NIST Chemistry WebBook** (2023). Thermodynamic Data.
- [31] **T. Chehat, H. Kbab, W. Hamaidia and B. Benaouda Zouaoui.** Analysis of Dual Bell Nozzle Configurations: Design Parameters and Performance Measurements