

REBUPLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA -1-

Institut d'Aéronautique et des études spatiales
Département de construction



MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme master en Aéronautique

Spécialité : Propulsion Avion

THÈME

**Etude et simulation d'un écoulement
supersonique à Haute Température à travers
Une tuyère à double galbe**

Présenté par :

➤ **CHABAN ABDERRAOUF**

Dirigé par :

➤ **KBAB HAKIM** : Promoteur

➤ **TECHAREK ANIS** : Co-promoteur

Promotion 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الملخص

يتكون العمل الحالي من محاكاة التدفق من خلال فوهة DOUBLE GALBE ثلاثية الأبعاد ، باستخدام أداة تصميم Ansys بمساعدة الكمبيوتر. تمت هذه المحاكاة على أربع مراحل (إنشاء الهندسة ، هندسة الشبكة ، الدقة بواسطة FLUENT وتصور النتائج) ، يعتمد على التحليل البارامتري (رقم الماك ، الضغط الثابت والكثافة) في التكوين (الغاز المثالي).

Résumé

Le présent travail consiste à simuler un écoulement à travers une tuyère tridimensionnelle à DOUBLE GALBE, à l'aide d'un un outil de conception assistée par ordinateur ANSYS 23. Cette simulation s'est déroulée en Quatre phases (Création de la géométrie, Maillage de la géométrie, Résolution Par FLUENT et la Visualisation des Résultats), elle est basée sur l'analyse paramétrique (Nombre de Mach, Pression Statique et Densité) dans la configuration (Gaz Parfait).

Summary

The present work consists in simulating a flow through a three-dimensional DOUBLE CURVE nozzle, using an ANSYS 23 computer-aided design tool. This simulation took place in four phases (Creation of the geometry, Mesh Geometry, Resolution by FLUENT and Visualization of Results), it is based on parametric analysis (Mach number, Static Pressure and Density) in the configuration (Perfect Gas).

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 **KBAB HAKIM** 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 **TCHERAK ANIS** pour ses conseils et perspectives concernant mon travail et qui m'a soutenu pour la préparation et l'avancement de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste
travail

A mes chers parents

A mon frère

A toute ma famille

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	I
CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	1
CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES TUYERES	12
II.1 INTRODUCTION.....	12
II .2 DEFINITION DE LA TUYERE.....	13
II. 3 LE ROLE ET L'UTULISATION DE LA TUYERE.....	14
II. 4 LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE TUYERE.....	14
II .5 MOTEUR FUSEE.....	14
II .6 MOTEUR AVION.....	16
II .7 MISSILE.....	17
II .8 LA TUYERE SUPERSONIQUE.....	17
II. 9 TYPES DE TUYERES.....	18
II. 9.1 Tuyères conventionnelles.....	18
II .9.1.1 Tuyère Conique.....	18
II .9.1.2 Tuyère à contour profilé.....	18
II .9.1.3 Tuyère a noyau centrale.....	19
II .9.2 Tuyères innovantes.....	20
II .9.2.1 Tuyère à section variable.....	20
II .9.2.2 Tuyère à chevrons « tuyères en dents de scie ».....	20
II .9.2.3 Tuyère orientable.....	21
II .9.2.4 Tuyère a divergent déployable.....	21
II .9.2.5 Tuyère Aerospoke.....	22

II .9.3 Tuyères adaptées en altitude.....	23
II .9.3.1 Les tuyères à découlement contrôlé.....	23
II .9.3.1.1 Tuyère à zone d'expansion.....	23
II .9.3.1.2 Tuyère double galbe.....	23
II .9.3.1.3 Tuyère à détente centrée.....	24
II .9.3.1.4 Tuyère a divergent extensible.....	25
II .9.4 Les tuyères bi-modes.....	26
II .9.4.1 Tuyère double détente (dual expander nozzle).....	26
II .9.4.2 Tuyères à double col.....	27
II .9.5 Les tuyères avec limite atmosphérique.....	28
II .9.5.1 Tuyère à bouchon.....	28
II .9.5.2 Tuyère type détente- déviation.....	29
II .10 LES SOUFLERIES	30
II .10.1 Les souffleries supersoniques.....	31
CONCLUSION.....	32
CHAPITRE III : FONCTIONNEMENT DES TUYERES SUPERSONIQUES.....	33
III. 1 INTRODUCTION.....	33
III.2 DEFINITIONS IMPORTANTES.....	33
III.2.1 Le nombre de Mach et la vitesse du son.....	33
III.2.2 Ecoulement isentropique.....	35
III.2.3 Les ondes de choc.....	36
III .2.3.1 Ondes de choc droites.....	36
III .2.3.2 Ondes de choc obliques.....	37

III.2.4	Ecoulement de Prandtl- Meyer.....	37
III.2.5	Classification des écoulements.....	38
III.2.5.1	les écoulements incompressibles et compressibles.....	38
III.2.5.2	Les régimes de l'écoulement.....	38
III. 3	 FONCTIONNEMENT D'UNE TUYERE SUPERSONIQUE.....	39
III. 3.1	Tuyère supersonique.....	39
III. 3.2	Ecoulements dans une tuyère.....	40
III. 3.3	Fonctionnement réel de la tuyère supersonique.....	43
III. 4.	ADAPTATION.....	43
III.4. 1	régime de sous-détente.....	44
III. 4.2	Régime de sur-détente.....	44
III. 4.2.1	Sur-détente avec découlement naissant.....	44
III. 4.2.2	Sur-détente avec découlement étendu.....	45
III. 5	 LES PARAMETRES DES PERFORMANCES.....	46
III. 5.1	La force de poussée.....	46
III.5.2	Coefficient de poussée.....	47
III. 5.3	Vitesse effective.....	47
III-5-4	Impulsion spécifique.....	48
III-5-5	Coefficient de décharge.....	48
III. 5.6	Consommation spécifique.....	48
III. 5.7	La vitesse caractéristique.....	49
III. 5.8	Coefficient de débit.....	49
III.6	 EFFET DES VARIATIONS DE SECTION SUR L'ECOULEMENT.....	50

III.7 ECOULEMENT MONODIMENSIONNEL DANS UNE TUYERE.....	51
III. 7.1 Equations fondamentales.....	52
III. 7.1.1 L'équation de continuité.....	52
III. 7.1.2 L'équation de la quantité de mouvement.....	52
III. 7.1.3 L'équation de l'énergie.....	52
III. 8 LES ECOULEMENTS A HAUTE TEMPERATURE.....	53
III. 8.1 hypothèses fondamentales.....	54
III. 8.2 Les équations gouvernantes.....	56
III. 8.2.1 Equation d'état.....	56
III. 8.2.2 Equation de conservation de la masse.....	57
III. 8.2.3 Equation de conservation de la quantité de mouvement.....	57
III. 8.2.4 Equation de l'énergie.....	58
CONCLUSION.....	59
CHAPITRE IV: APPLICATION SUR LES TUYERES ET LES RESULTATS.....	60
IV. 2 PRESENTATION DE FLUENT.....	61
IV. 3 APPLICATION SUR UNE TUYERE DOUBBLE GALBE.....	62
IV. 3.1 : La simulation axisymétrique d'un écoulement dans une tuyère double galbe.....	62
IV.3.1.1 : Création de la géométrie.....	62
IV. 3.1.2 : Maillage de la géométrie.....	63
IV. 3.1.3 : La résolution par FLUENT.....	64
IV. 3.1.4 : Les résultats et interprétations.....	66
IV. 3.2 : La simulation 3D d'un écoulement dans une tuyère double galbe.....	77

IV. 3.2.1 : Création de la géométrie.....	77
IV. 3.2.2 : Maillage de la géométrie.....	78
IV. 3.2.3 : La résolution par FLUENT.....	81
IV. 3.2.4 : Résultats et interprétations.....	83
IV. 3.3 : La comparaison entre les deux cas 2D et 3D.....	95
IV. 4. ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'ALTITUDE SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA TUYERE	97
IV. 4.1 : Cas de la tuyère 2D.....	97
IV. 4.2 : cas de la tuyère 3D.....	102
CONCLUSION.....	110
CONCLUSION GENERALE.....	112
LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	114

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES TUYERES

Figure (II, 1) : Tuyère plane et tuyère axisymétrique.....	13
Figure (II, 2): Tuyère convergente- divergente.....	13
Figure (II, 3) : Tuyère d'une fusée.....	16
Figure (II, 4) : Tuyère à section variable.....	16
Figure (II, 5) : La tuyère de Laval	17
Figure (II, 6) : Tuyère conique.....	18
Figure (II, 7) : Tuyère a contour profilé.....	19
Figure (II, 8): Tuyère a noyau centrale.....	19
Figure (II, 9) : Tuyère à section variable.....	20
Figure (II, 10) : Tuyère à chevrons.....	21
Figure (II, 11) : Tuyère orientable	21

Figure (II, 12) : Tuyère a divergent déployable.....	22
Figure (II, 13) : Tuyère Aeospike.....	22
Figure (II, 14) : Forme de la tuyère a zone d'expansion.....	23
Figure (II, 15) : Tuyère double galbe.....	24
Figure (II, 16) : Forme générale d'une tuyère à détente centrée.....	25
Figure (II, 17) : Tuyère a divergente extensive.....	26
Figure (II, 18) : Tuyère double détente.....	27
Figure (II, 19): Tuyère double col.....	28
Figure (II, 20): Tuyère à corps centrale.....	29
Figure (II, 21) : Tuyère type détente- déviation.....	29
Figure (II, 22): Maquette automobile dans une veine d'essai de soufflerie.....	30
Figure (II, 23) : Tuyère de la soufflerie.....	31

Chapitre III : FONCTIONNEMENT DES TUYERES SUPERSONIQUES

Figure (III, 1): La différence entre l'approche quasi et mono dimensionnel.....	33
Figure (III, 2): Illustration d'une onde de choc normale.....	36
Figure (III, 3): Illustration d'une onde de choc oblique.....	37
Figure (III, 4): Illustration de la détente de Prandtl- Meyer.....	38
Figure (III, 5) : La tuyère supersonique.....	39
Figure (III, 6) : Régimes d'écoulement dans une tuyère de Laval d'après Candel – 1995-, avec P_i la pression d'arrêt isentropique et M le nombre de Mach.....	41
Figure (III, 7) : Types d'ondes de choc dans une tuyère de Laval d'après Candel (1995).....	42
Figure (III, 8) : Lignes de courant dans la tuyère à l'adaptation.....	43
Figure (III, 9) : Régime de la tuyère en sous-détente.....	44
Figure (III, 10) : Lignes de courant et profil de pression du décollement naissant.....	45
Figure (III, 11): Lignes de courant et profile de pression du décollement étendu.....	46
Figure (III, 12): Effet de variation de section sur le régime de l'écoulement.....	51
Figure (III, 13): Variation de C_p et γ avec la température.....	56

Chapitre IV: APPLICATION SUR LES TUYERES ET LES RESULTATS

Figure (IV, 1) : Création du profil de la tuyère par le Design Modeler.....	62
La figure (IV, 2) : Génération du corps surfacique Avec le Design Modeler.....	63
Figure (IV, 3): Création de Sélection Nommés.....	63
Figure (IV, 4) : Maillage rectangulaire structure sur MESHING.....	64
Figure (IV, 5) : Maillage structuré sur Fluent.....	64
Figure (IV, 6) : Conditions aux limites sur Fluent.....	65
Figure (IV, 7) : Le graphe des résiduelle de notre simulation.....	65
Figure (IV, 8) : Evolution de la courbe du Nombre de Mach dans la tuyère axisymétrique.....	67
Figure (IV, 9) : Contour d'évolution du nombre de Mach dans la tuyère axisymétrique.....	68
Figure (IV, 10) : Evolution de la pression statique dans la tuyère axisymétrique.....	69
Figure (IV, 11) : Contour d'évolution de la pression statique de Mach dans la tuyère double galbe axisymétrique.....	70
Figure (IV, 12) : Evolution de la densité dans la tuyère axisymétrique.....	71
Figure (IV, 13) : Contour d'évolution de la densité dans la tuyère axisymétrique.....	72
Figure (IV, 14) : Evolution de la température statique dans la tuyère axisymétrique.....	73
Figure (IV, 15) : Contour d'évolution de la température statique dans la tuyère axisymétrique.....	75
Figure (IV, 16) : Les vecteurs des lignes de courant dans la tuyère double galbe.....	76
Figure (IV, 17) : le profil de la Tuyère double galbes.....	77
Figure (IV, 18) : la géométrie de La Tuyère double galbes 3D.....	78
Figure (IV, 19) : Maillage rectangulaire structure sur MESHING.....	80
Figure (IV, 20) : Maillage structuré sur Fluent.....	81
Figure (IV, 21) : Conditions aux limites sur Fluent.....	82
Figure (IV, 22) : le graphe des résiduelles de notre simulation.....	82
Figure (IV, 23) : Evolution de la courbe de nombre de Mach dans une tuyère double galbe 3D.....	84
Figure (IV, 24) : Contour d'évolution du nombre de Mach dans la tuyère double galbe.....	85

Figure (IV, 25) : Evolution de la courbe de la densité dans une tuyère double galbe 3D.....	86
Figure (IV, 26) : Contour d'évolution de la densité dans la tuyère double galbe.....	88
Figure (IV, 27) : Evolution de la courbe de la pression statique dans une tuyère double galbe 3D.....	89
Figure (IV, 28) : Contour d'évolution de la pression statique dans la tuyère double galbe.....	90
Figure (IV, 29) Evolution de la courbe de la température statique dans une tuyère double galbe 3D.....	92
Figure (IV, 30) : Contour d'évolution de la température statique dans la tuyère double galbe...	93
Figure (IV, 31) : Les vecteurs des lignes de courant dans la tuyère double galbe.....	94
Figure (IV, 32) : Comparaison des paramètres d'écoulement pour les deux cas 2D et 3D.....	96
Figure (IV, 33) : Contour de nombre de Mach et la pression pour différentes NPR.....	99
Figure (IV, 34) : Différentes évolutions de pression pour différents NPR.....	101
Figure (IV, 35) : La création de la géométrie.....	103
Figure (IV, 36) : Création de Sélection Nommés.....	103
Figure (IV, 37) : Maillage structuré quadrilatère.....	103
Figure (IV, 38) : Maillage structuré quadrilatère de la Tuyère DBN sur Fluent.....	104
Figure (IV, 39) : Contour de nombre de Mach et la pression pour différents NPR.....	107
Figure (IV, 40) : Différentes évolutions de pression pour différents NPR.....	108

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (IV, 1) : les conditions aux limites pour notre simulation.....	66
Tableau (IV, 2) : conditions aux limites pour notre simulation.....	83

Nomenclature

A : Section de la tuyère

C : vitesse de son

C_f : Coefficient de la poussée

C_p : Capacité calorifique a pression constante

C_d : est déterminé expérimentalement pour une combinaison de propergols en fonction de la pression de la chambre de combustion

F : c'est la force de poussée en N

I_s : Impulsion spécifique

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 inferieur

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

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

V_e : La vitesse d'éjection en m/s

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

W_p : Poids total du propergol en Newton

q_{eff} : est 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

Abréviation

CFD : Computational fluid dynamics

2D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

NPR : Nozzel pressure ratio ou taux de détente

INTRODUCTION GENERALE

Une révolution dans les méthodes d'étude théorique grâce à le développement de l'informatique qui joue un rôle très important dans les sciences de l'ingénieur et particulièrement pour aérodynamique. Les numériciens ont alors développé plusieurs méthodes pour l'obtention de différentes formes des tuyères. En parallèle de ça, avec les développements expérimentaux et numérique, les concepteurs ont pensé à améliorer les performances des tuyères de propulsion.

La propulsion est l'action de fournir une poussée à un objet pour qu'il se déplace dans l'espace. Les mécanismes de propulsion fournissent une force de poussée qui déplace les objets initialement au repos.

Un moteur fusée est un moteur de réaction fonctionne en expulsant des gaz qui sont produits par la réaction chimique exothermique dans la chambre de combustion et accélères par la tuyère vers l'arrière pour crée la force propulsive qui détermine la capacité de ce système de propulsion. La forme et la longueur de la tuyère déterminent la pression de la sortie des gaz brûlés. Pour que le moteur fonctionne à son meilleur rendement, il est nécessaire que cette pression de sortie soit égale à la pression atmosphérique externe qui diminue avec l'augmentation de l'altitude. Pour optimiser la poussée du moteur, il serait nécessaire que la pression des gaz en sortie diminue progressivement au fur et à mesure que la fusée s'élève et que la pression ambiante diminue.

La tuyère supersonique est le fruit du travail de nombreux chercheurs et ingénieurs, a été développé au cours des 75 derniers années. Il y a plusieurs types telles qu'idéal, cloche, conique, bouchon, expansion-déflexion. Les tuyères fusées interviennent dans beaucoup de structures telles que les moteurs fusées, les missiles, les moteurs avions, et dans la fabrication des souffleries supersoniques pour la modélisation et la réalisation expérimentale des écoulements supersoniques.

Le concept des tuyères à double galbe est une nouvelle technologie dans le domaine de conception de tuyères supersoniques destinées à la propulsion spatiale, il est l'un des concepts les plus prometteurs pour les tuyères adaptables en altitude. En effet, l'écoulement dans ce type de tuyères a la faculté de s'auto- adapté pour deux régimes de fonctionnement – basse altitude et haut altitude- sans activation mécanique.

Introduction général

La tuyère double galbe c'est l'une des tuyères innovantes utilisées généralement pour les navettes spatiales. Le principal objectif de cette tuyère est le gain de performance par principe d'auto- adaptation en fonction de l'altitude. Ce type de tuyère est une nouvelle génération qui a récemment reçu attention des motoristes.

Mon projet fin d'étude consiste à simuler et analyser l'écoulement d'un gaz parfait dans une tuyère double galbe, la simulation est faite sur ANSYS. L'évaluation des paramètres thermodynamique – la pression statique et la température statique, le nombre de mach- sont analysés.

Ce travail est réalisé en quatre chapitres et une conclusion générale.

- Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique sur l'historique et le développement des tuyères.
- Dans le deuxième chapitre, j'ai fait une étude théorique sur les tuyères d'une manière généralisé.
- Le troisième chapitre contient le principe de fonctionnement des tuyères supersonique.
- Le quatrième chapitre est réservé à la simulation numérique en utilisant le logiciel ANSYS et la présentation de toutes résultats obtenus et l'interprétation des paramètres obtenue – la pression, la température et le nombre de mach- avec des illustrations graphiques.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale sur les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I

LA RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

LA RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Grâce aux travaux de plusieurs chercheurs dans le domaine, la résolution analytique et numérique pour les écoulements des fluides dans les tuyères convergents - divergentes est devenue possible. Les essais en soufflerie sont le plus souvent inaccessibles aux particuliers de par leur coût très élevé. Depuis les années **1980**, plusieurs logiciels ont été développés permettant de traiter numériquement l'aérodynamique.

On peut diviser l'aérodynamique en deux branches nécessaires. La première c'est l'aérodynamique externe, qui est consacrée à l'étude de l'écoulement autour des profils et l'autre c'est aérodynamique interne, c'est pour des écoulements internes tels que les moteurs d'avion et les tuyères.

Une tuyère est une simple conduite de section variable sans élément mobile placée à l'arrière d'un moteur dans laquelle un gaz se détend. Les différents régimes de fonctionnement d'une tuyère convergente – divergente peuvent être décrits par la théorie monodimensionnelle des gaz parfaits sans viscosité. Cette approche permet de comprendre la formation des ondes de choc dans une tuyère. La différence entre la pression génératrice amont et la pression aval permet de créer un écoulement. Cette tuyère joue un rôle très important pour le développement de la conception des engins aérospatiaux.

Le moteur propulseur est un type de moteurs à réaction utilisé par les fusées car il permet d'atteindre des vitesses très élevées. Le mécanisme physique utilisé dans les moteurs fusées c'est l'accélération des gaz à haute température produits par la chambre de combustion afin de générer la force propulsive. Cette accélération est obtenue par la géométrie de la tuyère qui permet la détente. Le principe de fonctionnement de la tuyère repose sur les propriétés des gaz lorsqu'ils circulent aux vitesses subsoniques et supersoniques. Concernant les tuyères de propulsion ont été considérées comme un organe annexe à cause de leur simplicité. Son rôle principal est d'assurer le bon fonctionnement du turbocompresseur à un régime donné.

L'organe de la tuyère constitue la partie essentielle pour les moteurs fusées et les missiles car elle assure l'accélération et la détente optimale des gaz de combustion pour avoir une poussée maximale qui dépend principalement de la vitesse d'éjection. Cette accélération est accompagnée par une forte diminution de la température et la pression statique. Il faut également

Chapitre I : La recherche bibliographique

que les gaz soient éjectés à une pression égale à la pression ambiante, à l'altitude où ces propulseurs fonctionnent. On appelle ceci l'adaptation de la tuyère. Si le divergent est trop prononcé, le gaz sera éjecté à une pression inférieure à la pression ambiante – atmosphérique – et apparaîtront des ondes de choc de re-compression et la portion terminale de la tuyère ne contribue plus à produire de la poussée. Les moteurs à réaction pour les avions militaires sont équipés de tuyères à section variable, dont le divergent s'ouvre au fur à mesure que l'altitude s'accroît et que la pression ambiante baisse. Les divergents des tuyères des moteurs à réaction sont munies de pétales qui s'ouvrent à l'aide de vérins hydrauliques, au fur à mesure que la pression diminue, ceci étant directement commandé par une mesure barométrique. L'optimisation des performances des moteurs dépend de la présence de l'air atmosphérique qui exerce une pression sur la paroi externe de la tuyère réduisant ainsi la poussée effective du moteur. Si un choc de re-compression est généré où l'intensité de ce choc est trop importante, le gradient de pression inverse le sens de l'écoulement. Dans ces conditions l'écoulement n'est plus capable de suivre complètement le profil de la tuyère et on aura un décollement qui est toujours accompagné de charges thermiques très élevées qui peut avoir un effet sur le comportement du moteur supersonique car cela représente une contrainte très forte.

Les gaz brûlés en sortie de la chambre de combustion ont une température très élevée. Pour le cas des tuyères de moteurs fusées qui fonctionnent à des hautes températures, un processus permettant de refroidir les parois doit être prévu pour empêcher ainsi la structure d'atteindre son point de fusion, car aucune alliage n'est capable de résister à une contrainte thermique aussi élevée.

La conception de tuyères reçoit une attention particulière et fait l'objet d'intenses et nombreuses recherches, pour les applications spatiales. Le développement de la tuyère convergente – divergente impose de prendre en considération de multiples phénomènes physiques et de maîtriser plusieurs disciplines scientifiques comme le changement en pression et thermique sur la structure et les perturbations acoustiques.

La taille de la tuyère est dictée soit par l'encombrement ou bien soit par les conditions génératrices (P , T) et le débit autorisés en amont. Afin de réaliser un écoulement uniforme à la sortie de la tuyère pour avoir des poussées maximales, la majorité des recherches et des travaux

Chapitre I : La recherche bibliographique

utilisent des tuyères convergentes- divergentes en forme de cloche cela permet de faire la simulation de la section divergente par un polynôme de second degré.

Pour le concept de -système idéal de propulsion de fusée est utile par ce que dans ce cas les principes thermodynamiques peuvent être exprimés par simple relations mathématiques. Il est devenue pratique à accepter d'utiliser des paramètres de fusée idéaux qui peuvent ensuite être modifiés par corrections appropriées. Pour un système idéal de propulsion, les hypothèses suivantes sont valables. [1]

- La substance de travail – les produits de réaction chimique- est homogène.
- Il n'y a pas de transfert de chaleur à travers les parois de la fusée, donc le système est adiabatique.
- Il n'y a pas de frottement appréciable et tous les effets de la couche limite sont négligeables.
- Il n'y a pas d'ondes de choc
- Le débit de propulseur est régulier et constant.
- Tous les gaz d'échappement quittant la fusée avec des vitesses dirigées axialement
- L'équilibre chimique est établi dans la chambre de la fusée.

Pour les tuyères réelles [2], l'écoulement est bidimensionnel et axisymétrique. Les vitesses et les températures ne sont pas uniformes sur une section et sont généralement plus élevées dans la région centrale. Généralement, les tuyères réelles ont une couche limite visqueuse sur les parois où les vitesses de l'écoulement sont beaucoup plus faibles que les vitesses de l'écoulement libre. L'écoulement à faible vitesse près de la paroi est laminaire et subsonique, mais dans les régions à plus haute vitesse de la couche limite, l'écoulement dans ce cas peut devenir turbulent. L'écoulement à travers une tuyère véritable diffère de celle d'une tuyère idéale à cause de l'effet de frottement et du transfert de chaleur, la combustion incomplète avec un échappement non axial.

Avec l'augmentation des demandes de réduire le coût des missions de l'espace et aussi avec l'augmentation de la charge utile des moteurs fusées, les chercheurs sont obligés d'étudier de nouvelles technologies telles que la conception et l'optimisation des tuyères supersoniques pour

Chapitre I : La recherche bibliographique

améliorer les performances et diminuer les pertes . Dans les premières années de la conception des tuyères de fusée, La tuyère conique était très courante avec sa configuration la plus ancienne et peut être la plus simple. C'est relativement facile à fabriquer, ces tuyères présentent des angles de divergence entre 15° et 30° . Mais ils ont remarqué que les tuyères coniques délivrent une poussée avec une perte considérable à cause de l'inclinaison de la portion supersonique, si cette inclinaison est nulle, la poussée délivrée par le moteur sera maximal et complètement utilisée pour la propulsion. Alors les chercheurs se sont basées sur la recherche d'une forme de tuyère supersonique qui donnant à la sortie un écoulement parallèle et aussi les numériciens développent la méthode des caractéristiques afin de résoudre ce problème.

L'optimum des performances pour un cas d'un moteur fonctionnent dans le vide sont obtenues si les lignes de courant sont parallèles a l'axe de la tuyère.

Après la seconde guerre mondiale, le domaine du supersonique est devenu un domaine d'actualité et de concurrence et aussi de compétitive entre **l'Union Européenne et les Etats Unis** et aussi avec **la Chine, la Russie, le Japon**.

La demande actuelle des grandes puissances et des vitesses incite à passer au supersonique c'est pour cela plusieurs agences de programmes et industriels, d'organismes de recherches comme **NASA, NASDA , ONERA**...travaillent sur le développement et la fiabilité des moteurs fusées et sur les tuyères propulsives. Parmi les industriels on a **Boeing, pratt Whitney, Volvo Aero, Snecma Moteurs**...

Depuis plusieurs années de nombreux ingénieurs et chercheurs usent de leur savoir dans le but d'améliorer la force propulsive qui émane de l'accélération des gaz d'échappement de la chambre de combustion à des vitesses supersonique. Cette force propulsive peut être optimale si la pression de sortie des gaz est équivalente à la pression de milieu ambiant et la tuyère dite alors adaptée et réalisé une détente complète des gaz brûlés a la pression ambiant, dont les lignes de courant de l'écoulement sont axiale et uniforme.

Chapitre I : La recherche bibliographique

En 1887, **Gustave de Laval** construisit une petite machine à vapeur et en 1890, il développa une tuyère permettant d'augmenter la vitesse de la vapeur entrant dans la turbine. On le connaît de nos jours sous le nom de tuyère de Laval et il présente une importance particulière dans la conception de fusées. [3]

L'ingénieur American **Robert Goddard** a été le premier à intégrer une tuyère Laval avec une chambre de combustion, ce qui augmente le rendement de la fusée et atteindre le régime supersonique jusqu'à le nombre de mach 7. Le type de tuyère conique était très courant en raison de sa simplicité de conception et de sa facilité de fabrication. Les meilleures performances de ce type obtenues pour un angle de divergence 15 degrés[4]. A la fin des années 1930 et au début des années 1940, les chercheurs allemands ont effectué des recherches approfondies sur les tuyères prenant en compte tous les aspects de la conception. [5] -[6]

La science des fusées a été théorisée par le Russe **Constantin Tsiolkovski** à la fin du XIXe siècle et mise en pratique en 1935 par Hermann Oberth puis par les chercheurs allemands. Les fusées ont été utilisées pour mettre en orbite des satellites à des fins militaires et de recherche et de télécommunication. La fusée suit une trajectoire précise qui doit lui permettre de placer sa charge utile sur une orbite calculée adaptée à sa mission. Cette trajectoire doit répondre à plusieurs contraintes dont celle critique de la consommation de carburant. Un système de guidage embarqué calcule le temps réel, la position et l'altitude de la fusée et corrige lentement son orientation. La fusée est généralement instable durant la traversée de l'atmosphère c'est à dire que les forces aérodynamiques tendent à modifier l'orientation de la fusée dans un sens qui accroît encore ces forces.[7]

La mise en point des premières fusées est directement liée à la découverte de la poudre noire, mélange de charbon, de salpêtre et de soufre à fort pouvoir explosif. Cette découverte attribuée par la plupart des historiens chinois remonte peut être au XIe siècle mais aucun document écrit ne l'atteste. Le premier usage documenté de fusées porte sur une bataille qui s'est déroulée en 1232 durant le siège de Kaifeng par les mongoles. Les fusées utilisées à l'époque

Chapitre I : La recherche bibliographique

permettaient de désorganiser l'armée adverse en provoquant la panique de ses chevaux. Cette innovation se diffuse rapidement.

En 1944 et 1945, durant la seconde guerre mondiale, le **V2 (Aggregat 4)** un missile balistique développé par l'Allemagne et lancé à plusieurs milliers d'exemplaires, cette fusée de 13 tonnes emporter une charge explosive de 800 kg une distance 300kilomètres. C'est la première grosse fusée construite et les technologies mises au point durant sa conception, telles que la propulsion à ergols liquides de grande puissance. La réalisation du missile V2 est un résultat des travaux d'ingénieurs et chercheurs allemands dans le domaine des fusées qui débutent dans les années **1920**. [8]

Entre la fin du XIXe Siècle et la seconde guerre mondiale les plus grands progrès sur le plan théorique sont dus au Russe **Constantin Tsiolkovski**. Celui-ci dans son ouvrage l'Exploration de l'espace cosmique par des engins à réaction **1903**, décrit une fusées à propergol liquide – hydrogène/ oxygène- qui serait assez puissante pour se libérer de l'attraction terrestre. Il fait des recherches sur les ergols utilisables pour propulser les fusées et la forme de la chambre de combustion avec son refroidissement par circulation du carburant, aussi le guidage de la trajectoire. Il écrit la loi fondamentale du rapport de masse impliquant le découpage de la fusée en plusieurs étages. Il calcule aussi les différentes vitesses entrant en ligne de compte en astronautique et connues sous le nom de vitesses cosmiques. [7]

En 1926, l'American **Robert Goddard** lance une fusée qui s'élève à 12 m de hauteur et à la vitesse de 96km/h. cette expérience marque vraiment le début de l'histoire des fusées spatiales.

A partir des années **1950**, **RAO**[9]commence à utiliser des ordinateurs centraux de Rocket-dyne pour effectuer des calculs pour la conception des contours de tuyères de fusée à poussée optimal. Il a développé une méthode pour déterminer le contour de la tuyère qui produirait la poussée maximale pour un rapport de surface et une longueur donnée.

Une autre approche directe pour la conception du contour de la tuyère a été proposée par **GUDERLEY et HANTCH** en **1955**. Depuis **1957**, [10] il y a eu de nombreuses tentatives de lancement spatial avec plus de 95 % record de succès. Chaque lancement spatial a un objectif.

Chapitre I : La recherche bibliographique

Par exemple pour des missions commerciales, l'observation, météorologique et aussi pour des missions militaires.

En raison d'une augmentation plus efficace de la quantité de mouvement et diminuer les pertes au niveau de la paroi, les chercheurs ont fait des études approfondie par des tuyères idéales dans les souffleries, ces tuyères ont été conçus, ayant un échappement axial uniforme sans perturbation de l'écoulement.

En **1957**, **Dillaway**[11] a fait une étude analytique tridimensionnelle pour la conception de la tuyère supersonique de type profilée, l'étude a été réalisé afin d'arriver à une conception d'une tuyère avec une performance améliorée et moins de poids que les tuyères coniques et avec un échappement dirigé axialement, concluant ainsi la dépendance de l'écoulement au contour de la tuyère.

En général, La conception d'une tuyère doit prendre en compte plusieurs facteurs comme la longueur, le coefficient de la poussée, le flux de chaleur. La longueur est probablement le plus faible paramètre important, une longueur plus courte n'entraînera pas nécessairement un poids inférieur. Une étude approfondie sur les techniques de conception réalisée par **Landsbaum** en **1960**, pour sélectionner les tuyères idéales qui donne les meilleures performances. [12]

Les tuyères à bouchon ont été intensivement étudiées puisque ces tuyères présentent plusieurs avantages caractéristiques de conception et de performance. En **1961**, **Berman et Crimp**[13] ont fait une comparaison entre les tuyères à bouchon et les tuyères conventionnelle, ils ont constaté que les tuyères à bouchon présentent un avantage de poussée par rapport les tuyères conventionnelle.

Une technique graphique pour sélectionner un profil optimal d'une tuyère, prennent en considération les effets du frottement, ainsi que les propriétés thermodynamiques de la réaction, les résultats sont donnés pour l'écoulement chaud et froid, cette technique a été développée par **Ahlberg et S. Hamilton, D. Migdal et E.N Nilson** en **1961**. [14]

Chapitre I : La recherche bibliographique

Les écoulements supersoniques ont la possibilité de créer des ondes de choc dans la tuyère qui peuvent affecter le comportement de l'écoulement et aussi il y a une force de traînée, produite au niveau de la paroi de la tuyère par les effets d'un écoulement visqueux à grande vitesse, agit à l'opposé de la direction de la poussée, et provoque donc une diminution de rendement moteur fusée et l'efficacité de la tuyère.

En 1963, Darwell et Badham[15] ont réussi à montrer que l'élimination de la formation de l'onde de choc à l'intérieur de la tuyère est possible, cela d'après les études numériques sur les tuyères coniques et utilisé La méthode de base des caractéristiques pour évaluer les écoulements rotationnels. Cette évaluation permettant de montrer la possibilité de formation d'une onde de choc à l'intérieur de la tuyère. Des programmes informatiques modifiés ont été exécutés pour déterminer la nature de ce phénomène, ils ont montré que la formation de l'onde de choc peut être éliminée par des changements dans le contour près de la jonction.

Sunley et Ferriman[16] ont démontré que la pression à laquelle le gaz se sépare ne sera pas indépendante de la longueur de la tuyère, cela d'après les essais et les études réalisées **en 1964** sur la séparation des jets dans des tuyères conique qui joue un rôle très important dans l'estimation de la poussée d'un moteur fusée lorsqu'il fonctionne à haute altitude.

En 1965, Migdal et Kosson[17] ont fait une étude numérique sur les prédictions de choc sur les tuyères coniques pour un écoulement axisymétrique grâce à la méthode des caractéristiques et les solutions numériques ont été obtenues. Il apparait que la formation de choc initial se produit près de l'axe de symétrie. Il y a plusieurs applications où la formation d'une onde de choc dans cette région est importante par exemple pour les tuyères coniques.

Hoffman et Lorenc[18] ont fait une étude numérique **en 1965** sur les effets d'écoulement bidimensionnel de particules de gaz dans des tuyères coniques. Il est important d'utiliser des additifs métalliques en poudre dans les formulations propulsives pour augmenter

Chapitre I : La recherche bibliographique

la libération d'énergie de propulseur et pour supprimer l'instabilité de la combustion. Cependant, des pertes de performances importantes se produisent à la suite des effets d'écoulement hors d'équilibre associés à la traînée des particules et le transfert de chaleur. La méthode numérique des caractéristiques ensuite utilisée pour obtenir les propriétés des gaz dans le régime transsonique en aval et appliqué à l'écoulement axisymétrique.

En 1970, Wehofer et Moger[19] ont développé une méthode analytique qui pourrait être utilisée pour évaluer la pression totale, la température totale et les propriétés des gaz pour l'écoulement transsonique non visqueux dans les tuyères convergente- divergente et pour les tuyères coniques. C'était nécessaire que la méthode soit capable de considérer pour les tuyères ayant des corps centraux.

Le concept des tuyères à corps central – à bouchon- n'est pas nouveau, la recherche sur ce sujet a commencé dans les années **1950**, les principales caractéristiques de cette tuyère est son interaction avec les milieux extérieurs qui permet d'éviter le phénomène de séparation. [20]

La connaissance du phénomène de la séparation de l'écoulement turbulent de la tuyère, nécessite une meilleure compréhension du champ aérodynamique. **Pilinki et Nebbache**[21] ont analysé ce phénomène numériquement en 2004. Le but de cette étude est de simuler numériquement la séparation de l'écoulement pour une tuyère turbulente pour améliorer la fiabilité et l'efficacité des moteurs de fusée. La séparation du choc libre a été obtenue pour des rapports des pressions différents.

En 2008, Khan et Shembharkar ont réussi à visualiser l'écoulement dans une tuyère convergente- divergente à travers une étude numérique réalisée par le code de calcul de dynamique des fluides computationnelle CFD dans un régime sur-détendu. [22]

En 2013, Genin, Stark et Dirk[23] ont fait des études numériques et expérimentales pour l'évaluation de la distribution du flux sur les tuyères à double galbe et ils ont démontré que la valeur du flux thermique augmente dans la région de l'inflexion du contour.

Chapitre I : La recherche bibliographique

En 2016, Jia et Ruyan, Jiang, Zhenyu, Xiang, Min, Zhang[24] ont fait une étude numérique. L'objectif c'était d'étudier numériquement les charges latérales tridimensionnelles et la physique de l'écoulement associée d'une structure conique et exprimer aussi l'influence de l'événement d'étagement. Le flux transitoire de la tuyère est examiné à travers une méthode numérique précise et avec le processus de démarrage du moteur de l'étage supérieur.

La solution numérique pour les écoulements compressibles turbulents dans les tuyères est un problème difficile dans les applications de dynamique des fluides. Récemment, des études approfondies ont été consacrées à la compréhension des phénomènes de dynamique des fluides dans les tuyères des moteurs fusées. Un exemple d'un problème important sur l'échappement des moteurs à réaction et des moteurs fusées à propergol solide. Ledéveloppement de l'écoulement interne de la tuyère d'une fusée solide joue un rôle essentiel pour la conception et les performances. En particulier, le champ de vitesses moyen, la distribution de la pression statique sur la paroi et les caractéristiques de turbulence ont un impact direct et fort sur nombreux processus physiques se produisant à l'intérieur de la tuyère. Le comportement de l'écoulement à l'intérieur de la chambre de combustion joue un rôle dans la conception et le fonctionnement du moteur. Des études précédentes sur les moteurs fusées pour analyser les modèles de turbulence et les performances des différents modèles de turbulence ont été évaluées en comparant les résultats obtenus de la pression statique de la paroi et la position du choc avec les données expérimentales et numériques disponibles. Les contraintes de cisaillement à la paroi de la tuyère sont également calculées et le champ d'écoulement est aussi illustré [25].

Des recherches numériques ont été réalisées au niveau de centre aérospatial Allemand pour optimiser le comportement de transition grâce à la variation de la géométrie d'extension. Le gradient de pression dans l'extension conduit à une meilleure stabilité pour les deux modes de fonctionnement- au niveau de la mer et altitude.

En 2016 aussi , Dirk Schneider et Chloé Genin, [26]ont trouvé de meilleurs résultats pour la turbulence de contraintes de Spalart- Allmaras et Reynolds, ils ont fait une analyse sur l'effet de différents modèles de turbulence et l'influence de gradient de pression d'alimentation

Chapitre I : La recherche bibliographique

sur le comportement de l'écoulement dans la tuyère double galbe. Le principale modèle de turbulence était le modèle Spalart – Allmaras qui a donné de bons résultats.

Un problème courant lors du démarrage et de l'arrêt du moteur de fusée à cause de séparation du flux dans les tuyères de fusée. Ce phénomène provoqué par des forces latérales ou les charges latérales qui ne sont pas correctement traitées, peuvent provoquer une défaillance et endommager gravement le moteur. Dans le passé, les charges latérales ont causé plusieurs pannes de moteur et des fissures sur les parois. Pour cette raison, des études sur les charges latérales ont été menées dans le but d'atténuer leur impact. Les conceptions des tuyères de fusée étaient basées sur des modèles empiriques trop conservateurs pour résister aux charges latérales. [27]

Le phénomène aéroélastique englobe l'interaction entre plusieurs disciplines physiques et numériques. Les disciplines physiques sont la dynamique des fluides et la dynamique de la structure. Les disciplines numériques sont les calculs du comportement de la dynamique des fluides et des structures. Les propriétés des matériaux et l'épaisseur de la paroi ont des effets considérables sur le comportement aéroélastique des tuyères de la fusée.

En 2017, J.A Zhang et B. Shotorban et SijunZhang[27] ont fait une étude numérique sur la stabilité aéroélastique pour une tuyère fusée. Cette étude réalisée avec une approche numérique plus précise. Les simulations sont utilisées pour analyser les performances de latuyère en faisant varier soit les propriétés de matériau ou l'épaisseur de la paroi. L'épaisseur de la paroi est directement liée à la stabilité aéroélastique.

Les concepteurs des tuyères de fusée sont toujours mis au défi de rechercher la résolution pour avoir une conception de plus petit taille et légère. Les travaux de recherche effectués dans le domaine des tuyères de fusée au cours des 75 dernières années pour la simplification de la complexité de la structure, facilité la fabrication et la réduction des coûts. Ils ont fait des études analytique et numérique pour diminuer les pertes et avoir des performances maximales, cherché d'avoir aussi une pousse optimale avec un écoulement uniforme et parelle à la sortie ayant une pression égale à la pression amiante, prédire la position du point de séparation et l'onde de choc dans la tuyère.

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS SUR LES TUYÈRES

Chapitre II : Généralités sur les tuyères

II.1 INTRODUCTION :

Les tuyères ayant pour le rôle principal de transformer l'énergie de pression en énergie cinétique. La vitesse d'injection des produits de combustion à travers la section de sortie de la tuyère détermine la poussée d'un moteur avion.

Les gaz brûlés sont accélérés de vitesses subsonique à des vitesses supersonique. A cause de cette différence de régime on divise la tuyère en trois sections. Cette division est appropriée car cela permet de déterminer la poussée et le champ d'écoulement dans chaque région. Donc diviser la tuyère en trois sections de convergent subsonique où l'écoulement passe par une vitesse inférieure à la vitesse du son et se détend au sein du divergent supersonique.

Généralement, une tuyère se décompose en trois zones le convergent, le col et le divergent, éventuellement équipé de volets dits volets de tuyère. Le convergent c'est la partie amont de la tuyère située entre la chambre de combustion et le col où l'écoulement est subsonique.

Le col c'est la partie qui a le plus petit diamètre raccordant le convergent au divergent et est réalisé en matériau réfractaire comme graphite et tungstène pour conserver une section constante au cours du fonctionnement à des températures élevées. L'écoulement au niveau de col atteint la vitesse du son $M=1$.

Le divergent augmente la vitesse d'éjection des gaz ou l'écoulement atteint des vitesses supersonique. La forme de la tuyère permet l'opération de détente. La vitesse de la sortie dépend la configuration de la paroi du divergent et de l'aire de la section de sortie. Pour les taux de détente élevés, les tuyères seront convergente sinon seront convergente divergente.

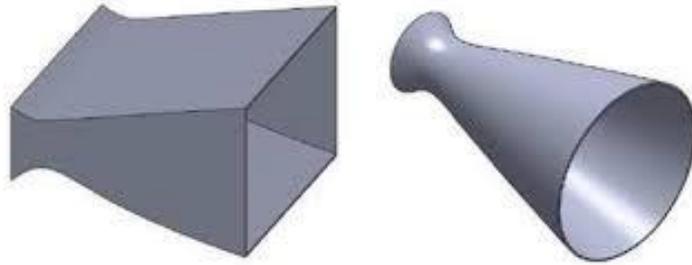


Figure (II,1) : Tuyère plane et tuyère axisymétrique

II .2 DEFINITION DE LA TUYERE :

Une tuyère est un conduit de section droite variable placé à la sortie d'un propulseur produisant des gaz chauds qui permet de transformer l'énergie thermique produit par la combustion en énergie cinétique et qui met en communication entre la chambre de combustion et le milieu extérieur. Les deux milieux sont à des pressions différentes. La forme de la tuyère permet de transformer l'énergie potentiel de gaz en énergie cinétique pour assurer la poussée. En général, la tuyère peut être convergente ou divergente ou bien comporter une section convergente et une autre divergente.

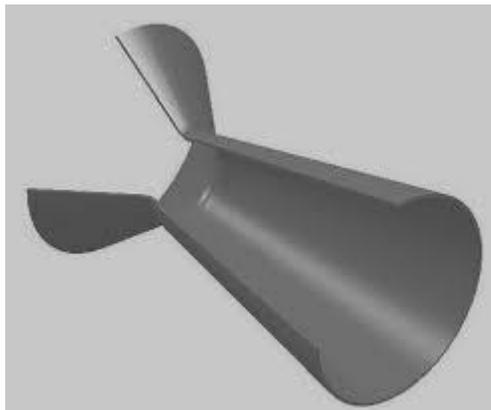


Figure (II, 2): tuyère convergente- divergente

Chapitre II : Généralités sur les tuyères

II. 3 LE ROLE ET L'UTULISATION DE LA TUYERE :

La tuyère a pour rôle d'accélérer les gaz d'une vitesse faible à l'entrée de convergent et assurer la détente optimale des gaz de combustion grâce à sa géométrie. Elle permet de produire de grandes quantités d'énergie à partir de gaz de combustion. Elle aussi contribue à la force propulsive ou force de réaction générée par la détente des gaz. Dans le cas des tuyères de fusées, fonctionnant à de très hautes températures, ce divergent doit être refroidi à cause de la chaleur dégagée. L'utilisation des tuyères supersonique apparait dans plusieurs domaines comme l'aérospatial et l'aéronautique.

II. 4 LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE TUYERE :

L'objectif d'une tuyère est d'augmenter l'énergie cinétique du fluide qui la traverse. L'accélération des gaz à haut température produits dans la chambre de combustion est le mécanisme physique utilisé dans les moteurs fusée pour générer la force de propulsive. Cette accélération est obtenue à l'aide de d'une tuyère.

Dans la chambre de combustion le gaz est à température et à pression élevées. Selon le théorème de Bernoulli, dans le col, le gaz accélérer et la pression diminuer et sa vitesse devient supersonique. Dans le divergent, la section augment et la pression diminuer mais comme la vitesse est supersonique elle augment car en supersonique le théorème de Bernoulli ne s'applique plus.

II.5 MOTEUR FUSEE :

Le moteur-fusée constitue un système autonome: il emporte les substances (appelées ergols) nécessaires à son alimentation. Ne prenant appui sur aucun support, il est capable de fonctionner dans l'atmosphère comme dans le vide. Son déplacement repose sur l'éjection, en sens opposé, de gaz. Ainsi la fusée éjecte des gaz vers l'arrière et se propulse par réaction. La

Chapitre II : Généralités sur les tuyères

poussée, la force créée par un moteur-fusée, résulte de l'éjection d'une certaine masse de gaz à vitesse élevée.

Dans un moteur-fusée, le carburant est brûlé dans la chambre de combustion qui est équipée dans sa partie inférieure d'une tuyère (canal d'éjection des gaz). La combustion produit de fortes quantités de gaz en expansion. Les gaz chauds exercent une poussée contre les parois de la chambre de combustion.

Les forces exercées sur les parois latérales s'équilibrent mutuellement, ainsi la force résultante est nulle. En revanche la pression exercée par les gaz sur la paroi supérieure de la chambre de combustion produit une force qui n'a pas de contre -partie puisque la tuyère (canal ouvert) n'oppose pas de paroi à une poussée contraire. La résultante des forces exercées sur la chambre de combustion est donc dirigée vers le haut ce qui propulse la fusée. C'est le même principe qui intervient lorsque l'on gonfle un ballon. Si on le maintient fermé rien ne se passe, il y a équilibre des forces de pression sur les parois internes du ballon. Par contre si on lâche le ballon, l'air sort brutalement et crée une poussée qui propulse le ballon dans le sens opposé à l'ouverture.

Les substances utilisées pour alimenter un moteur fusée et lui fournir son énergie propulsive se nomment ergols. C'est généralement en faisant réagir 2 ergols l'un sur l'autre que sont obtenus la réaction chimique exothermique (qui dégage de la chaleur) et l'éjection de gaz recherchée.

Dans le domaine spatial, le rôle d'une fusée est de transporter une charge utile (satellite, sonde, capsule habitée) au-delà de l'atmosphère et de lui donner une vitesse suffisante pour la mettre soit en orbite autour de la Terre, soit l'envoyer dans les confins de l'espace

Chapitre II : Généralités sur les tuyères

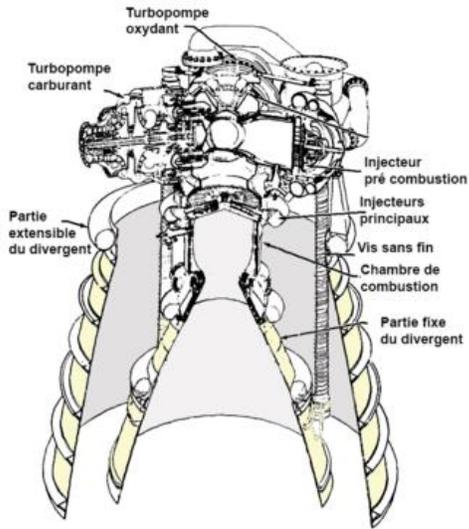


Figure (II, 3) : tuyère d'une fusée

II .6 MOTEUR AVION :

La propulsion sur l'aéronef est obtenue en créant une force appelée poussée, qui résulte de l'accélération d'une masse d'air à travers la tuyère en sens opposé du déplacement. La tuyère doit assurer la détente optimale des gaz brûlés pour avoir une poussée maximale et ne doit pas provoquer des pertes de poussée trop élevées. Elle doit aussi contribuer au freinage de l'Avion pour la phase d'atterrissage et aussi l'atténuation de bruit.



Figure (II, 4) : tuyère à section variable

Chapitre II : Généralités sur les tuyères

II .7 MISSILE :

Un missile est constitué par une chambre de combustion et la tuyère qui représente 70% de la masse totale d'une chambre propulsive.

II .8 LA TUYERE SUPERSONIQUE :

La tuyère supersonique est un organe mécanique appelée tuyère De-Laval. On les retrouve dans plusieurs structures du domaine aéronautique militaire et astronautique et aussi les missiles et les moteurs fusés. C'est une conduite de forme convergent – divergente qui lie la chambre contenant un gaz comprimé avec le milieu extérieur. La différence de pressions entre les deux milieux permet le mouvement de gaz. Tout le long de la tuyère, la vitesse du gaz augmente cependant que sa température et de sa pression diminuent.

Les tuyères supersoniques jouent un rôle très important pour la conception des engins aérospatiaux. Les concepteurs aéronautique ont débuté les applications par les tuyères coniques et ont pensées à améliorer les performances des tuyères de propulsion.

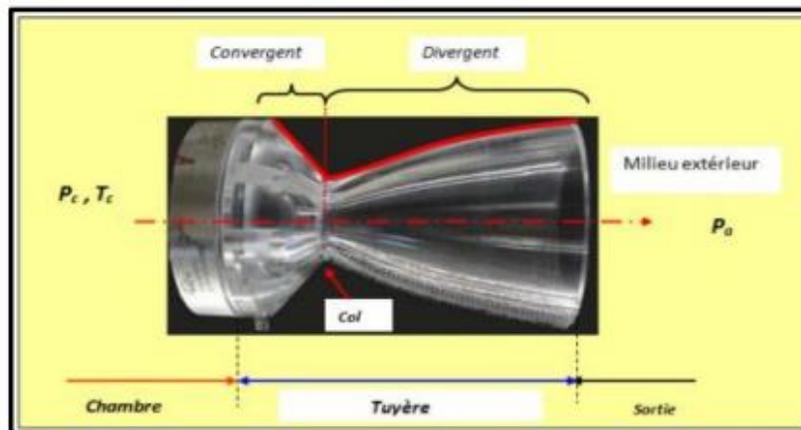


Figure (II, 5) la tuyère de Laval [27]

Chapitre II : Généralités sur les tuyères

II. 9 TYPES DE TUYERES :

II. 9.1 Tuyères conventionnelles :

II .9.1.1 Tuyère Conique :

Les tuyères à profils conique sont utilisées particulièrement en raison de la simplicité de la conception et de la réalisation de leur divergent. La vitesse de la sortie de ce type de tuyère est essentiellement égale à la valeur correspondante à un rapport de détente unidimensionnelle, à l'exception de la direction de l'écoulement à la sortie qui n'est pas complètement axial, d'où une perte de performances due à la divergence de l'écoulement. L'angle de divergence se situe entre 15° et 25° . Ce type de profile simple équipe principalement les missiles et les propulseurs a poudre. Un exemple de la fusée historique allemande V-2.[29]



Figure(II,6) : tuyère conique

II .9.1.2 Tuyère à contour profilé :

Comme on l'avais vu, les tuyères conique engendre une perte de poussées considérable à cause de la divergence de l'écoulement à la sortie, donc pour remédier à ce problème ; il faut tourner le contour du divergent vers l'intérieur pour ramener l'écoulement a une direction axiale et avec la partie divergente près du col a des valeurs de divergence relativement importantes pour

Chapitre II : Généralités sur les tuyères

compenser la détente manquant en faisant incliner le profil vers l'intérieur c'est justement le but de cette conception. [29]

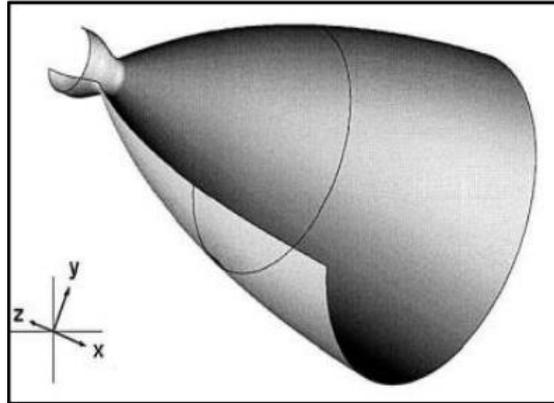


Figure (II,7) : Tuyère a contour profilé.

II .9.1.3 Tuyère a noyau centrale :

Tuyère comportant un corps central qui obture plus ou moins l'orifice de la sortie en vue d'améliorer les performances en modifiant le débit et la forme du jet.



Figure (II, 8): Tuyère a noyau centrale

II .9.2 Tuyères innovantes

II .9.2.1 Tuyère à section variable :

La sortie de la tuyère est à section variable et constituée d'une multitude de volets qui en se rapprochant ou en s'écartant, modifient le diamètre de la tuyère afin qu'elle soit adaptée. Pour se rapprocher le plus possible de la forme circulaire, les demi volets sont réalisés par une multitude de petits volets. En général la commande de position est assurée par un anneau qui est tire ou poussé. La fermeture et l'ouverture par des vérins répartis à la périphérie du canal poste-combustion. [29]



Figure (II, 9) : Tuyère à section variable

II .9.2.2 Tuyère à chevrons « tuyères en dents de scie » :

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

- ✓ Une paroi interne à l'intérieur de laquelle circule un flux d'air primaire et qui comporte à l'extrémité externe des chevrons.
- ✓ Une paroi externe entourant au moins partiellement la paroi interne et le long de laquelle s'écoule un flux d'air secondaire, la paroi externe étant mobile le long de la paroi interne.

L'invention trouve des applications dans le domaine de l'aéronautique et en particulière dans le domaine de la réduction des nuisances sonores extérieures produits par les turboréacteurs d'un aéronef notamment lors de la phase de décollage. [29]



Figure (II, 10) : Tuyère à chevrons

II .9.2.3 Tuyère orientable :

C'est une tuyère articulée autour d'un ou deux axes comportant une partie fixe d'une part et l'autre une partie pivotante et des vérins de commande permettant de déplacer la partie pivotante avec déformation de la structure annulaire élastique ce qui permet d'orienter l'axe de poussé. [29]



Figure (II, 11) : Tuyère orientable

II .9.2.4 Tuyère a divergent déployable :

Cette tuyère présente un axe longitudinal et comprend une première partie définissant un col de tuyère et un premier tronçon de divergent fixe, au moins un deuxième tronçon de divergent déployable de section supérieure à celle du premier tronçon et un mécanisme de déploiement du

Chapitre II : Généralités sur les tuyères

deuxième tronçon disposé à l'extérieur des premier et deuxième tronçons de divergent. Le déploiement de la partie déployable du divergent s'effectue de façon automatique à partir d'une commande électrique ou hydraulique.

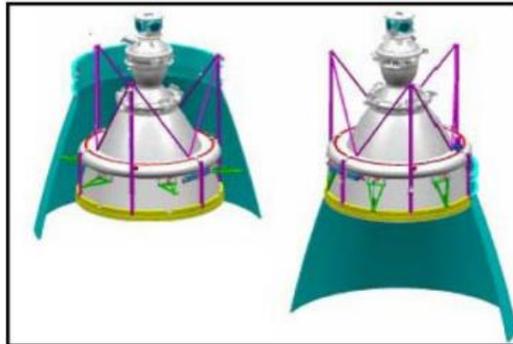


Figure (II, 12) : Tuyère a divergent déployable

II .9.2.5 Tuyère AeroSPIKE

La tuyère aerospike est un type de tuyère qui permet d'optimiser l'efficacité de la propulsion à toutes les altitudes. C'est l'une des tuyères innovantes a été proposée pour la première fois dans les années 1940. La chine et le japon ont également consacre beaucoup d'attentiona ce concept de tuyère.[30]



Figure (II, 13) : Tuyère Aeospike

Chapitre II : Généralités sur les tuyères

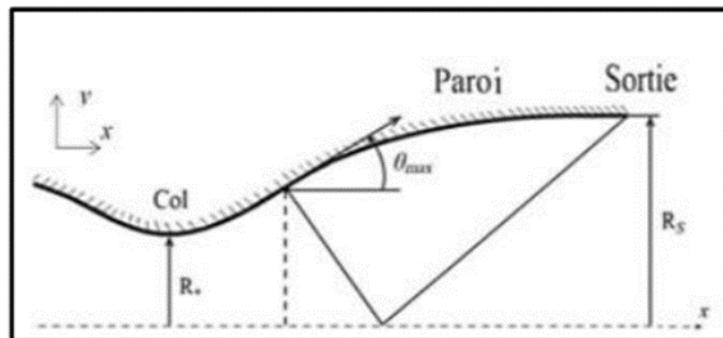
II .9.3 Tuyères adaptées en altitude :

Des progrès plus significatifs dans les performances d'une tuyère peuvent être réalisés à travers l'adaptation de la pression de la sortie tuyère à la pression ambiante pendant la montée du lanceur dans l'atmosphère. Ceci peut être réalisé avec la conception d'une tuyère qui offre une adaptation en altitude continue. [29]

II .9.3.1 Les tuyères à découlement contrôlé :

II .9.3.1.1 Tuyère à zone d'expansion :

La forme de la zone d'expansion de la partie divergente est un peu arbitraire. Typiquement, une forme d'arc circulaire de grand rayon est utilisée dans les souffleries. A la sortie de la tuyère, l'écoulement devient uniforme et parallèle à l'axe de révolution comme indique [29] la figure(II, 14)



La figure (II, 14) : Forme de la tuyère a zone d'expansion

II .9.3.1.2 Tuyère double galbe :

La principale objective d'une tuyère double galbe est le gain de performance par principe d'auto-adaptation en fonction de l'altitude.

Chapitre II : Généralités sur les tuyères

En effet, ce système a pour avantage d'avoir une auto adaptation de l'écoulement pour deux régimes de fonctionnement à basse altitude et haut altitude sans activation mécanique. Le principe est théoriquement assez simple mais les efforts structuraux mis en jeu être importants. Il en découle une étude approfondie de ce concept afin de garantir un fonctionnement optimale de ce système.

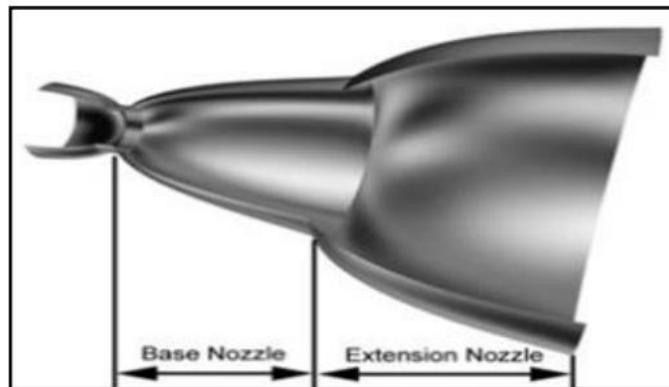
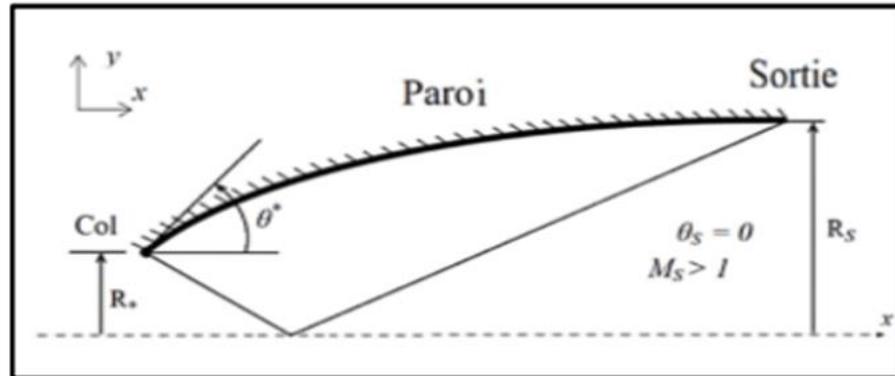


Figure (II, 15) : tuyère double galbe

II .9.3.1.3 Tuyère à détente centrée :

La tuyère est de type a détente centrée, si la zone d'expansion est contractée en un point, où la détente prend place à travers des ondes de Prandtl Meyer centrées et générées à partir du coin du col de la tuyère avec un angle inhale de 15 degrés. [29]

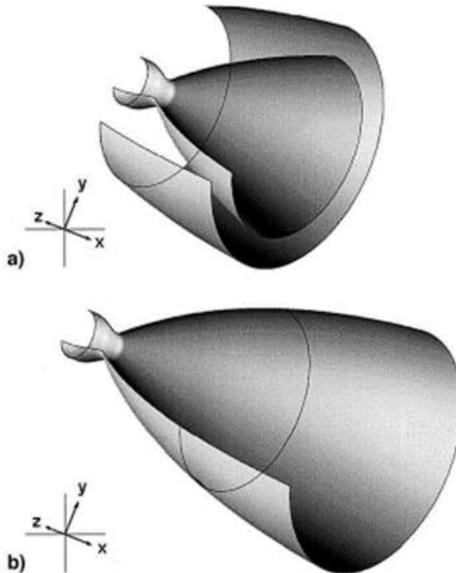


La figure (II, 16) : Forme générale d'une tuyère à détente centrée

II .9.3.1.4 Tuyère a divergent extensible :

Les tuyères de ce type sont actuellement utilisées uniquement pour les moteurs fusées d'étages supérieurs afin de réduire le volume d'emballage de la tuyère. On les retrouve aussi dans les moteurs à propergols solide et les moteurs a propergols liquide. L'idée principale de l'extension extensible est d'utiliser une tuyère tronquée avec une faible expansion a basse altitude, et d'avoir aussi une extension de tuyère supérieure a haut altitude.

La performance est facilement prévisible. L'ensemble du contour de la tuyère y compris l'extension extensible est profilée pour un maximum de performance a un rapport de section élève. Le rapport de surface de la première section de la tuyère est alors déterminée et le contour de la tuyère est diviser en deux partie, la partie fixe de la tuyère et la partie extension. Une perte de performance mineure est incorporée pendant les opérations à basse altitude en raison de la tuyère intérieure tronquée, qui a un contour non optimal pour ce rapport d'aire de sortie intermédiaire. Les caractéristiques de performance en fonction de vol sont similaires à celles de la tuyère avec l'insert éjectable. Le principale inconvénient du concept de tuyère a divergent extensible est que il nécessite des dispositifs mécaniques ce qui réduit la fiabilité du moteur et augmente la masse totale de moteur. Le flux externe provoque des charges de pression stables et instables, alors que le bruit provoque des vibrations de l'extension de la tuyère. [31]



La figure (II, 17) : tuyère a divergente extensive

II .9.4 Les tuyères bi-modes :

II .9.4.1 Tuyère double détente (dual expander nozzle) :

Une tuyère double détenteur comporte deux chambres de poussée et deux tuyères concentriques. Il est constitué d'une chambre de poussée en forme de cloche classique entourée par une chambre de combustion annulaire. Les deux chambres ont des tuyères primaires courtes qui se terminent par une extension de tuyère divergente commune. Les deux chambres de poussée fonctionnent en partageant la même section de sortie à basse altitude. Pendant la mission, une chambre de poussée est fermée, permettant à l'autre tuyère d'utiliser toute la zone de sortie, créant un rapport de sections d'expansion élevé jusqu'à la fin de la combustion. [31]

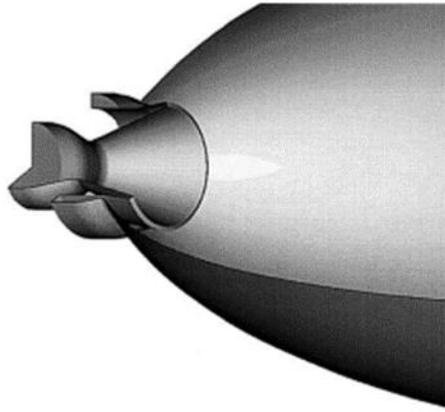


Figure (II, 18) : tuyère double détente

II .9.4.2 Tuyères à double col :

A basse altitude, la chambre de pousse (chambre de combustion + tuyère) externe fonctionne avec la chambre de poussée interne en parallèle. Dans ce mode d'opération, le moteur a un col large qui produit un rapport de détente modéré. A une certaine altitude, la chambre de poussée externe s'éteint et le moteur continue a fonctionné seulement avec la chambre de poussée interne. Avec cette configuration, l'écoulement de la chambre interne se détend et s'attache d'une manière supersonique à la chambre externe en résultant un rapport de détente élevé pour le reste de mission. [29]

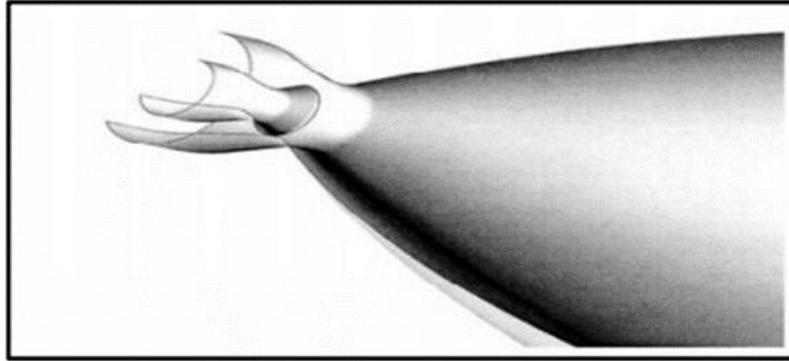


Figure (II, 19): tuyère double col

II .9.5 Les tuyères avec limite atmosphérique :

II .9.5.1 Tuyère à bouchon :

Le col de ce type de tuyères possède la forme d'un anneau localisé au diamètre extérieur. Le profil optimal d'une tuyère à bouchon se présente sous forme d'un rétrécissement progressif en un pic d'où le nom en anglais (Spike Nozzle). Signifiant tuyère point comme le montre la figure.

La chambre de combustion se trouvant à la base de la tuyère est en forme d'anneau. Pour minimiser le poids, cette conception est raccourcie sans grande influence sur l'efficacité. L'écoulement des gaz est régulé par des ondes de détente provenant de la déviation de l'écoulement due au bouchon dont la surface représente le principal paramètre qui influence l'écoulement. Quand aux gaz injectés, ils sont régulés par la pression atmosphérique de telle sorte qu'à différentes attitudes la variation de pression permettra le changement de la section de sortie. Cela induit à une compensation atmosphérique optimisée.[29]

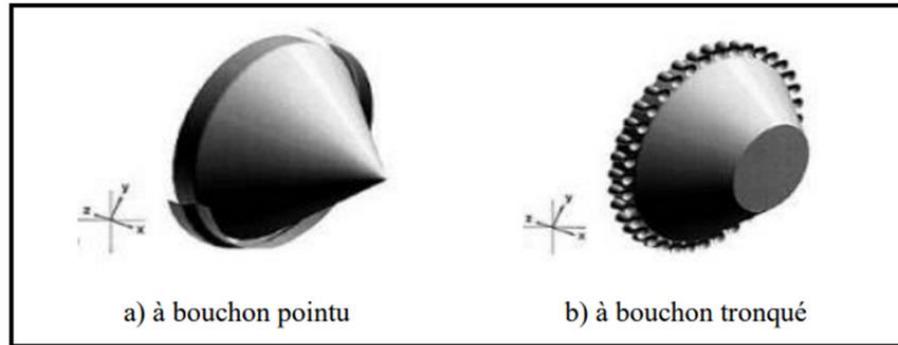


Figure (II, 20): tuyère à corps centrale

II .9.5.2 Tuyère type détente- déviation :

Dans ce type de tuyère une chambre de combustion compacte se positionne autour de la ligne centrale et présente un col annulaire au voisinage de ce dernier. Dans ce cas, se dirigent dans la direction de l'écoulement du bouchon centrale qui réalise une rotation de l'écoulement en expansion à une direction presque axiale.[29]

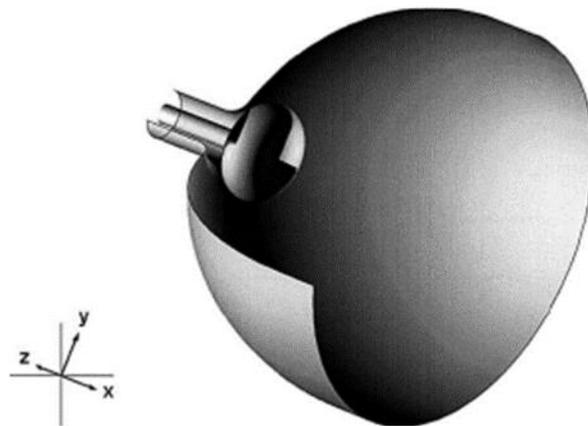


Figure (II, 21) : Tuyère type détente- déviation

Chapitre II : Généralités sur les tuyères

II.10 LES SOUFFLERIES :

Une soufflerie est un dispositif expérimental utilisé pour prévoir le comportement et simuler les conditions rencontrées par un véhicule se déplaçant dans l'air en réalisant une simulation expérimentale sur une maquette en général à l'échelle réduite.

Un véhicule étudié dans une soufflerie est placé, immobile dans un écoulement artificiel d'air ou de gaz. Le véhicule est fixe et l'air en mouvement. La soufflerie réalise un changement de référentiel : le véhicule est fixe et l'air en mouvement. C'est équivalent sauf lorsque il y a des frouements entre les pneus du véhicule et la surface du sol (automobile, train, avion à l'atterrissage ou décollage) : on parle alors de l'effet de sol. [32]

La photo ci-dessous montre une voiture subissant des essais en soufflerie. Dans la réalité, la voiture se déplace dans l'atmosphère au repos en roulant sur une route fixe. Ici, nous voyons bien les lignes de courant d'air se propager autour de la voiture. En essai, l'air s'écoule donc autour de la maquette immobile et la route est fixe. Encore une fois, l'inconvénient de l'immobilité de la voiture, c'est qu'il n'y a pas d'effet de sol, ce qui crée un problème pour la simulation de cet effet.

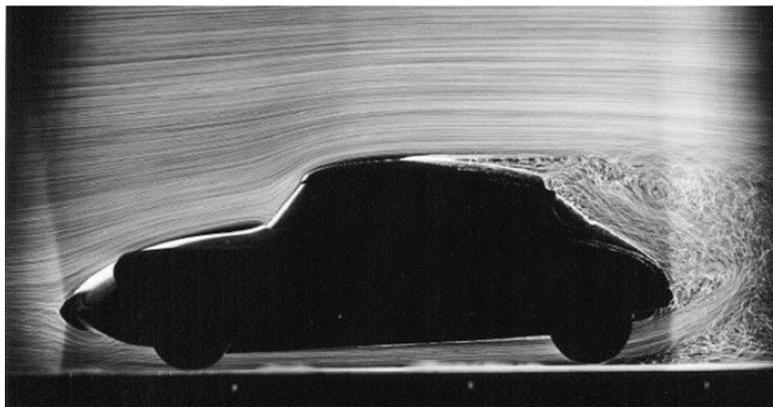


Figure (II, 22): Maquette automobile dans une veine d'essai de soufflerie

Chapitre II : Généralités sur les tuyères

Pour simuler les conditions de fonctionnement des systèmes aérodynamique réels (maquette d'avion, profil d'aile...) on utilise des souffleries. La figure (II, 22) donne un exemple de soufflerie à deux cols. Ces installations comprennent un système d'alimentation et de mise en vitesse des gaz, une vitesse d'essai et un système d'évacuation des gaz ou une boucle de récupération permettant la recirculation des gaz.

L'accélération des gaz à vitesse supersonique est réalisée à l'aide d'une tuyère convergente – divergente et la récupération d'une partie de l'énergie cédée au fluide est réalisée par un diffuseur.

II .10.1 Les souffleries supersoniques :

Ces souffleries fonctionnent de Mach 1,6 à Mach 4. Leurs domaines de prédilections sont les avions de transport (Concorde), les avions de combat et les missiles. Malgré tout, pour obtenir un flux supersonique, la forme de la veine doit être particulière. En effet, la tuyère doit être convergente- divergente, comme sur la photo suivante [32]

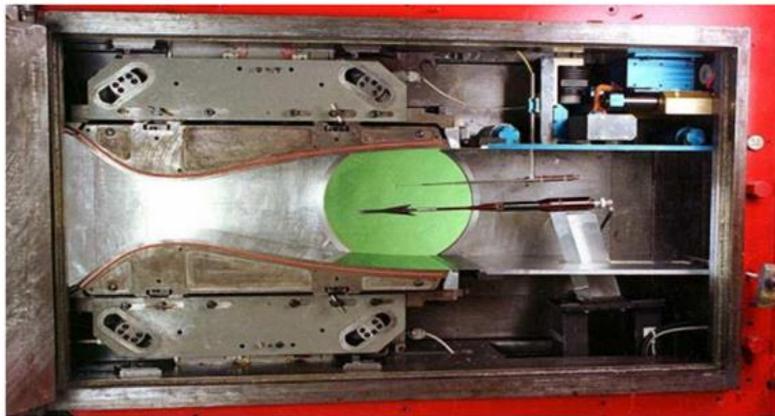


Figure (II, 23) : Tuyère de la soufflerie

Chapitre II : Généralités sur les tuyères

CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différents types de tuyères et leurs rôles ainsi que leurs applications.

CHAPITRE III

FONCTIONNEMENT DES TUYÈRES SUPERSONIQUE

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

III. 1 INTRODUCTION :

L'approche quasi monodimensionnelle est une approximation pour un écoulement dans une surface variable du tube de courant figure (III, 1). En trois dimensions, la solution exacte doit être trouvée par des méthodes numériques comme : les différences finies, les volumes finis et la méthode caractéristiques. L'approche quasi-monodimensionnelle, permet à la section du tube de courant de varier contrairement à l'approche monodimensionnelle figure (III, 1, a), en même temps on continue de supposer que toutes les propriétés de l'écoulement sont uniformes à travers une section donnée, ces propriétés sont en fonction de 'x' et du temps 't' si l'écoulement est non permanent.

Chaque écoulement où $A = A(x)$ et $p = p(x)$ et $\rho = \rho(x)$ et $v = u = u(x)$ et en plus d'être permanent (ne dépend pas le temps) est définie comme un écoulement quasi monodimensionnel.

[29]

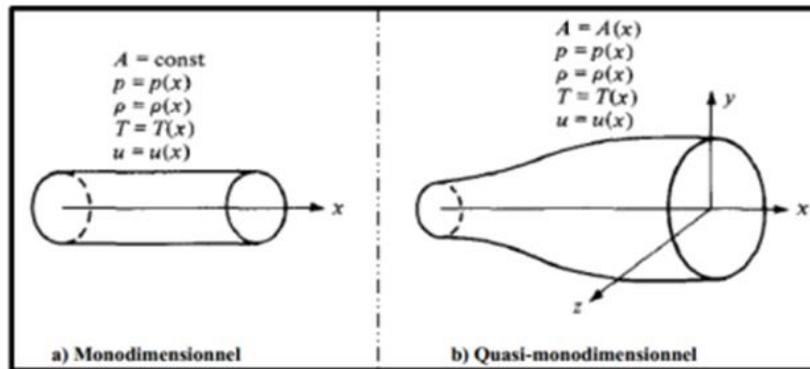


Figure (III, 1): la différence entre l'approche quasi et mono dimensionnel.

III.2 DEFINITIONS IMPORTANTES :

III.2.1 Le nombre de Mach et la vitesse du son :

Le nombre adimensionnel de Mach est le critère par lequel les écoulements compressibles et incompressibles sont départagés. Par définition, le nombre de Mach est le rapport entre les forces d'inertie et les forces de compressibilité et il s'écrit comme le rapport de la vitesse du

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques .

fluide sur celle du son dans ce fluide. Il convient de souligner ici que Mach dépend de la température du fluide. Un profil de Mach pourrait donc être différent d'un profil de vitesse dans la mesure où il y aurait un gradient thermique dans le fluide. [33]

$$M_a = \frac{V}{c} = \frac{V}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (\text{III, 1})$$

Equation : Nombre de Mach

Le son découle de la propagation d'une onde de pression, ces ondes possèdent une source ainsi qu'une vitesse de propagation. Par analogie le son est comme les vagues provoquées par la projection d'une pierre dans un lac. Les vagues se déplacent à une certaine vitesse. La vitesse de son dépend du milieu de propagation, entre autre, de sa densité. Par définition, la vitesse du son est le rapport de la variation de pression sur la variation de la densité et son symbole est c . il existe trois façons d'écrire l'équation dépendamment des simplifications admises.

$$c = \frac{\partial p}{\partial \rho} \quad (\text{III, 2})$$

Equation : définition de la vitesse du son

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (\text{III, 3})$$

Equation: la vitesse du son

$$c = \sqrt{\gamma RT} \quad (\text{III, 4})$$

Equation: la vitesse du son si gaz parfait

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

III.2.2 Ecoulement isentropique :

Se dit d'un écoulement dont le niveau d'entropie reste constant. C'est l'une des simplifications couramment utilisées pour les calculs préliminaires d'écoulements compressibles.

Le terme adiabatique implique que dans la situation analysée, il n'y aura aucune addition ou perte thermique du volume de contrôle considéré.

Les équations isentropiques présentées ici sont dérivées des équations de quantité de mouvement, d'énergie et des gaz parfaits. [33]

$$p = \rho RT \quad (\text{III}, 5)$$

Equation : loi des gaz parfait

Les équations isentropiques sont présentées sous forme de ratio entre une valeur d'arrêt et sa valeur statique. Ce sont ces trois équations qui doivent être utilisées afin de calculer les propriétés de l'écoulement.

$$\frac{T_o}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \quad (\text{III}, 6)$$

Equation : Rapport isentropique de Température

$$\frac{P_o}{P} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_a^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (\text{III}, 7)$$

Equation : Rapport isentropique de pression

Le rapport de pression doit être utilisé en écoulement compressible à la place de l'équation de pression dynamique utilisée en incompressible. L'équation de la pression dynamique fait appel à la vitesse, alors que le rapport de pression fait appel au nombre de mach. [33]

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_a^2 \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (\text{III, 8})$$

Equation : rapport isentropique de densité

III.2.3 Les ondes de choc :

Une onde de choc est une discontinuité des propriétés d'un écoulement s'accompagnant d'une augmentation de l'entropie. Elle ne peut se produire qu'en écoulement supersonique. Une onde de choc augmente la pression statique, la température statique ainsi que la densité du fluide. Cependant, le nombre de Mach ainsi que la pression totale diminuent.

Les ondes de choc peuvent être divisées en trois catégories – Chocs droits, obliques et détachés. Les chocs droits et obliques ont des solutions analytiques relativement facile à calculer. Cependant, les chocs détachés sont beaucoup plus complexes et requièrent des méthodes plus sophistiquées. [33]

III .2.3.1 Ondes de choc droites :

Une onde de choc droite se distingue à l'aide de deux particularités – elle est perpendiculaire à la direction de l'écoulement, et l'écoulement en aval est toujours en régime subsonique. Elle est également mobile, il est possible de lui faire changer de position en modifiant les pressions en amont ou en aval. [33]

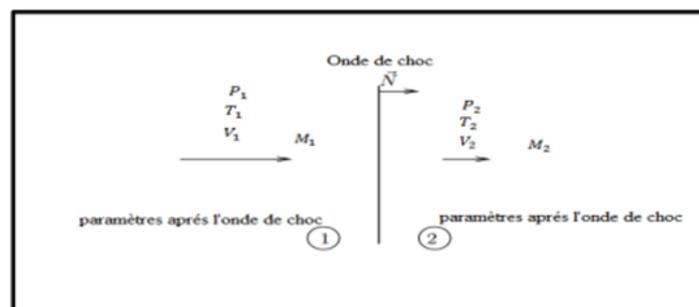


Figure (III, 2): illustration d'une onde de choc normale.

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

III .2.3.2 Ondes de choc obliques :

Contrairement au choc droit, l'écoulement reste supersonique après un choc oblique. Ce type de choc dévie l'écoulement qui le traverse. De même, un écoulement supersonique forcé de changer de direction par un mur générera une onde de choc oblique. Contrairement au choc droit qui peut se déplacer longitudinalement avec les variations de pression, le choc oblique est attaché à un point de la paroi, mais son angle sera modifié. [33]

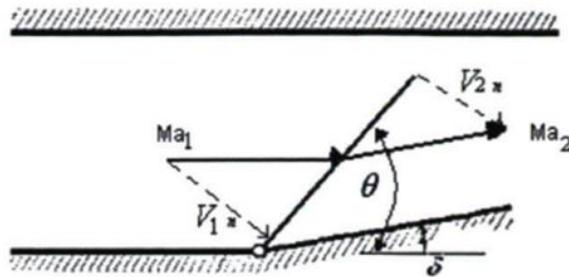


Figure (III, 3): illustration d'une onde de choc oblique

III.2.4 Ecoulement de Prandtl- Meyer :

La théorie des écoulements de Prandtl- Meyer en supersonique est utile dans les cas où il y a une détente d'un écoulement, ou bien une compression isentropique. Une détente est considérée comme isentropique en soi. Par contre, la compression s'effectue par onde de choc, phénomène entropique. Il existe pourtant une façon d'obtenir une compression pratiquement isentropique. Selon la théorie des chocs, plus la déviation de l'écoulement est faible, moins le choc oblique entraînera de pertes. A la limite, une succession de faibles déviations générerait une série d'ondes de chocs obliques dont les pertes seraient pratiquement nulles. Les angles de ces chocs ainsi que les propriétés des écoulements se calculeront alors avec la théorie de Prandtl-Meyer. [33]

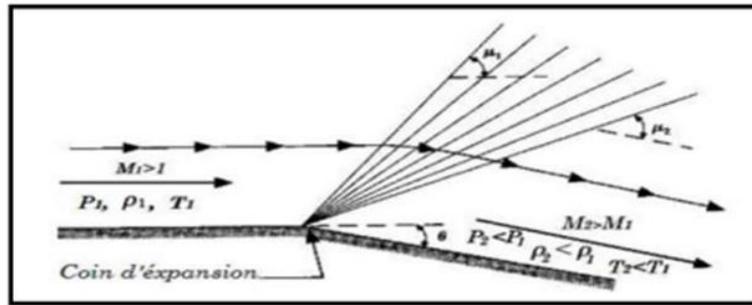


Figure (III, 4): illustration de la détente de Prandtl- Meyer

III.2.5 Classification des écoulements :

III.2.5.1 les écoulements incompressibles et compressibles : [34]

On peut distinguer des écoulements compressibles et les écoulements incompressibles :

- **Écoulement incompressible** : c'est un écoulement dont la masse volumique est considérée comme constante et ne dépend pas de la pression qui s'y exerce.
- **Écoulement compressible** : c'est un écoulement par un nombre de mach supérieur à 0.3.

III.2.5.2 Les régimes de l'écoulement : [34]

Les écoulements compressibles peuvent être classés d'après le nombre de Mach :

- **Écoulement subsonique** :

Un écoulement en régime subsonique lorsque le nombre de Mach est inférieur au Mach critique qui correspond à l'apparition d'une onde de choc, La vitesse de l'écoulement est inférieure à la vitesse du son.

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques .

- **Ecoulement transsonique :**

L'écoulement est transsonique si sa vitesse est égale à la vitesse du son, ce type d'écoulement implique un choc de recompression. La prévision de ce type d'écoulement physiquement complexe reste difficile à effectuer.

- **Ecoulement supersonique :**

Un écoulement en régime supersonique lorsque le nombre de Mach est supérieur au Mach critique. La vitesse de l'écoulement est supérieure à la vitesse du son

- **Ecoulement hypersonique :**

Un écoulement en régime hypersonique lorsque le nombre de mach dépassé 5. La température, la pression et la densité augmentent de manière presque explosive.

III. 3 FONCTIONNEMENT D'UNE TUYERE SUPERSONIQUE :

III. 3.1 Tuyère supersonique :

La tuyère supersonique est appelée aussi tuyère de Laval, est une conduite de forme convergente-divergente permet de détente les gaz produit par la chambre de combustion pour transformer l'énergie potentielle du gaz en énergie cinétique.

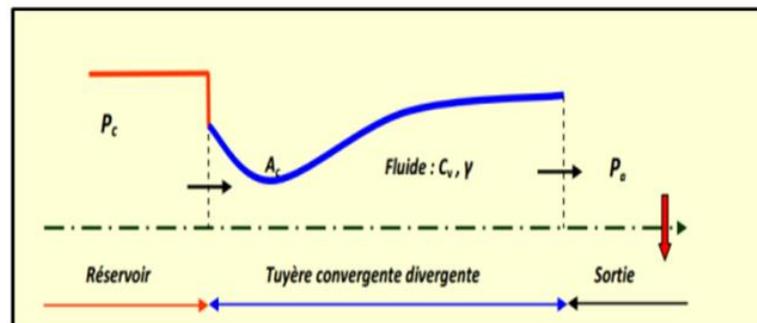


Figure (III, 5) : la tuyère supersonique

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques .

III. 3.2 Ecoulements dans une tuyère :

On considère une tuyère convergente- divergente dite de Laval a géométrie fixée voir la figure, on admet que l'écoulement est adiabatique et que les frottements sont négligeables. Des ondes de choc peuvent apparaitre. Celle-ci ne sont pas strictement droites car l'écoulement n'est lui-même pas strictement unidimensionnel. On peut considérer que les chocs sont droits si la variation de section de la tuyère n'est pas trop rapide et si l'épaisseur des couches limites est faible par rapport au diamètre.

On peut distinguer quatre régimes d'écoulement :

- 1) **Régime 1 (courbes (a), (b), figure (III, 6)) :** l'ensemble de l'écoulement est subsonique et la tuyère fonctionne comme un Venturi. Les gaz sont accélérés dans le convergent puis leur vitesse diminue dans le divergent. La section au col est supérieure à la section critique. Le rapport $\frac{P}{P_i}$ passe par un minimum au col. La limite du régime 1 est atteinte lorsque pour une pression de sortie ou d'éjection P_e suffisamment faible, la pression au col devient égale à la pression critique (courbe (c) sur la figure (III, 6)). L'écoulement est subsonique de part et d'autre du col et est sonique au col.
- 2) **Régime 2 (courbe (d)) :** les conditions critiques sont atteintes au col. L'écoulement devient supersonique dans une partie du divergent. Un choc droit apparait en aval du col et produit une recompression accompagnée d'une accélération de l'écoulement. En aval du choc, l'écoulement est à nouveau subsonique, le nombre de Mach diminue jusqu'à la section d'éjection et le rapport $\frac{P}{P_i}$ augmente. Le choc se place de telle façon que la recompression qui s'effectue en aval ramène la pression d'éjection P_e a la pression ambiante P_a .

Le choc se déplace vers l'aval lorsque P_a diminue. Les variations de P_a n'ont aucun effet sur l'écoulement supersonique qui se développe en amont du choc. Le col est amorcé et les paramètres de l'écoulement suivent une évolution isentropique. Les valeurs de Ma et P se placent, en amont du choc, sur une courbe unique (courbe d). La limite du régime 2 est atteinte

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

lorsque le choc droit se place dans la section d'éjection de la tuyère (courbe e) la pression d'éjection en aval du choc est P_{a2} .

- 3) **Régime 3 (courbes (f) & (g))** : il apparait pour les valeurs de P_a plus faibles que P_{a2} . L'écoulement dans le divergent est entièrement supersonique et la pression d'éjection correspond à une évolution isentropique $P_e = P_{isen}$. Les variations de P_a ne modifient plus l'écoulement à l'intérieur de la tuyère. Comme $P_e = P_{isen}$ est inférieur à P_a , l'adaptation de pression entre le jet issu de la tuyère et l'atmosphère ambiante doit se faire à l'extérieur du divergent, pas l'intermédiaire d'ondes de choc obliques. Ces ondes de choc forment une série de cellules périodiques en forme de diamant. La taille des cellules augmente lorsque la pression ambiante P_a diminue. La limite du régime 3 est atteinte lorsque la pression ambiante devient égale à $P_{a3} = P_{isen}$. La tuyère est alors parfaitement adaptée, les cellules de choc disparaissent et il n'y a plus de recompression externe.

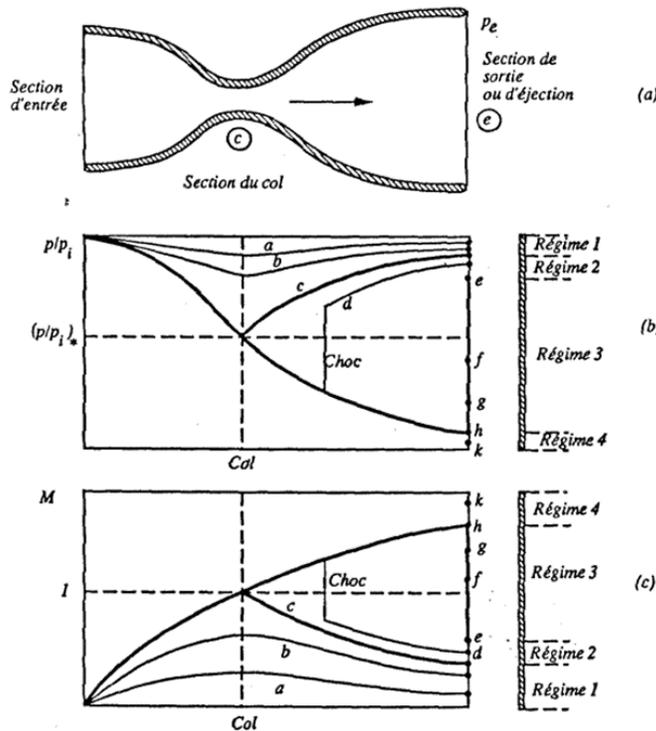


Figure (III, 6) : Régimes d'écoulement dans une tuyère de Laval d'après Candel – 1995-, avec P_i la pression d'arrêt isentropique et M le nombre de Mach.

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

- 4) **Régime 4 (courbe (k), Figure .1-2)** : Pour $P_a < P_{isen}$, les gaz éjectés par la tuyère se détendent à l'extérieur par l'intermédiaire d'une série d'ondes de détente obliques. Ce régime apparaît lorsque la tuyère n'est plus capable d'assurer une détente complète jusqu'à la pression ambiante. On retrouve ce régime pendant la phase propulsive d'une fusée aux très hautes altitudes. Les gaz éjectés par les moteurs forment alors un panache évasé caractéristique de la détente externe. [35]

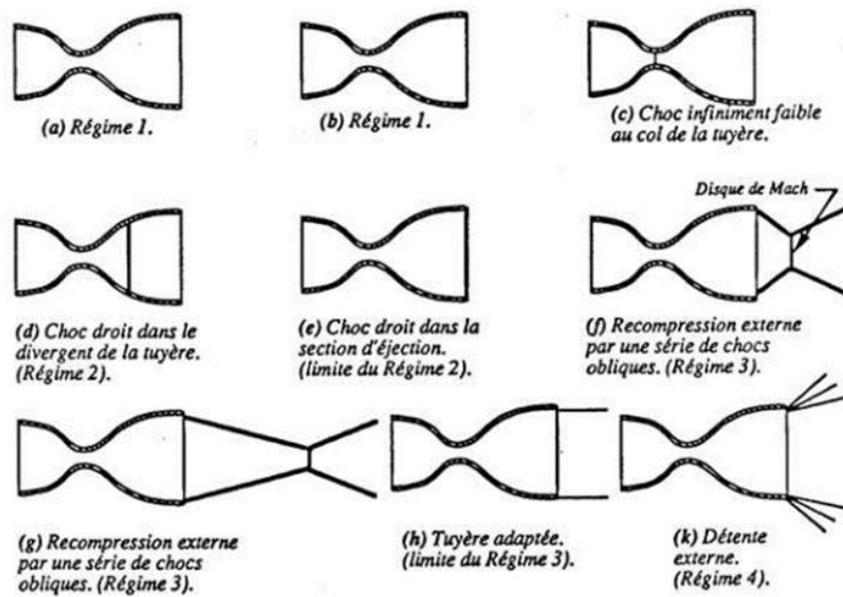


Figure (III, 7) : Types d'ondes de choc dans une tuyère de Laval d'après Candel (1995)

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

III. 3.3 Fonctionnement réel de la tuyère supersonique :

Pour les écoulements réels, la tuyère comporte une couche limite, si le col de la tuyère est sonique, l'écoulement dans la tuyère dépend seulement de la pression de la sortie P_e et la pression du milieu extérieur P_a (ambiante). par la comparaison entre ces deux pressions, il existe trois cas :

- ✓ $P_e = P_a$: tuyère adaptée.
- ✓ $P_e < P_a$: tuyère sur-détendue.
- ✓ $P_e > P_a$: tuyère sous-détendue

III. 4. ADAPTATION :

C'est le régime de poussée optimale où $P_e = P_a$. A l'adaptation, l'écoulement le long de la tuyère suit une distribution de pression strictement décroissante depuis la pression chambre jusqu'à la pression de sortie qui est égale à la pression ambiante (P_a tend vers P_{isen}). Au voisinage de la lèvre E figure (III, 6), les lignes de courant moyennes du jet quittent le divergent sans subir aucune différence de pression statique. En quittant la lèvre E, la couche limite du jet entre en contact avec le fluide ambiant et l'entraîne dans son sillage, ce qui forme une couche de mélange.[36]

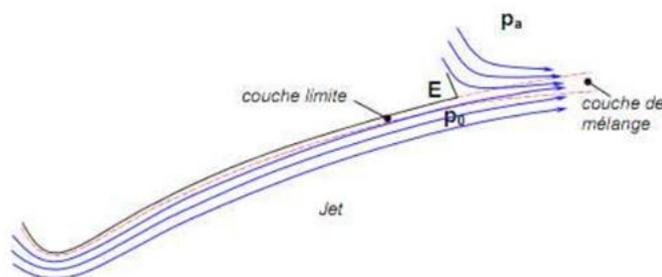


Figure (III, 8) : lignes de courant dans la tuyère à l'adaptation.

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

III.4. 1 régime de sous-détente :

Le régime de sous détente est un régime hors adaptation. Pour tout fonctionnement de la tuyère a une pression ambiante inférieure à celle d'adaptation $P_{a\text{inf}}$, l'écoulement de la tuyère se détend de la pression à la sortie à la pression P_a lorsqu'il quitte la lèvre E. un faisceau d'ondes de détente centrées a la lèvre se forme permettant d'ajuster la pression de P_a à P_e figure (III, 7).

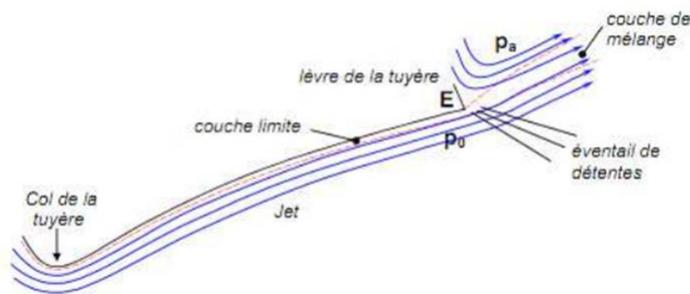


Figure (III, 9) Régime de la tuyère en sous-détente.

III. 4.2 Régime de sur-détente :

Ce deuxième type de régime hors d'adaptation correspond à des valeurs de pression au niveau de la lèvre inférieures à celle de la pression ambiante. La compatibilité de pression en sortie est assurée donc par une onde de choc oblique d'intensité $\frac{P_1}{P_0}$ voisin de $\frac{P_a}{P_0}$ conduisant ainsi à un gradient de pression adverse qui va s'exercer sur la couche limite en augmentant son épaisseur via le sous couche subsonique.

III. 4.2.1 Sur-détente avec décollement naissant :

Dans un premier temps, le choc formé à la lèvre de la tuyère ne fait pas décoller la couche limite tant que l'intensité $\frac{P_1}{P_0}$ d'un gradient de pression adverse n'atteint pas la valeur critique au-delà de laquelle il y a décollement de la couche limite. Comme le montre la figure (III, 7), cette phase est caractérisée principalement par l'absence de point de décollement S. le gradient

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

de pression s'étale sur une certaine distance OE appelée (longueur d'interaction) mesurée à partir de l'origine O. le long de cette distance, la pression pariétale, évaluée depuis la pression statique P_0 non perturbée jusqu'à la pression $P_1 = P_a$ immédiatement en aval du choc est toujours sensiblement inférieure à la pression ambiante. Ce régime de sur détente dans lequel la tuyère ne subit qu'une amorce de décollement est qualifié de sur détente avec décollement naissant. [36]

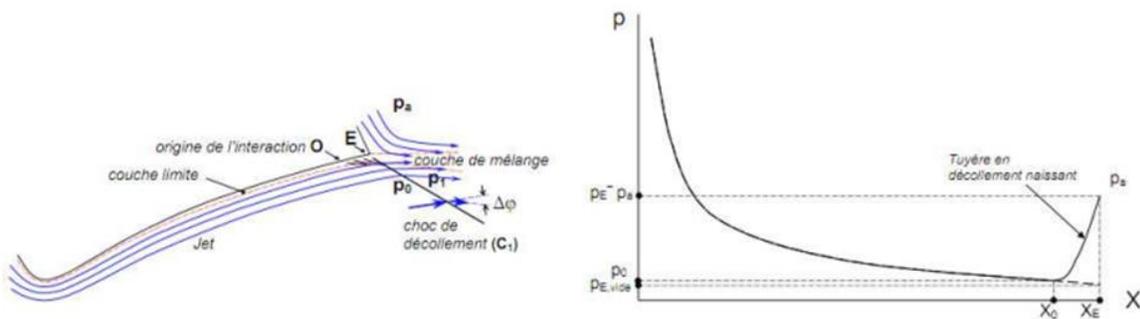


Figure (III, 10) : Lignes de courant et profil de pression du décollement naissant.

III. 4.2.2 Sur-détente avec décollement étendu :

Si la pression ambiante continue à augmenter au-delà d'une certaine valeur critique d'intensité de compression, le choc d'intensité $\frac{P_1}{P_0}$ fait décoller la couche limite de la paroi sur laquelle elle s'était développée bien en amont de la lèvre Figure (III, 8), le décollement ainsi créé se produit dans la région d'un point S situé à l'intérieur de la tuyère et entraîne une profonde modification de l'écoulement de la couche limite initiale. Au niveau du point de décollement S, il se produit une compression rapide de l'écoulement interne à la tuyère. Le choc de décollement C1 fait dévier l'écoulement d'un angle $\Delta\theta$. De plus, le régime de sur détente avec décollement va modifier la poussée de la tuyère et ces performances. On note aussi que cette poussée dépend de la position du point S et du saut de pression accompagné à travers le choc de décollement dont la

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

prédiction de sa valeur critique de compression est un enjeu important pour les motoristes puisque ceux-ci souhaitent souvent éviter ou maîtriser le décrolement. Les critères de décrolement ont pour objectif d'estimer cette valeur critique, qui est pratiquement se situe dans

la plage $\frac{P_a}{P_0} \approx 0,4 - 0,8$. [36]

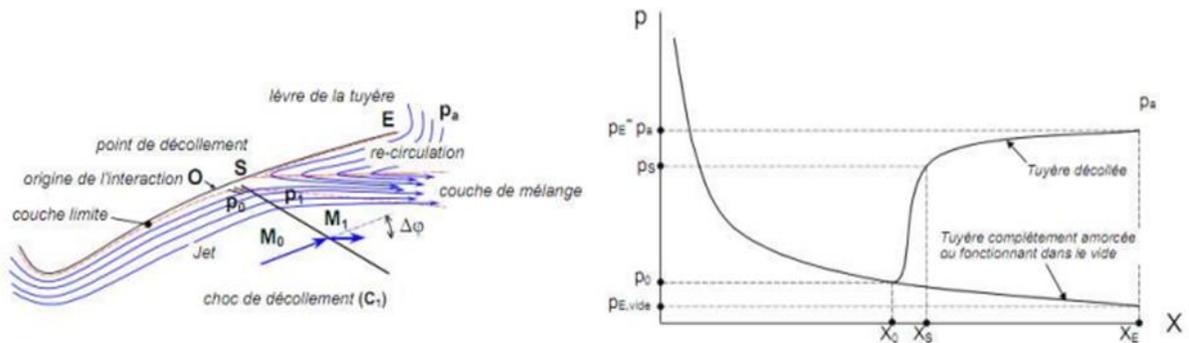


Figure (III, 11): lignes de courant et profile de pression du décrolement étendu.

III. 5 LES PARAMETRES DES PERFORMANCES:

III. 5.1 La force de poussée :

En théorie monodimensionnelle, la force de poussée c'est la différence entre deux pressions amont et aval, dépend aussi à la vitesse d'éjection des gaz brûlés par la chambre de combustion.

$$F = \dot{M} V_e + (P_e - P_0) \times A \quad \text{(III, 9)}$$

Equation : la poussée

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

Avec :

F : c'est la force de poussée en N

\dot{M} : Le débit massique en Kg/s

V_e : La vitesse d'éjection en m/s

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

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

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

III.5.2 Coefficient de poussée :

C'est le rapport de la poussée F au produit de la pression totale P_t par l'aire de la section au col A_e . Les critères pratiques de performance sont reliés à la poussée.

$$C_f = \frac{F}{P_t A_e} \quad (\text{III, 10})$$

Equation : coefficient de la poussée

III. 5.3 Vitesse effective :

C'est la vitesse de sortie de la tuyère adaptée, c'est le rapport de la force de poussée au débit massique.

$$V_{eff} = \frac{F}{\dot{M}} \quad (\text{III, 11})$$

Equation: la vitesse effective.

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

III-5-4 Impulsion spécifique :

L'impulsion spécifique est une grandeur utilisée pour mesurer l'efficacité de moteurs à réaction et des moteurs-fusées. C'est le Rapport de la poussée délivrée par un moteur fusée, exprimée en newton, par le débit multiplié par le poids de propergol éjecté et s'exprime en unités de temps.

$$I_s = \frac{F}{\dot{M} g} \quad (\text{III, 12})$$

Equation: L'impulsion spécifique

III-5-5 Coefficient de décharge :

C'est le rapport du débit actuel réel au le débit isentropique.

$$Cd = \frac{\text{le débit actuel réel}}{\text{le débit isentropique}} \quad (\text{III, 13})$$

Equation : Coefficient de décharge

III. 5.6 Consommation spécifique :

C'est l'inverse de l'impulsion spécifique, on a donc:

$$C_s = \frac{W_P}{F} \quad (\text{III, 14})$$

Equation: Consommation spécifique

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques .

Avec:

W_p : Poids total du propergol en Newton

F : la force de poussée

III. 5.7 La vitesse caractéristique :

C'est un paramètre fréquemment utilisé pour caractériser les performances d'un propulseur-fusée. Par définition, il est donné par:

$$q = \frac{q_{eff}}{C_f} \quad (\text{III, 15})$$

Equation : vitesse caractéristique

Avec :

C_f : Coefficient de la poussée

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

III. 5.8 Coefficient de débit :

La consommation de propergols en Kg/s peut s'exprimer en fonction de P_{tch} (pression totale dans la chambre de combustion) et A_c (section au col) :

$$D = C_d P_{tch} A_c \quad (\text{III, 16})$$

Equation : Coefficient de débit

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

Avec :

C_d : est déterminé expérimentalement pour une combinaison de propergols en fonction de la pression de la chambre de combustion

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

A_c : Section au col

III.6 EFFET DES VARIATIONS DE SECTION SUR L'ÉCOULEMENT :

La relation de d'Hugoniot exprime la variation de la vitesse de fluide le long de la tuyère pour deux régimes d'écoulements en absence de frottement.

$$\frac{dA}{A} = (M_a^2 - 1) \frac{dV}{V} \quad (\text{III, 17})$$

Avec :

A : Section de la tuyère

V : vitesse de l'écoulement

M_a : Nombre de Mach

Pour $M < 1$, l'écoulement sera en régime subsonique. La section de la tuyère varie en sens inverse de la vitesse, c'est à dire si la section diminue, la vitesse augmente et vice versa.

Pour l'écoulement supersonique où le nombre de Mach supérieur à 1, la vitesse de l'écoulement varie dans le même sens que la section.

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

Dans le cas où le nombre de Mach égale à 1, la conduite présente un minimum ou un maximum de section seul le minimum convient. [37]

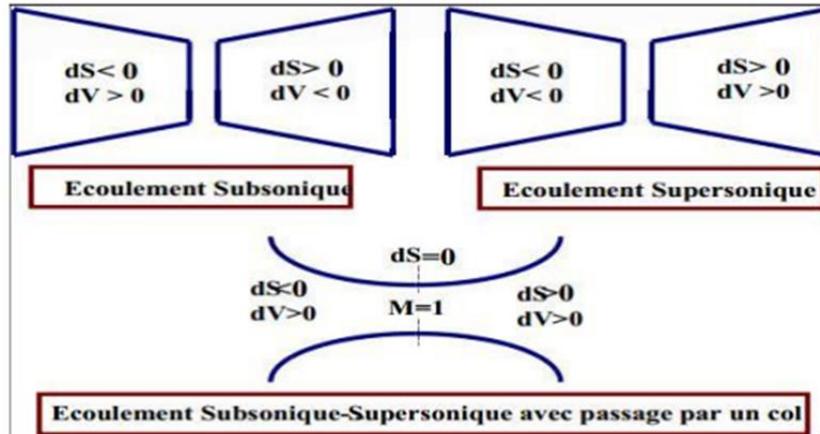


Figure (III, 12): Effet de variation de section sur le régime de l'écoulement.

III.7 ECOULEMENT MONODIMENSIONNEL DANS UNE TUYERE:

Pour un écoulement monodimensionnel, les calculs se font à la base des hypothèses, ces hypothèses ne sont pas exactement vérifiées, il suit la théorie qui permet d'obtenir une bonne approximation des valeurs moyennes des variables pour la résolution du problème de l'écoulement. Concernant les hypothèses on suppose que :

- Les effets de la viscosité sont négligeables.
- La gravité et les forces de volume sont négligeables.
- Il n'y a pas d'échange de chaleur avec le milieu ambiant.
- Il n'y a pas de réaction chimique.

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques .

La résolution du problème de l'écoulement consiste à résoudre les équations de conservation de la masse, de l'énergie et de quantité de mouvement.

III. 7.1 Equations fondamentales : [37]

III. 7 .1.1 L'équation de continuité :

L'équation de la continuité traduit le principe de conservation de la masse. Pour un mouvement conservatif et permanent, elle est donnée par :

$$\mathbf{div}(\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (\text{III, 18})$$

III. 7.1.2 L'équation de la quantité de mouvement :

L'équation de la quantité de mouvement pour un fluide parfait en écoulement permanent, et les forces de volumes négligeables, elle est donnée par :

$$dP + \rho V dV = 0 \quad (\text{III, 19})$$

III. 7.1.3 L'équation de l'énergie :

En négligeant les forces extérieures, pour un écoulement permanent d'un gaz parfait, l'équation de l'énergie s'écrit :

$$h + \frac{v^2}{2} = Cste \quad (\text{III, 20})$$

Avec :

$$h = C_p T \quad (\text{III, 21})$$

III. 8 LES ECOULEMENTS A HAUTE TEMPERATURE :

Les écoulements à haute température présentent des défis spécifiques en termes de conception, de matériaux résistants à la chaleur, de transfert de chaleur, de turbulence et de contrôle des émissions. Ces écoulements se produisent lorsque la température du fluide est considérablement élevée, ce qui peut entraîner des comportements et des phénomènes spécifiques. La modélisation et la simulation numérique sont souvent utilisées pour étudier et optimiser ces écoulements à haute température afin d'améliorer les performances et l'efficacité des tuyères supersoniques. Ces écoulements peuvent être rencontrés dans de nombreux domaines, tels que l'industrie, l'aéronautique, l'énergie, etc.

La modélisation et l'analyse des écoulements à haute température sont complexes et requièrent souvent l'utilisation de techniques numériques avancées, telles que la mécanique des fluides computationnelle (CFD), couplées à des modèles thermiques et chimiques appropriés. Ces outils permettent de simuler et d'étudier le comportement des écoulements haute température, ce qui est essentiel pour le développement des conceptions des tuyères supersoniques.

Les écoulements à haute température sont souvent associés à des transferts de chaleur importants. La conduction thermique, la convection et le rayonnement thermique sont des mécanismes de transfert de chaleur qui peuvent jouer un rôle essentiel dans ces écoulements. Les variations de température peuvent entraîner des gradients de température importants à travers les écoulements, ce qui peut générer des forces thermiques et des contraintes thermiques. Ces effets peuvent être pris en compte dans la modélisation de la dynamique des fluides à haute température.

Dans les moteurs à combustion interne, tels que les moteurs d'avions, les gaz d'échappement chauds circulent à des températures élevées. Ces écoulements sont caractérisés

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques .

par des vitesses élevées et des gradients de température importants. Les écoulements dans ces réacteurs peuvent être turbulents et entraîner des transferts de chaleur importants.

Les écoulements dans les tuyères supersoniques sont des écoulements à haute température.

Le problème de l'écoulement dans les tuyères supersoniques consiste à résoudre simultanément les équations de conservation, tel que l'équation de conservation de masse ou dite de continuité, les équations de conservation de la quantité de mouvement ou les équations de Navier Stocks et aussi l'équation de conservation de l'énergie. Ces équations sont des équations différentielles aux dérivées partielles dont la résolution est relativement très difficile par manque de conditions aux limites qui garantissent l'unicité de la solution. Dans notre cas, la limite c'est la paroi qui est elle-même non définie ou inconnue, pour cela le recours à des hypothèses simplificatrices est quasiment obligatoire. [38]

III. 8.1 hypothèses fondamentales :

La résolution directe du problème de l'écoulement dans les tuyères supersoniques, consiste en principe, à résoudre les équations de base décrivant l'écoulement à savoir l'équation de continuité, les équations de la dynamique et de l'énergie. Ce sont des équations différentielles aux dérivées partielles dont la résolution n'est pas connue car on ne connaît pas à priori les conditions aux limites, étant donné que le profil de la tuyère est lui-même inconnu et recherché. Il est évident qu'on doit émettre, pour rendre le problème plus abordable, certaines hypothèses plus ou moins simplificatrices concernant les propriétés du gaz s'écoulant dans la tuyère et ensuite sur l'écoulement lui-même. A ce titre, on a considéré les hypothèses suivantes[39]:

- L'écoulement est considéré comme étant entièrement établi et stationnaire (les dérivées par rapport au temps sont nulles).
- Les forces à distances, telle que, l'effet de la pesanteur et les interactions entre les particules de fluide sont négligées et les forces extérieures de source électrique et magnétique sont absentes.

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques .

- Le gaz utilisé est considéré comme parfait. Cependant, le volume occupé par les molécules du gaz est supposé nul, ce qui implique que l'effet de la viscosité est négligé.
- Le gaz est considéré comme étant thermiquement parfait. Le seuil de dissociation des molécules n'est pas encore atteint, c'est-à-dire que nous travaillons avec des molécules et non pas avec des atomes.
- Le gaz est calorifiquement imparfait, c'est-à-dire que ses propriétés calorifiques telles que C_p et γ sont considérées comme variables dépendant uniquement de la température lorsque cette dernière croît.
- L'écoulement est entièrement isentropique. Cette propriété est expliquée par l'absence de dissipation causée par la naissance des ondes de choc.
- L'écoulement est idéal, le transfert de chaleur par conduction entre les différentes particules de gaz est négligé.
- L'écoulement est irrotationnel. Cette hypothèse est vérifiée tant que l'entropie est invariable.
- Le transfert de chaleur forcé par convection ou rayonnement avec la paroi de la tuyère est absent. [39]

Les résultats obtenus pour l'écoulement d'un gaz parfait, considère que ce dernier est calorifiquement parfait, c'est à dire que les chaleurs spécifiques C_p et C_v sont constantes et donc ne dépendent pas de la température quelque soit sa valeur, ce qui n'est pas le cas réellement lorsque la température croît. Ceci est justifiable vu les variations importantes de ses propriétés avec la température surtout au-delà de 1000°K , domaine d'utilisation des tuyères supersoniques. Le gaz parfait dans ce cas est nommé en plus gaz calorifiquement imparfait ou gaz à haute température et thermiquement parfait [39].

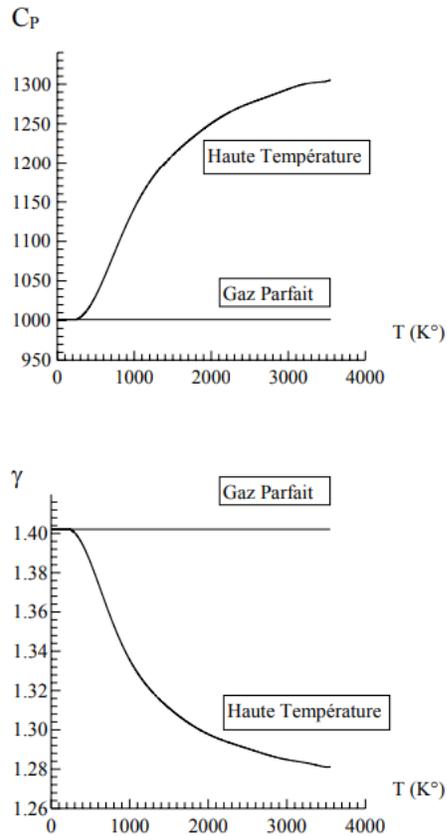


Figure (III, 13): Variation de C_p et γ avec la température [39]

III. 8.2 Les équations gouvernantes : [38]

III. 8.2.1 Equation d'état :

En plus des lois de conservation, il est important de connaître les équations d'état du fluide. Pour un fluide parfait, ces équations prennent leurs formes algébriques les plus simples suivantes :

$$P = \rho RT \quad (\text{III, 5})$$

Et

$$h = C_p t \quad (\text{III, 21})$$

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

Pour un écoulement isentropique la vitesse V et la pression P sont reliées par la relation de Bernoulli donnée par l'équation (III, 22) :

$$\int \frac{dP}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \text{cst} \quad \text{Le long d'une ligne de courant} \quad (\text{III, 22})$$

III. 8.2.2 Equation de conservation de la masse :

- Forme différentielle conservative

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (\text{III, 23})$$

- Forme différentielle Lagrangienne

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot V \quad (\text{III, 24})$$

III. 8.2.3 Equation de conservation de la quantité de mouvement :

- Forme intégrale lagrangienne

$$\frac{d}{dt} \int \rho V dV = - \int p n ds + \int \tau \cdot n ds + \int \rho F dV \quad (\text{III, 25})$$

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

- Forme intégrale eulérienne

$$\int \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} dV = - \int \rho V V \cdot n ds - \int p n ds + \int \tau \cdot n ds + \int \rho F dV \quad (\text{III, 26})$$

- Forme différentielle conservative

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = \nabla \cdot T + \rho F \quad (\text{III, 27})$$

Avec :

T : Tenseur des contraintes de Cauchy

F: Force appliquée à l'unité de masse

- Forme différentielle Lagrangienne- loi de Newton

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho F \quad (\text{III, 28})$$

III. 8.2.4 Equation de l'énergie :

- Forme différentielle conservative :

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E V) = \rho F \cdot V - \nabla \cdot (\tau \cdot V) - \nabla \cdot q \quad (\text{III, 29})$$

Chapitre III : Fonctionnement des tuyères supersoniques

- Forme différentielle Lagrangienne :

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \rho F \cdot V - \nabla \cdot (\rho V) + \nabla \cdot (\tau \cdot V) - \nabla \cdot q \quad (\text{III, 30})$$

CONCLUSION :

Il est nécessaire d'avoir des connaissances et des généralités sur les principaux paramètres de performances des tuyères supersonique ainsi que leurs plages de fonctionnement. Cela permettant de bien comprendre et analyser les écoulements à l'intérieur de la tuyère en basant sur la théorie quasi dimensionnelle où les résultats sont suffisants pour une large variété des problèmes d'ingénierie.

CHAPITRE IV

APPLICATION SUR LES TUYÈRES ET LES RÉSULTATS

IV. 1 INTRODUCTION :

La simulation numérique de la dynamique des fluides désignée par le terme anglais CFD (Computational Fluid Dynamics) est un outil plus important et indispensable dans les sciences et la recherche scientifique, il consiste à étudier et analyser les comportements des écoulements et leurs effets pour optimiser les performances. Parmi les codes de calcul de l'écoulement connus on peut citer par exemple : **Ansys, CFX, Fluent, Openfoam, ...**

En général, la simulation numérique est un moyen le plus efficace qui nous permet d'explorer des solutions inconnues pour prévoir des comportements inattendus, aident les ingénieurs à développer leurs produits, à optimiser leur conception et à réduire leurs risques et les coûts. Cette approche permet l'accès à toutes les paramètres instantanées tels que la pression, la température et la vitesse... cela pour chaque point du domaine de calcul.

Le CFD fournit les outils pour modéliser les fondamentaux des analyses d'écoulements de fluide, notamment : Ecoulements internes et externes, Ecoulements incompressibles et compressibles, Ecoulements laminaires et turbulents, Ecoulements monophasiques et multiphasiques, Ecoulements en milieu libre.

Pour les écoulements internes ou les écoulements externes, en régime laminaire ou turbulent sont décrit par le système d'équations aux dérivées partielles (EDP) non linéaire qu'on se doit de résoudre. Pour tous les phénomènes physiques sont régis par ce système formé d'équation : de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie totale. Parmi les phénomènes qui rendent la résolution du système difficiles c'est le décollement de la couche limite et la création des ondes de choc, donc il reste cependant difficile de résoudre un problème par une approximation de la solution à travers des méthodes numériques c'est pour ça en utilisant les moyens informatiques qui jouent un rôle très important pour avoir des bons résultats en tenant compte la turbulence et la viscosité.

L'écoulement dans les tuyères supersonique implique l'existence des phénomènes physiques notable très complexe peuvent influencer directement sur les performances et le rendement de la tuyère. L'étude des écoulements internes dans les tuyères supersoniques est très intéressante suivant la complexité de modéliser cet écoulement qui fait le passage du régime subsonique au régime supersonique qui crée des effets de compressibilité considérable.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

Les écoulements étudiés s'effectuent dans des domaines limités par la paroi de la tuyère donc il est nécessaire de préciser le type de conditions aux limites : l'entrée de domaine et la sortie, les conditions de symétrie et les conditions aux parois solides.

Le modèle de calcul Ansys est un outil qui permet la conception et la création des géométries, qu'ils soient 2D ou 3D et appliquer des simulations. Il permet de construire des surfaces et des volumes à partir d'une série des points définissant la géométrie de base.

Une fois la géométrie construite, elle peut être exportée en différents formats vers le générateur de maillage et les solveurs pour faire les analyses ou les simulations. L'Ansys est un logiciel de génie mécanique qui collabore avec différents types de logiciels utilisés dans différents domaines tels que : Mécanique des fluides, Vibrations, Aérodynamique, et le transfert de chaleur...etc.

IV. 2 PRESENTATION DE FLUENT :

Fluent est un logiciel de calcul d'écoulement très utilisé dans l'industrie qui simule tous les écoulements fluides, qu'ils soient compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que le transfert thermique et les réactions chimiques. Ce code de calcul utilise la méthode des volumes finis comme procédé de discrétisation.

Fluent est composé de trois éléments principaux :

- **Préprocesseur** : permet de faire la configuration de la géométrie et générer le maillage.
- **Le solveur** : permet de définir les conditions aux limites et effectue la résolution numérique des équations du mouvement.
- **Le poste** : Fluent offre la possibilité de visualiser la géométrie et le maillage, aussi afficher les résultats obtenus et tracer des courbes de certaines variables tels que la pression, la température et le nombre de Mach.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

L'objectif de la présente étude est de donner un aperçu général sur le comportement physique d'écoulement compressible à haute température dans une tuyère a double galbe, Le fluide utilisé est un gaz supposé parfait. Cette étude est effectuée par une simulation numérique pour le cas 2D et 3D en utilisant le logiciel FLUENT. Les résultats des simulations numériques présentées sous forme des courbes et des contours montrent clairement les phénomènes qui découlent de cet écoulement.

IV. 3 APPLICATION SUR UNE TUYERE DOUBBLE GALBE :

IV. 3.1 : La simulation axisymétrique d'un écoulement dans une tuyère double galbe :

IV.3.1.1 : Création de la géométrie:

La création de la géométrie se fait en insérant les coordonnées du profil de la tuyère dans le Design Modeler pour crée le corps surfacique de la tuyère la figure (4, 1).

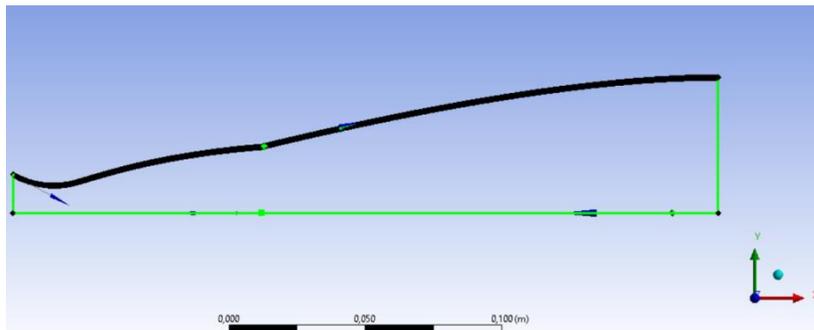
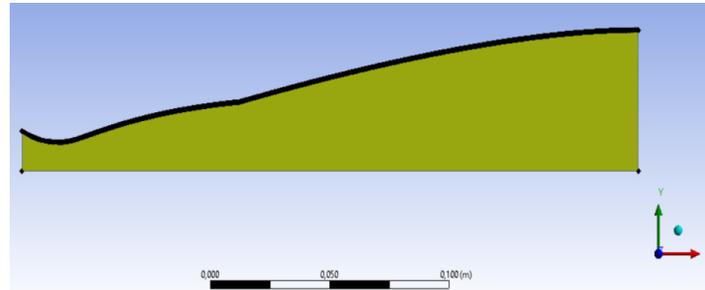


Figure (IV, 1) : Création du profil de la tuyère par le Design Modeler

Après avoir créé le profil de la tuyère on génère le corps surfacique avec le Design Modeler.



La figure (IV, 2) : Génération du corps surfacique Avec le Design Modeler

IV. 3.1.2 : Maillage de la géométrie :

Plusieurs grilles de maillage sont utilisées pour étudier l'indépendance des résultats du maillage, ces maillages sont raffinés pour avoir des bons résultats. Le raffinement du maillage est nécessaire surtout dans les zones de haute pression (le col) et proche a la paroi où les propriétés locales de l'écoulement varient rapidement, le maillage utilisé est rectangulaire structuré contient 11601 nœuds et 10512 éléments.

On doit Nommer la sélection des Arêtes : **inlet ,outlet, Base, Jet, Axis**



Figure (IV, 3): Création de Sélection Nommés

On possède à la génération du maillage étape par étape et choisir la taille des éléments.

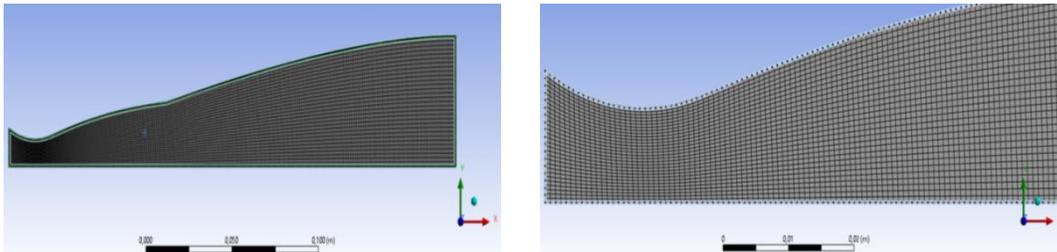


Figure (IV, 4) : Maillage rectangulaire structure sur MESHING

Lorsque le maillage est généré, on ferme le MESHING et on ouvre le Fluent.

IV. 3.1.3 : La résolution par FLUENT :

Cette étape est réalisée par le Solveur Fluent. Ce dernier fournit de bons résultats pour les simulations des écoulements internes.

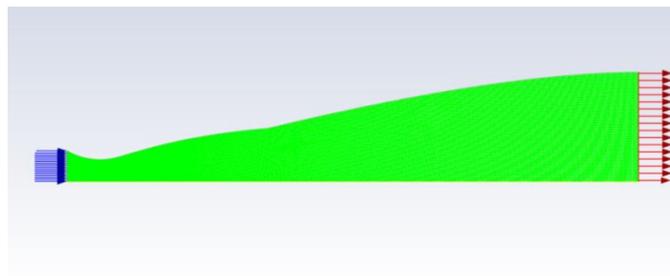


Figure (IV, 5) Maillage structuré sur Fluent.

Après avoir vérifié la qualité de maillage et choisir notre modèle de calcul et le type de matériaux, on fait entrer les conditions aux limites à l'aide de la fonction Boundary Layer Conditions.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

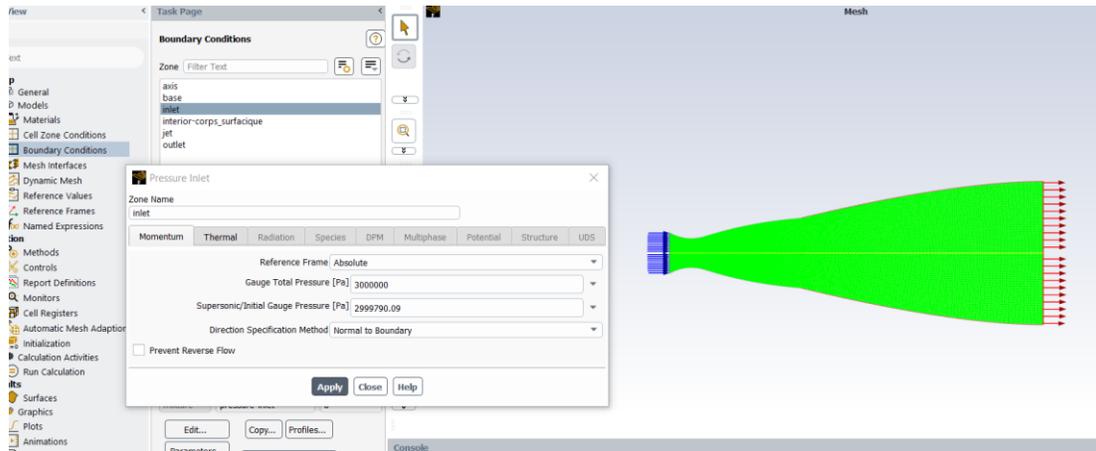


Figure (IV, 6) : Conditions aux limites sur Fluent.

Après avoir choisis la méthode de calcul et le nombre d'itération on lance le calcul à l'aide de la fonction RunCalculation.

Les résultats obtenus sont présentés pour un écoulement interne dans une tuyère simple. La figure suivante représente le graphe des résiduelle pour le cas traité.

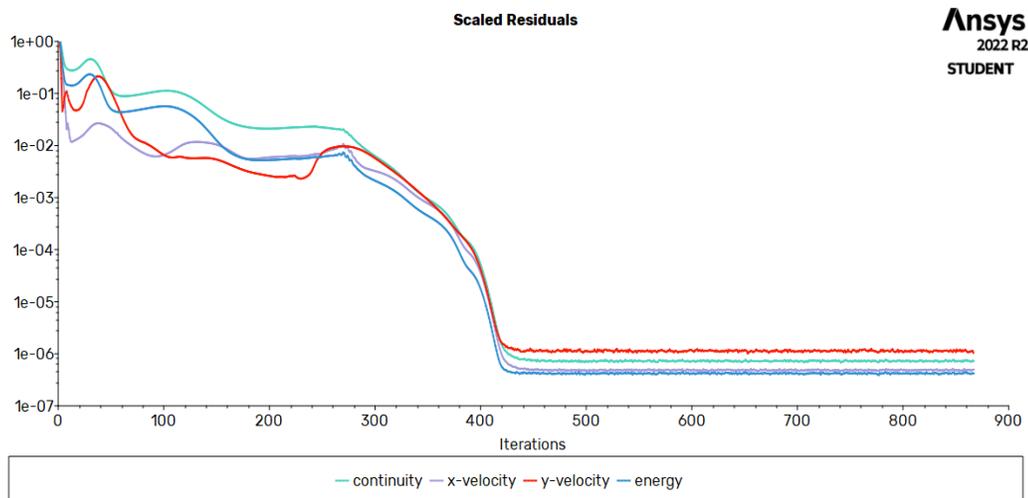


Figure (IV, 7) : le graphe des résiduelle de notre simulation

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

Cette figure montre que tous les résidus diminuent d'une manière continue donc toutes les solutions sont convergées.

Après avoir la convergence, on procède à la visualisation des variables de l'écoulement sous forme des graphes ou bien d'un champ (contour).

IV. 3.1.4 : Les résultats et interprétations :

Les conditions aux limites définissent les comportements physiques et les interactions aux frontières du système dans le cadre de la simulation axisymétrique du premier cas. Elles garantissent la cohérence et la stabilité de la modélisation en tenant compte des propriétés symétriques du système étudié. Le tableau présenté ci-dessous détaille les conditions aux limites appliquées à notre simulation pour le premier cas, caractérisé par une symétrie axiale

Modèle	2D, Axisymétrique, permanent
Solveur	couplé, implicite
Fluide	Air, loi des gaz Parfaits
Conditions aux limites à l'entrée	Pression d'entrée $\begin{cases} P_o = 3000000 Pa \\ P_s = 2999790.09 Pa \\ T_t = 300k \end{cases}$
Conditions aux limites à la sortie	Pression de sortie $\begin{cases} P_s = 2200 Pa \\ T_t = 45k \end{cases}$
Parois	Wall (paroi adiabatique)

Tableau (IV, 1) : les conditions aux limites pour notre simulation

➤ Le nombre de Mach

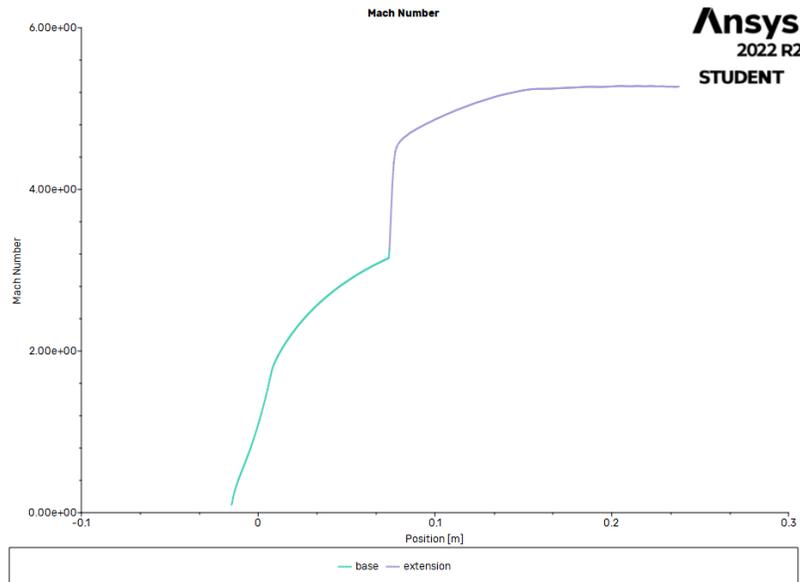


Figure (IV, 8) : Evolution de la courbe du Nombre de Mach dans la tuyère axisymétrique.

La Figure (IV, 8) illustre graphiquement la variation du nombre de Mach le long de la paroi de la tuyère. À partir de cette courbe, nous pouvons observer plusieurs caractéristiques significatives. Tout d'abord, le nombre de Mach évolue rapidement au niveau du col de la tuyère, ainsi que dans la zone d'expansion initiale. En revanche, la variation devient plus lente dans la partie divergente de la tuyère.

Cette évolution met en évidence un fait important : dans un écoulement supersonique, la vitesse est proportionnelle à la section transversale. Cette relation est confirmée par la manière dont le nombre de Mach varie le long de la paroi de la tuyère.

Il est intéressant de noter que le nombre de Mach atteint une valeur de 5,4 à la sortie de la tuyère. Cette valeur est obtenue en supposant un écoulement non visqueux, ce qui signifie qu'aucun frottement n'est pris en compte. Dans ce contexte, le nombre de Mach élevé à la sortie de la tuyère démontre l'accélération significative du flux d'air, résultant de la géométrie et de la conception de la tuyère elle-même.

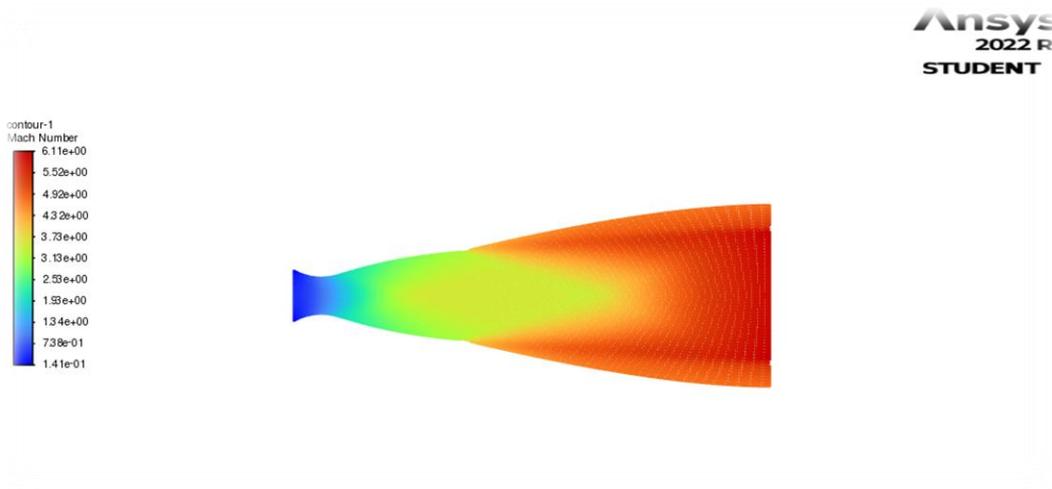


Figure (IV, 9) : Contour d'évolution du nombre de Mach dans la tuyère axisymétrique.

La Figure (IV, 9) met en évidence l'évolution du contour du nombre de Mach avec des couleurs allant du bleu au rouge. Cette variation de couleur reflète une augmentation progressive du nombre de Mach le long du contour étudié. Il est important de souligner que cette évolution se produit sans perte de vitesse au niveau de la paroi. Cette caractéristique est attribuée à l'application de la condition de glissement sur la paroi, qui suppose un écoulement non visqueux.

En effet, en prenant en compte la condition de glissement, nous excluons les effets de la viscosité et du frottement sur la paroi. Cela signifie que le fluide ne subit aucune résistance à la paroi, ce qui lui permet de conserver sa vitesse sans diminution significative. Par conséquent, le contour du nombre de Mach évolue de manière croissante sans aucune perte de vitesse près de la paroi.

Cette observation est particulièrement importante dans l'analyse des écoulements compressibles, car elle met en évidence la capacité du fluide à maintenir une vitesse élevée le long de la paroi, ce qui peut être avantageux dans certaines applications aérodynamiques.

➤ La pression

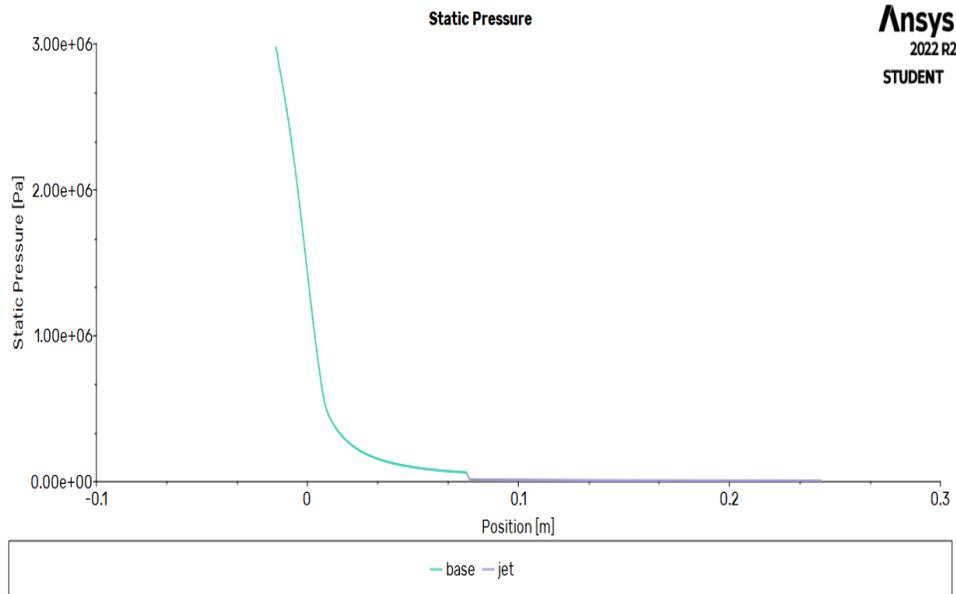


Figure (IV, 10) : Evolution de la pression statique dans la tuyère axisymétrique.

La Figure (IV, 10) présente la variation de la pression statique le long de la paroi de la tuyère. Une analyse attentive de cette courbe révèle plusieurs observations significatives. Initialement, on observe une diminution rapide de la pression statique, ce qui entraîne une augmentation correspondante du nombre de Mach. Cette diminution rapide est le résultat des caractéristiques de la géométrie de la tuyère et de l'accélération de l'écoulement.

Par la suite, la diminution de la pression statique se poursuit de manière relativement lente. Cette évolution plus graduelle peut être attribuée à plusieurs facteurs, tels que l'expansion progressive du flux d'air et la dissipation des ondes de choc à l'intérieur de la tuyère.

Il est important de noter que la diminution de la pression statique est une conséquence directe de l'augmentation du nombre de Mach. Lorsque le nombre de Mach augmente, cela indique que la vitesse de l'écoulement augmente également, ce qui entraîne une diminution de la pression statique conformément aux principes fondamentaux de la mécanique des fluides compressibles.

La courbe de la Figure (IV, 10) met donc en évidence la variation caractéristique de la pression statique le long de la paroi de la tuyère. Une diminution rapide initiale est suivie d'une diminution

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

plus lente, reflétant l'évolution de l'écoulement supersonique et l'impact de la géométrie de la tuyère sur les propriétés du fluide

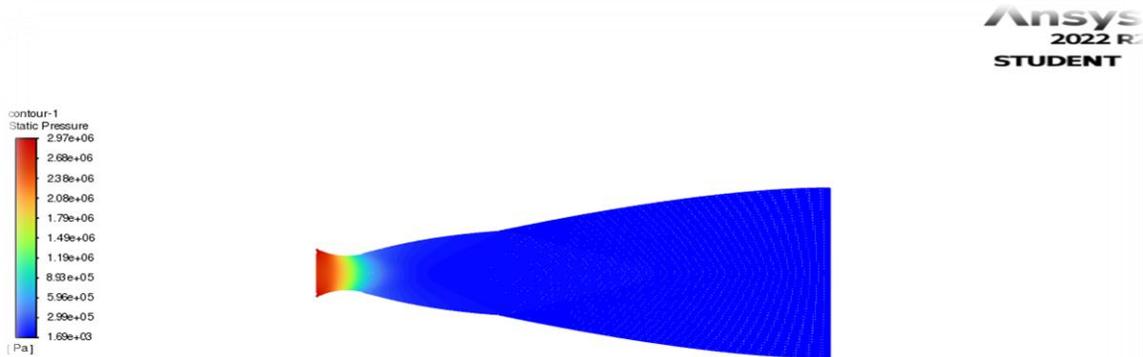


Figure (IV, 11) : Contour d'évolution de la pression statique de Mach dans la tuyère double galbe axisymétrique.

La Figure (IV, 11) fournit des informations essentielles sur l'évolution du contour de la pression statique le long de la tuyère. Cette représentation visuelle permet de mieux comprendre les variations de pression à travers la géométrie de la tuyère.

En observant attentivement cette figure, nous pouvons constater que le contour de la pression statique présente une évolution décroissante tout au long de la tuyère jusqu'à sa sortie. Cette diminution progressive de la pression est une caractéristique typique des écoulements compressibles et se produit en raison de l'accélération de l'écoulement à travers la tuyère.

Au fur et à mesure que le fluide s'écoule le long de la tuyère, la géométrie de celle-ci provoque une augmentation de la vitesse de l'écoulement, ce qui entraîne une diminution de la pression statique. Cette relation entre la vitesse et la pression est régie par les principes fondamentaux de la dynamique des fluides compressibles.

L'évolution décroissante du contour de la pression statique est également liée à l'effet de l'expansion de l'écoulement. En se déplaçant de la section d'entrée vers la sortie de la tuyère, le flux d'air s'élargit, ce qui entraîne une diminution de la densité du fluide. La diminution de la densité, combinée à l'augmentation de la vitesse, conduit à une baisse de la pression statique.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

Cette évolution décroissante du contour de la pression statique est essentielle pour comprendre les performances de la tuyère dans un écoulement compressible. Elle indique l'effet de la géométrie et de l'expansion de l'écoulement sur les propriétés du fluide, notamment la pression statique.

➤ La densité

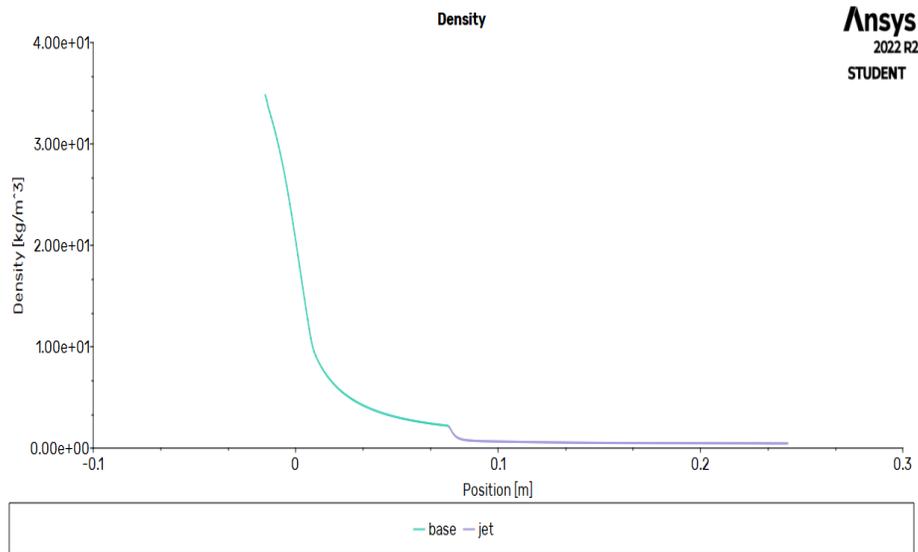


Figure (IV, 12) : Evolution de la densité dans la tuyère axisymétrique.

La Figure (IV, 12) fournit des informations essentielles sur la variation de la densité le long de la paroi de la tuyère. L'observation de cette figure permet de mieux comprendre comment la densité du fluide évolue à travers la géométrie de la tuyère.

En analysant attentivement la Figure (IV, 12), nous pouvons remarquer que la densité présente une évolution décroissante le long de la paroi de la tuyère, similaire à celle de la pression statique. Cette diminution progressive de la densité est une caractéristique typique des écoulements compressibles.

La variation décroissante de la densité est étroitement liée à l'augmentation de la vitesse de l'écoulement à travers la tuyère. En se déplaçant le long de la tuyère, la géométrie de celle-ci

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

provoque une accélération de l'écoulement, ce qui conduit à une diminution de la densité du fluide.

Cette diminution de la densité est directement influencée par l'effet de l'expansion de l'écoulement. À mesure que le flux d'air s'élargit dans la tuyère, la densité diminue en raison de l'augmentation de la section transversale. Ce phénomène est associé à la conservation de la masse : lorsque la section transversale s'élargit, la masse du fluide reste constante, ce qui se traduit par une diminution de la densité.

La variation décroissante de la densité le long de la paroi de la tuyère est importante à prendre en compte dans les écoulements compressibles, car elle a des implications directes sur d'autres paramètres, tels que la pression statique et la vitesse de l'écoulement.

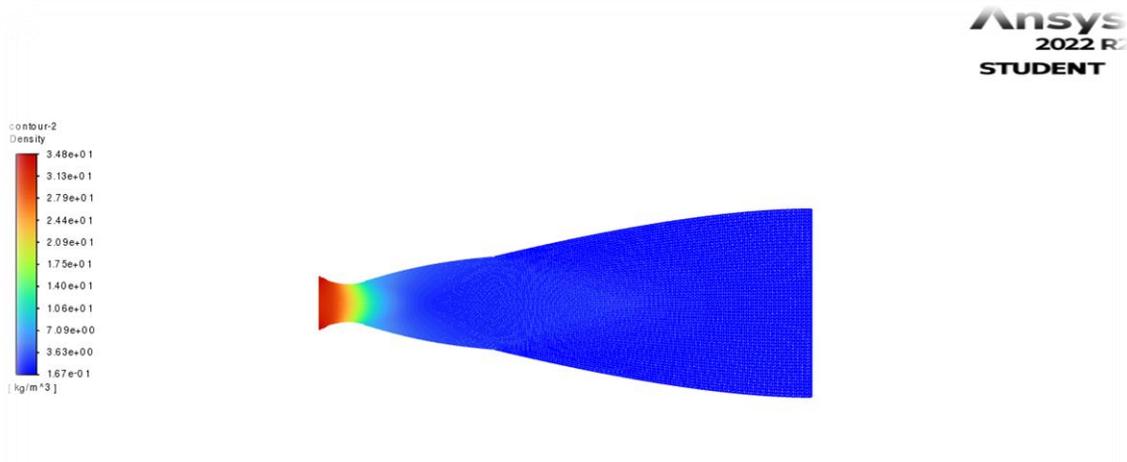


Figure (IV, 13) : Contour d'évolution de la densité dans la tuyère axisymétrique.

La Figure (IV, 13) offre une représentation visuelle précieuse de l'évolution du contour de la densité le long de la tuyère. L'analyse attentive de cette figure permet de mieux appréhender les variations de densité à travers la géométrie de la tuyère.

En observant de près cette figure, nous pouvons constater que le contour de la densité présente une évolution décroissante tout au long de la tuyère jusqu'à sa sortie, ce qui est similaire à l'évolution du contour de la pression statique. Cette diminution progressive de la densité est une caractéristique courante des écoulements compressibles.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

Cette évolution décroissante du contour de la densité est principalement attribuable à l'expansion de l'écoulement. À mesure que le flux d'air s'écoule le long de la tuyère, la géométrie de celle-ci provoque une augmentation de la section transversale, ce qui entraîne une diminution de la densité du fluide. Cette diminution de densité est liée à la conservation de la masse : lorsque la section transversale s'élargit, la masse du fluide se répartit sur une plus grande surface, ce qui entraîne une diminution de la densité.

La variation décroissante du contour de la densité est également influencée par l'accélération de l'écoulement à travers la tuyère. La vitesse croissante de l'écoulement est associée à une diminution de la densité selon les principes de la dynamique des fluides compressibles.

Il est important de noter que l'évolution décroissante du contour de la densité est cruciale pour comprendre les caractéristiques des écoulements compressibles et leur relation avec d'autres paramètres, tels que la pression statique, la vitesse de l'écoulement et la température.

➤ La température

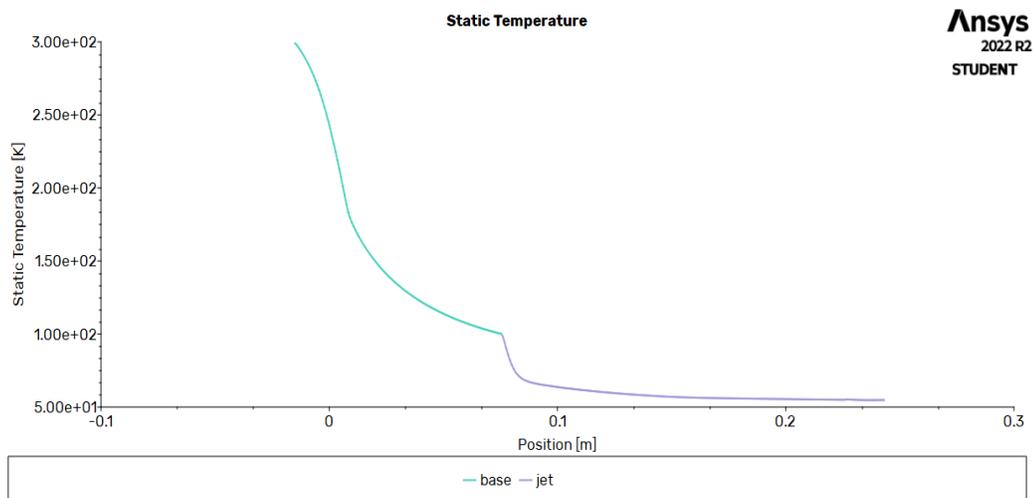


Figure (IV, 14) : Evolution de la température statique dans la tuyère axisymétrique.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

La Figure (IV, 14) fournit des informations précieuses sur l'évolution de la température statique le long de la paroi de la tuyère. L'observation attentive de cette figure permet de mieux comprendre les variations de température à travers la géométrie de la tuyère.

En examinant de près la Figure (IV, 14), nous constatons que la courbe de température statique présente une évolution décroissante tout au long de la tuyère, qui est presque similaire à celles de la densité et de la pression statique. Cette diminution progressive de la température est une caractéristique courante des écoulements compressibles.

L'évolution décroissante de la température statique est principalement influencée par l'expansion de l'écoulement à travers la tuyère. À mesure que le flux d'air s'élargit et se déplace le long de la tuyère, la géométrie de celle-ci entraîne une diminution de la température statique du fluide. Cette diminution est associée à l'effet de l'expansion adiabatique, où l'énergie thermique du fluide se disperse sur une plus grande surface, entraînant ainsi une baisse de la température.

L'accélération de l'écoulement à travers la tuyère est également un facteur contribuant à la diminution de la température statique. Lorsque l'écoulement s'accélère, il génère des forces d'entraînement qui extraient l'énergie thermique du fluide, provoquant ainsi une baisse de la température.

Il est important de noter que l'évolution décroissante de la température statique est essentielle pour comprendre les propriétés thermodynamiques de l'écoulement compressible. Elle est directement liée aux variations de densité, de pression statique et de vitesse de l'écoulement, et joue un rôle crucial dans la performance et la stabilité des systèmes de propulsion.

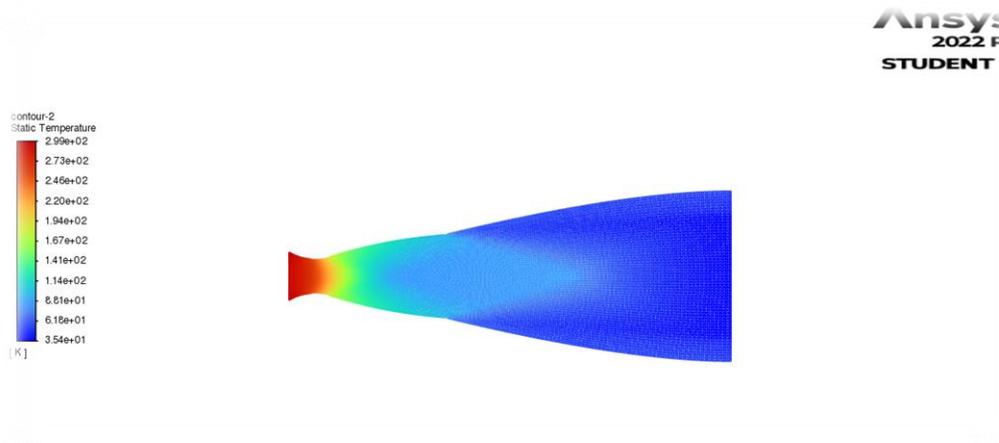


Figure (IV, 15) : Contour d'évolution de la température statique dans la tuyère axisymétrique.

La Figure (IV, 15) offre une représentation visuelle du contour de la température le long de la tuyère. Une observation attentive de cette figure permet de constater une similitude dans l'évolution entre la température statique et la pression statique. Cette relation étroite entre la température et la pression statique peut être attribuée au fait que la température dépend de manière significative de la pression statique dans les écoulements compressibles.

En examinant de près la Figure (IV, 15), nous pouvons remarquer que le contour de la température présente une évolution similaire à celui de la pression statique le long de la tuyère. Cela suggère une corrélation directe entre ces deux paramètres. Lorsque la pression statique diminue, la température a tendance à diminuer également.

La dépendance entre la température statique et la pression statique peut être expliquée par les lois de la thermodynamique des fluides compressibles. Selon ces lois, lorsque la pression d'un fluide diminue, son énergie thermique est convertie en énergie cinétique sous forme d'augmentation de la vitesse de l'écoulement. Cette conversion d'énergie entraîne une baisse de la température du fluide.

En d'autres termes, la diminution de la pression statique dans la tuyère conduit à une diminution de la température statique. Cette relation est cruciale pour comprendre les caractéristiques thermodynamiques des écoulements compressibles, en particulier dans le contexte des tuyères et des systèmes de propulsion.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

Il est important de souligner que la Figure (IV, 15) fournit une représentation graphique des variations de température le long de la tuyère, mettant en évidence la relation entre la température statique et la pression statique. Cette observation renforce notre compréhension des interactions thermodynamiques complexes qui se produisent dans les écoulements compressibles.

➤ Vitesses

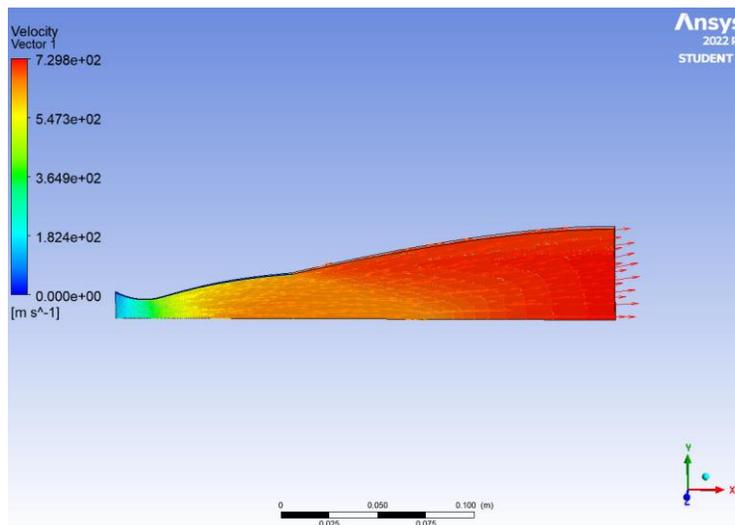


Figure (IV, 16) : les vecteurs des lignes de courant dans la tuyère double galbe.

La Figure ci-dessus, qui présente les vecteurs des lignes de courant dans la tuyère double galbe, nous offre un aperçu visuel des trajectoires du fluide à travers la géométrie de la tuyère. Une analyse attentive de cette figure permet de remarquer certains comportements caractéristiques des écoulements dans la tuyère double galbe.

En observant les vecteurs des lignes de courant, nous pouvons constater qu'ils adoptent la forme de la tuyère double galbe. Cela signifie que les trajectoires du fluide suivent le contour et la courbure de la tuyère, s'adaptant à sa géométrie spécifique. Cette conformité entre les vecteurs des lignes de courant et la forme de la tuyère est le résultat de l'interaction entre le flux d'air et les parois de la tuyère, qui guident le mouvement du fluide.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

En examinant la figure plus en détail, nous pouvons également observer que les vecteurs des lignes de courant deviennent plus uniformes à mesure que l'on se rapproche de la sortie de la tuyère. Cette uniformité des trajectoires du fluide à la sortie de la tuyère est due à l'effet d'expansion de l'écoulement. À mesure que le flux d'air s'élargit à la sortie de la tuyère, les lignes de courant se dispersent et se propagent de manière plus uniforme, formant un écoulement plus régulier et homogène.

Cette uniformité des vecteurs des lignes de courant à la sortie de la tuyère est importante pour assurer une distribution régulière du flux d'air, ce qui peut être bénéfique pour l'efficacité et la stabilité des systèmes utilisant cette tuyère. Une répartition uniforme du flux d'air peut contribuer à minimiser les perturbations et les turbulences, favorisant ainsi un écoulement plus lisse et un transfert d'énergie plus efficace.

IV. 3.2 : La simulation 3D d'un écoulement dans une tuyère double galbe :

IV. 3.2.1 : Création de la géométrie :

La Figure (IV, 17) illustre la géométrie que nous avons créée en suivant les étapes mentionnées précédemment.

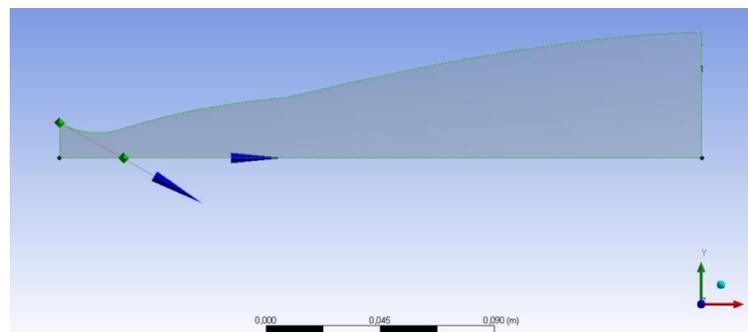


Figure (IV, 17) : le profil de la Tuyère double galbes.

La Figure (IV, 18) offre une visualisation de la géométrie après avoir effectué la révolution. Cette étape consiste à faire tourner une courbe de base autour d'un axe central pour créer une forme tridimensionnelle.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

En examinant attentivement la Figure (IV, 18), nous pouvons observer les caractéristiques de la géométrie résultant de cette opération de révolution. La courbe de base, qui peut être une ligne ou une section, est utilisée comme guide pour générer la forme complète de l'objet en rotation. Au fur et à mesure que la courbe de base est tournée autour de l'axe central, elle engendre une symétrie axiale et crée une forme tridimensionnelle.

La Figure (IV, 18) nous permet d'apprécier la complexité et les détails de la géométrie obtenue après la révolution. Elle peut représenter des objets tels que des cylindres, des cônes, des sphères ou d'autres formes en rotation. La nature précise de la géométrie dépend de la courbe de base utilisée et de la manière dont elle est tournée autour de l'axe central.

La révolution est une opération couramment utilisée dans la modélisation 3D et la conception assistée par ordinateur (CAO) pour créer des formes complexes et symétriques. Elle permet d'obtenir rapidement des objets de forme régulière et facilite la visualisation et la manipulation de la géométrie.

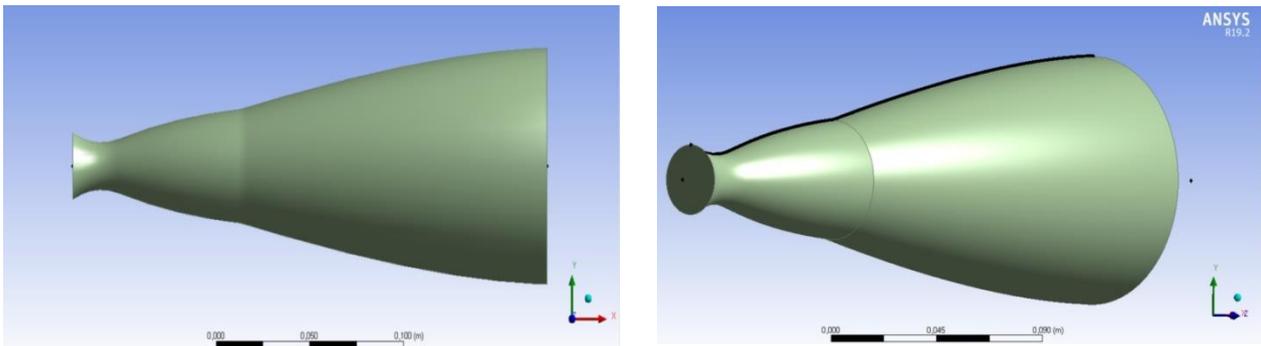


Figure (IV, 18) : la géométrie de La Tuyère double galbes 3D.

IV. 3.2.2 : Maillage de la géométrie :

Le maillage joue un rôle essentiel dans la simulation numérique, car il divise la géométrie en une série d'éléments finis ou de cellules, ce qui permet de résoudre les équations mathématiques pour obtenir une approximation du comportement du fluide. Dans notre cas, nous avons généré le maillage en suivant les étapes mentionnées précédemment et en choisissant la taille des éléments appropriée.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

Le maillage utilisé est un maillage rectangulaire structuré, ce qui signifie que les éléments sont disposés de manière régulière et organisée en une grille rectangulaire. Ce type de maillage est couramment utilisé car il facilite les calculs numériques et permet une résolution plus efficace des équations.

Le maillage rectangulaire structuré que nous avons créé pour notre géométrie comprend **69 513** nœuds, qui sont les points de calcul du maillage, et **66 822** éléments, qui sont les cellules qui délimitent la géométrie. Ces chiffres reflètent la complexité et la densité du maillage, et ils ont été déterminés en fonction des besoins spécifiques de la simulation.

La Figure (IV, 19) présente une visualisation du maillage rectangulaire structuré créé pour notre géométrie sur l'interface de MESHING. Cette figure permet de visualiser la distribution des nœuds et des éléments dans la grille, mettant en évidence la structure régulière et organisée du maillage.

En outre, pour faciliter l'identification et la manipulation des différentes parties de la géométrie, nous avons nommé des sélections spécifiques des arêtes. Ces sélections d'arêtes sont les suivantes : **Inlet**, **Base**, **Extension** et **Outlet**. Ces noms ont été attribués aux arêtes correspondantes pour permettre une référence et une utilisation faciles lors de la définition des conditions aux limites ou d'autres paramètres dans la simulation.

La sélection "**Inlet**" correspond aux arêtes d'entrée du domaine, "**Base**" aux arêtes de la base de la géométrie, "**Extension**" aux arêtes de la zone d'extension et "**Outlet**" aux arêtes de sortie du domaine. Ces noms permettent une meilleure compréhension et une meilleure gestion des différentes parties de la géométrie lors de la configuration de la simulation.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

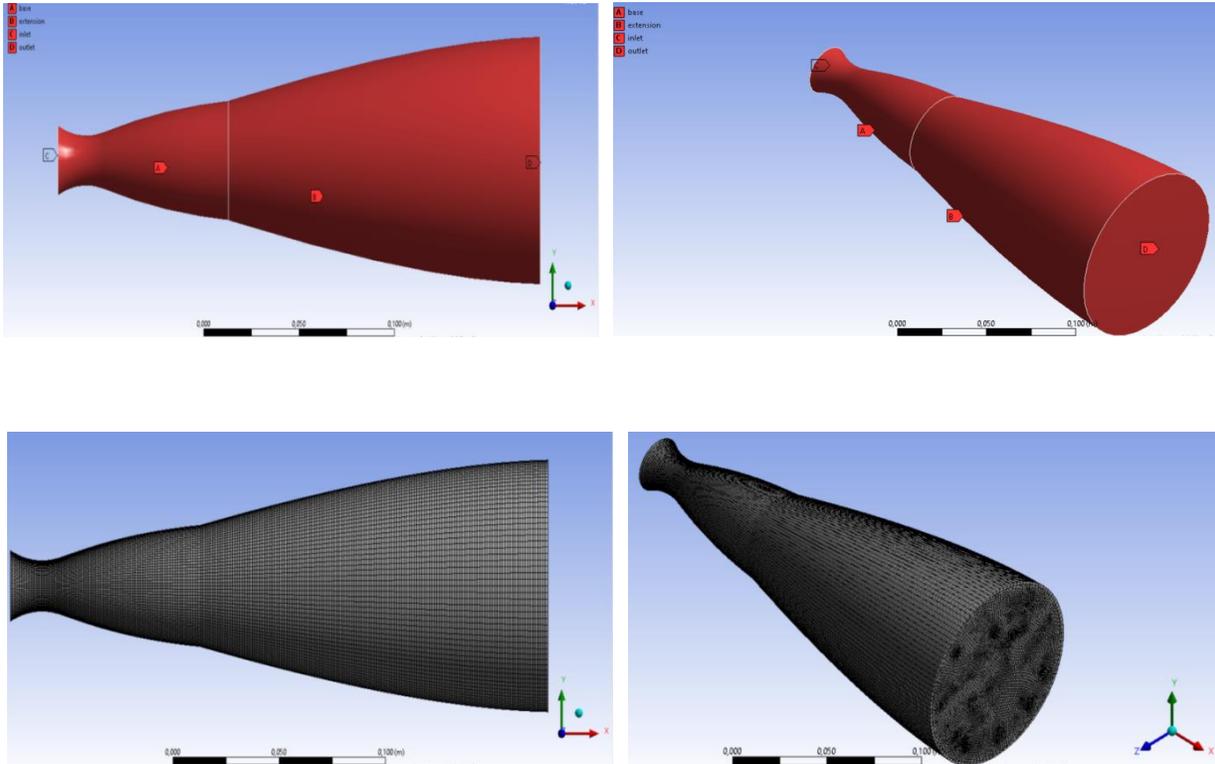


Figure (IV, 19) : Maillage rectangulaire structure sur MESHING.

Pour la phase de résolution, nous suivons exactement les mêmes étapes que pour la tuyère simple, en adaptant le processus aux spécificités de la tuyère double galbe.

Nous commençons par définir les équations de base qui régissent le comportement du fluide à l'intérieur de la tuyère double galbe. Ces équations peuvent inclure les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, selon les besoins de la simulation.

Ensuite, nous discrétisons les équations en utilisant des méthodes numériques appropriées, telles que la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis ou la méthode des volumes finis. Cela implique de subdiviser le domaine en une grille de cellules ou d'éléments, ce qui permet de représenter les équations sous forme discrète.

Nous utilisons ensuite les conditions aux limites appropriées pour modéliser les interactions entre le fluide et les parois de la tuyère. Cela peut inclure des conditions d'entrée pour représenter le

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

flux d'air entrant, des conditions de sortie pour décrire le comportement du fluide à la sortie de la tuyère, et d'autres conditions spécifiques en fonction des caractéristiques de l'écoulement.

Une fois les équations discrétisées et les conditions aux limites définies, nous procédons à la résolution numérique des équations. Cela peut être effectué à l'aide d'un solveur numérique approprié qui itère à travers la grille et résout les équations pour chaque cellule. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'une convergence satisfaisante soit atteinte, fournissant ainsi une solution approchée du comportement du fluide à l'intérieur de la tuyère double galbe.

Enfin, nous analysons les résultats obtenus à partir de la simulation, en examinant des grandeurs telles que le profil de vitesse, le champ de pression, les distributions de température, etc. Ces résultats nous permettent de comprendre le comportement de l'écoulement dans la tuyère double galbe et d'évaluer l'efficacité et les performances de la configuration étudiée.

IV. 3.2.3 : La résolution par FLUENT :

D'abord, on doit vérifier la qualité de maillage et choisir notre modèle de calcul.

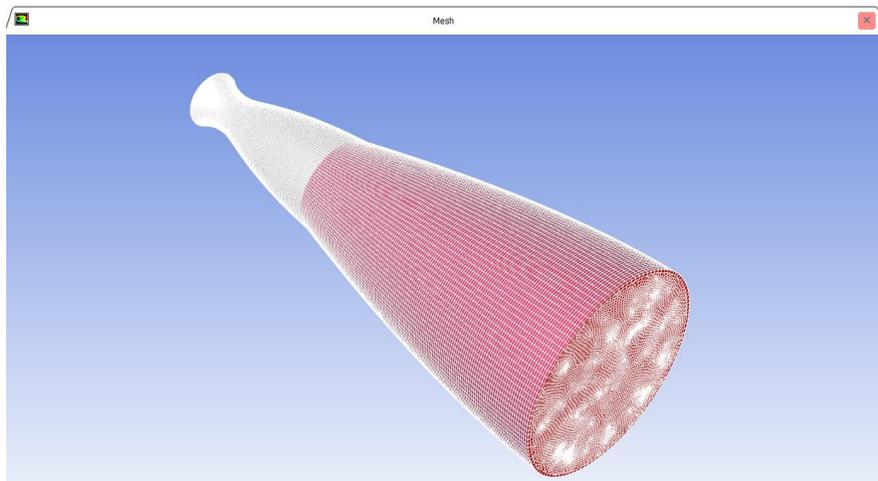


Figure (IV, 20) : Maillage structuré sur Fluent.

Ensuite on fait entrer les conditions aux limites à l'aide de la fonction Boundary Conditions.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

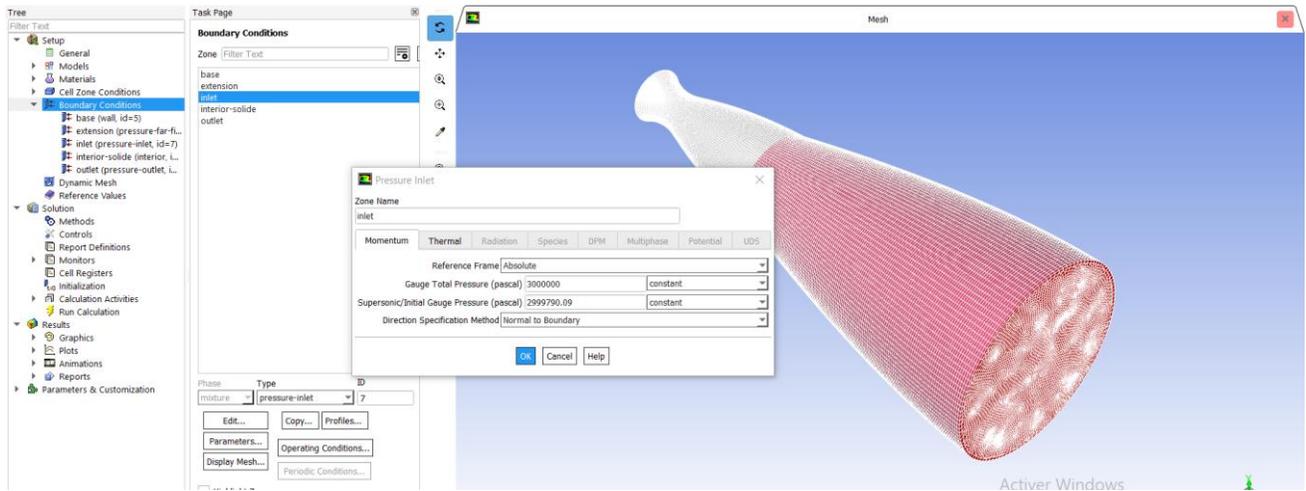


Figure (IV, 21) : Conditions aux limites sur Fluent.

Après avoir choisit la méthode de calcul et le nombre d'itération on lance le calcul l'aide de la fonction RunCalculation.

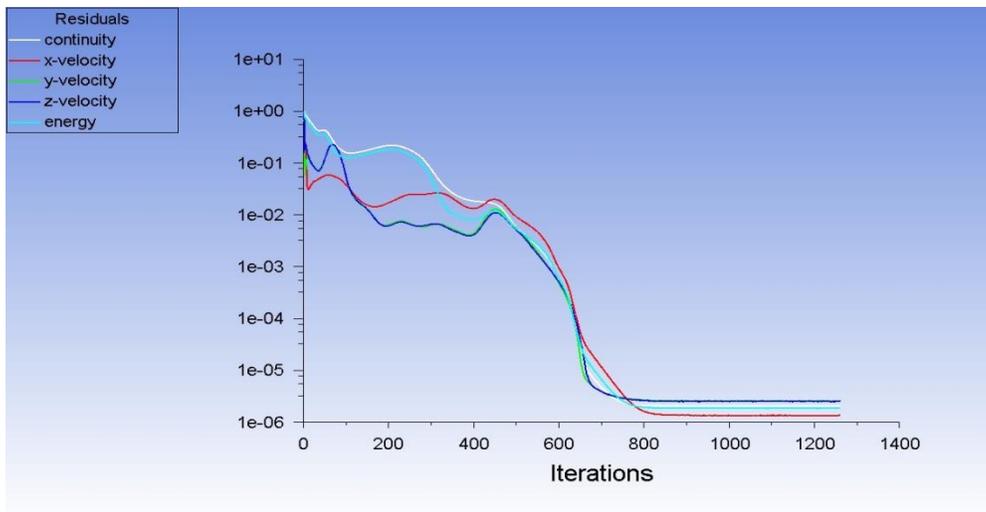


Figure (IV, 22) : le graphe des résiduelles de notre simulation.

En analysant le graphe des résiduelles, nous pouvons constater une diminution rapide et continue des résiduelles. Cela indique que les calculs convergent, c'est-à-dire que les solutions numériques

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

se rapprochent de la solution exacte ou d'une solution précise. Cette convergence est un indicateur important de la fiabilité et de l'exactitude des résultats obtenus.

Une fois que la convergence est atteinte, nous procédons à la visualisation des variables de l'écoulement. Cette visualisation peut se faire sous forme de graphes ou de champs de données contour. Ces représentations visuelles nous permettent d'appréhender plus facilement les caractéristiques de l'écoulement à l'intérieur de la tuyère double galbe.

IV. 3.2.4 : Résultats et discussions:

Les conditions aux limites imposées pour le deuxième cas (3D) sont détaillées dans le tableau ci-dessous. Ce tableau précise les conditions spécifiques appliquées aux différentes frontières de la géométrie pour la simulation :

Modèle	3d, permanent
Solveur	couplé, implicite
Fluide	Air, loi des gaz Parfaits
Conditions aux limites à l'entrée	Pression d'entrée $\begin{cases} P_o = 3000000 \text{ Pa} \\ P_s = 2999790.09 \text{ Pa} \\ T_t = 300k \end{cases}$
Conditions aux limites à la sortie	Pression de sortie $\begin{cases} P_s = 0 \text{ Pa} \\ T_t = 300k \end{cases}$
Parois	Wall (paroi adiabatique)

Tableau (IV, 2) : conditions aux limites pour notre simulation

➤ Le nombre de Mach :

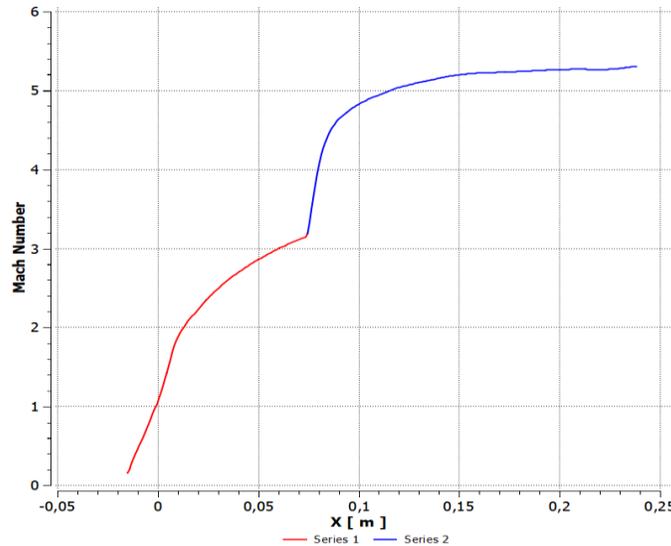


Figure (IV, 23) Evolution de la courbe de nombre de Mach dans une tuyère double galbe 3D.

La courbe présentée ci-dessus représente l'évolution du Nombre de Mach le long de la paroi de la tuyère, et elle nous fournit des informations importantes sur les caractéristiques de l'écoulement.

Tout d'abord, il est observé que le Nombre de Mach augmente progressivement le long de la tuyère. Cette augmentation s'explique par la variation de la section transversale de la tuyère, qui entraîne une accélération de l'écoulement et donc une augmentation de la vitesse. Cependant, cette augmentation n'est pas uniforme tout au long de la tuyère. On peut remarquer que l'augmentation est plus prononcée dans la partie convergente de la tuyère, où la section se rétrécit, ce qui entraîne une compression de l'écoulement et une augmentation rapide du Nombre de Mach. Par la suite, dans la partie divergente de la tuyère, où la section s'élargit, l'augmentation du Nombre de Mach est plus lente.

Une caractéristique importante à souligner est la forme du profil de vitesse dans la tuyère, qui est de forme parabolique. Cela signifie que la vitesse de l'écoulement est maximale au centre de la tuyère et diminue progressivement vers les parois. Cette distribution de la vitesse est caractéristique des écoulements dans des conduites de section variable, où les effets de confinement et d'accélération influencent la répartition de la vitesse.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

En examinant la courbe, on peut également noter que l'augmentation du Nombre de Mach sur la paroi est particulièrement brusque au niveau du col de la tuyère et au niveau du point de jonction entre les deux galbes. Cette observation est cohérente avec la géométrie de la tuyère, où la section est fortement réduite à ces endroits. Cette compression de l'écoulement dans des zones restreintes conduit à une augmentation significative de la vitesse et, par conséquent, du Nombre de Mach.

En ce qui concerne le deuxième galbe de la tuyère, on peut remarquer que la courbe a tendance à se redresser. Cela indique une expansion de l'écoulement à travers cette section de la tuyère, ce qui entraîne une diminution du Nombre de Mach à mesure que l'on se rapproche de la sortie.

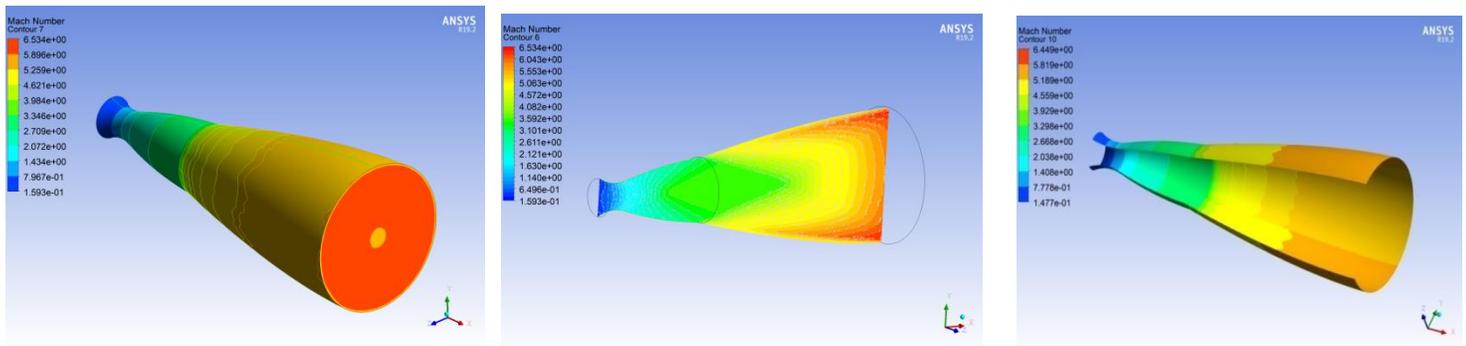


Figure (IV, 24) : Contour d'évolution du nombre de Mach dans la tuyère double galbe.

La figure (IV, 24) présente le contour de l'évolution du Nombre de Mach le long de la tuyère, depuis l'entrée jusqu'à la sortie. Cette représentation graphique nous permet de tirer quelques observations intéressantes.

Tout d'abord, on peut noter que le Nombre de Mach augmente rapidement au niveau de la région du col de la tuyère. Cette augmentation rapide est due à la convergence de la section transversale de la tuyère à cet endroit. En conséquence, l'écoulement est comprimé, ce qui entraîne une augmentation significative de la vitesse et, par conséquent, du Nombre de Mach.

Cette augmentation continue tout au long de la tuyère jusqu'à la sortie. La valeur maximale du Nombre de Mach atteint est de 5,3 selon la figure. Cela indique que l'écoulement dans la tuyère est supersonique, car le Nombre de Mach dépasse 1, qui est la limite entre les écoulements

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

subsoniques et supersoniques. La présence d'un écoulement supersonique peut avoir des implications importantes sur les performances et le comportement de la tuyère.

Il convient également de noter que la variation du Nombre de Mach le long de la tuyère est continue et régulière, sans présence de discontinuités ou de sauts brusques. Cela suggère une évolution en douceur de l'écoulement, en accord avec une conception soignée de la géométrie de la tuyère.

➤ La densité

La densité donne une indication sur la quantité du gaz qui va traverser la tuyère et permet de calculer le débit entre la section d'entrée et la section de la sortie de la tuyère.

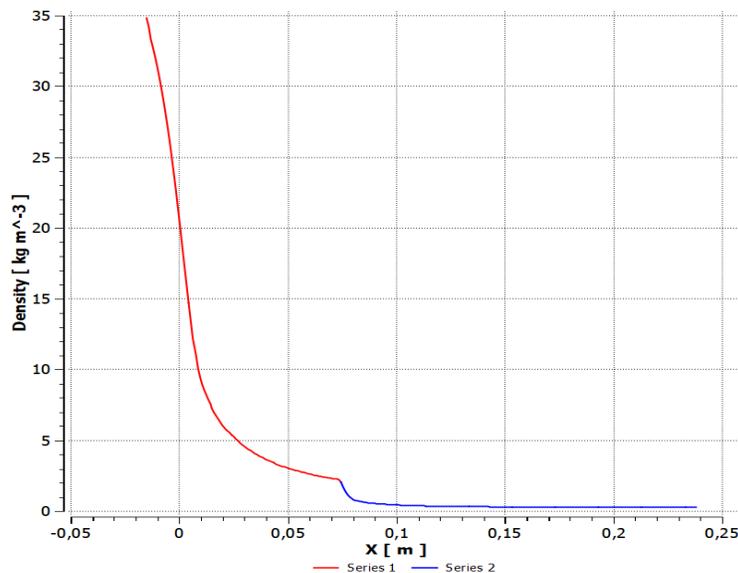


Figure (IV, 25) Evolution de la courbe de la densité dans une tuyère double galbe 3D.

La courbe présentée ci-dessus illustre l'évolution de la densité à travers la tuyère. L'analyse de cette courbe nous permet de comprendre les variations de densité le long de la tuyère et de mettre en évidence des points clés.

Tout d'abord, il est observé que l'évolution de la densité est inverse à celle du Nombre de Mach. Cela signifie que lorsque le Nombre de Mach augmente, la densité diminue. Cette relation entre

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

la densité et le Nombre de Mach est une conséquence des lois de conservation de la masse et de l'énergie dans un écoulement compressible.

En examinant la courbe, on peut noter une diminution rapide de la densité au niveau du col de la tuyère. Cette diminution rapide est due à la convergence de la section transversale de la tuyère à cet endroit, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse et une diminution de la densité selon la relation de continuité.

La diminution de la densité se poursuit également dans la zone d'expansion initiale de la tuyère, où la section transversale commence à se dilater. Cette expansion progressive de la section transversale entraîne une décélération de l'écoulement et, par conséquent, une diminution de la densité.

Dans la partie divergente du premier galbe de la tuyère, on observe une diminution de la densité, mais à un rythme plus lent. Cela est dû à la tendance de l'écoulement à se dilater et à s'éloigner de l'axe central de la tuyère, ce qui entraîne une légère diminution de la densité.

En ce qui concerne le point de jonction, on remarque une légère diminution de la densité. Cette diminution peut être attribuée aux variations locales de la géométrie de la tuyère à cet endroit, qui peuvent influencer la distribution de l'écoulement et, par conséquent, la densité.

En résumé, l'analyse de la courbe d'évolution de la densité le long de la tuyère nous permet de comprendre les variations de densité en fonction du Nombre de Mach. La diminution rapide de la densité au niveau du col et de la zone d'expansion initiale, suivie d'une diminution plus lente dans la partie divergente, met en évidence les caractéristiques importantes de l'écoulement compressible dans la tuyère.

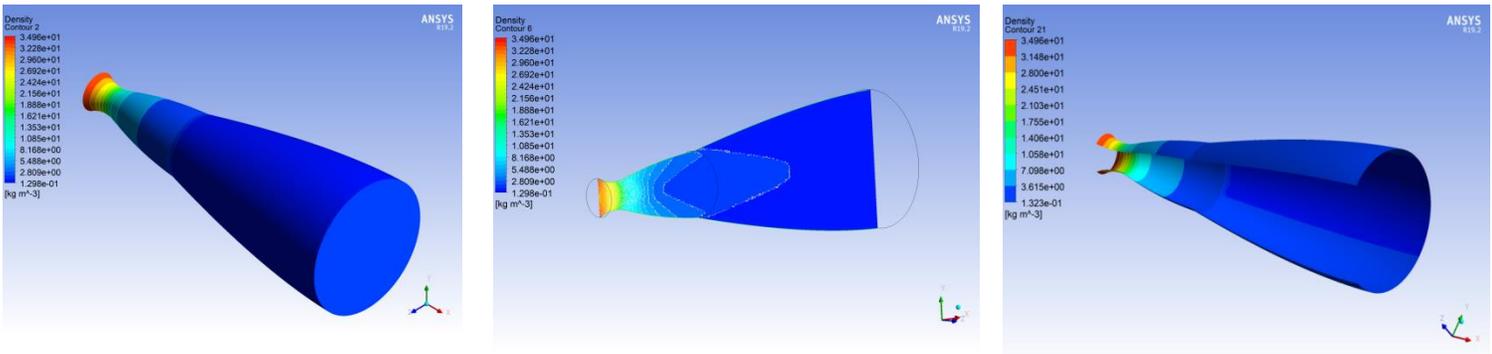


Figure (IV, 26) : Contour d'évolution de la densité dans la tuyère double galbe.

La figure (IV, 26) présente les contours de l'évolution de la densité dans une tuyère double galbe. L'observation de cette représentation graphique permet de mettre en évidence des caractéristiques importantes de la répartition de la densité le long de la tuyère.

On peut clairement observer que le contour de la densité évolue de manière décroissante depuis le col de la tuyère jusqu'à sa sortie. Cette décroissance de la densité est en accord avec les principes fondamentaux de l'écoulement compressible. En effet, lorsque la section transversale de la tuyère se rétrécit au niveau du col, la vitesse de l'écoulement augmente, entraînant une diminution de la densité conformément à la relation de continuité.

Cette diminution de la densité se poursuit tout au long de la tuyère, en particulier dans les zones où la section transversale se rétrécit, et atteint son niveau le plus bas à la sortie de la tuyère. Là encore, cela est cohérent avec l'augmentation de la vitesse de l'écoulement dans ces zones d'expansion.

La forme générale du contour de la densité peut également fournir des informations supplémentaires sur le comportement de l'écoulement. Par exemple, si le contour de la densité est uniforme et régulier, cela indique un écoulement stable et bien équilibré. En revanche, des variations locales ou des gradients prononcés dans le contour de la densité pourraient suggérer des perturbations ou des zones d'écoulement non uniforme.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

➤ La pression

La pression joue un rôle essentiel dans le calcul du coefficient de poussée d'un système. De plus, la pression statique est également utilisée pour analyser la distribution des contraintes radiales et tangentielles dans le but d'étudier la résistance des matériaux.

Lorsqu'il s'agit de calculer le coefficient de poussée, la pression est un paramètre crucial. Elle intervient dans l'équation qui relie la force de poussée à la différence de pression entre l'entrée et la sortie du système. En mesurant la pression statique à ces deux points clés, il est possible de déterminer avec précision le coefficient de poussée du système.

En ce qui concerne l'étude de la distribution des contraintes radiales et tangentielles, la pression statique est également utilisée. La pression statique est liée aux forces exercées par l'écoulement sur les parois du système. En analysant la distribution de la pression statique le long de ces parois, il est possible de déterminer les contraintes radiales et tangentielles auxquelles les matériaux sont soumis.

Ces informations sur les contraintes sont essentielles pour évaluer la résistance des matériaux utilisés dans la construction du système. En comprenant la distribution des contraintes, il est possible d'identifier les zones de contrainte maximale et de prendre des mesures appropriées pour assurer la durabilité et la sécurité du système.

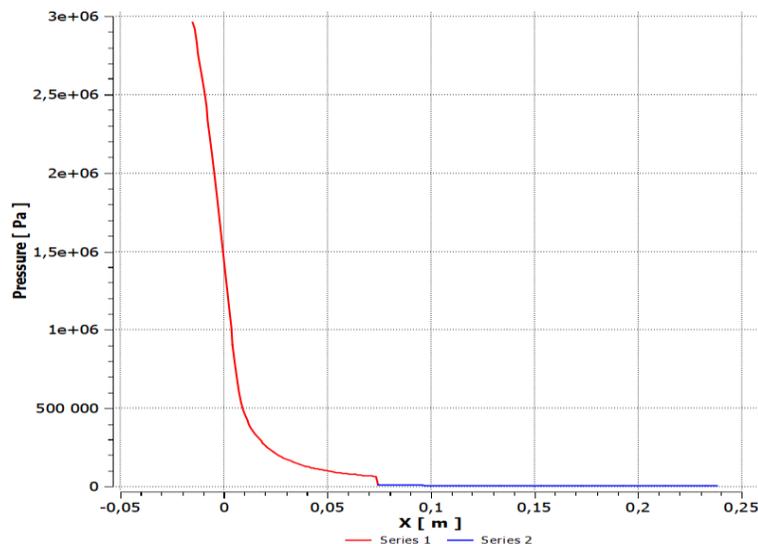


Figure (IV, 27) Evolution de la courbe de la pression statique dans une tuyère double galbe 3D.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

La courbe présentée ci-dessus illustre l'évolution de la pression statique le long de la paroi de la tuyère. Cette représentation graphique met en évidence une diminution rapide de la pression statique.

L'observation de cette courbe révèle une tendance similaire à celle de la densité, c'est-à-dire une diminution de la pression statique tout au long de la paroi de la tuyère. Cette similitude est cohérente avec les principes de l'écoulement compressible, où une accélération de l'écoulement se traduit par une diminution de la pression statique.

La courbe montre que cette diminution de la pression statique se produit de manière significative et rapide. Cela peut être dû à des facteurs tels que la géométrie de la tuyère, l'expansion de l'écoulement et d'autres paramètres de l'écoulement lui-même. Ces variations de pression statique peuvent avoir des implications importantes pour la performance et le comportement de la tuyère, ainsi que pour les forces exercées sur les parois.

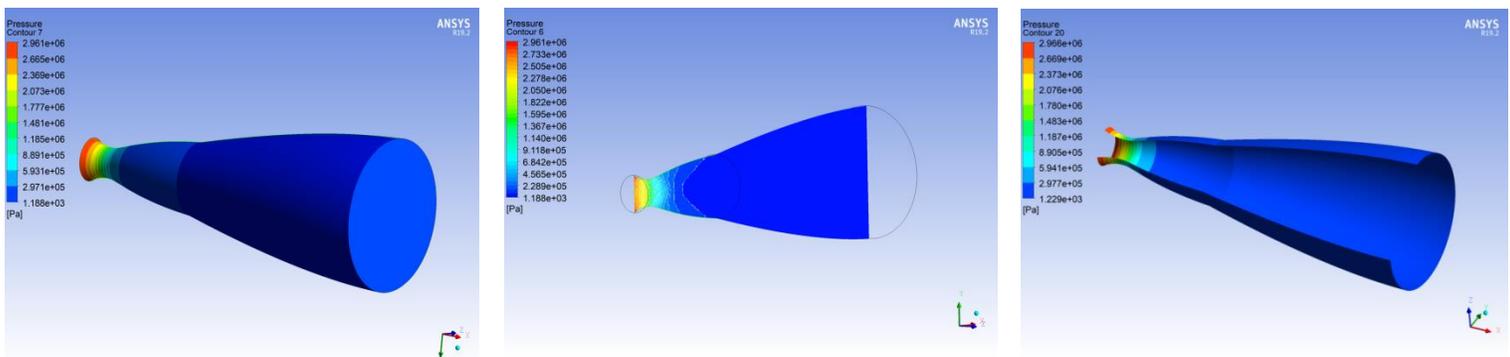


Figure (IV, 28) : Contour d'évolution de la pression statique dans la tuyère double galbe.

La figure (IV, 28) présente les contours de la pression statique le long de la paroi de la tuyère. Cette représentation graphique met en évidence une diminution de la pression statique depuis le col jusqu'à la sortie de la tuyère.

L'évolution décroissante de la pression statique observée dans cette figure est cohérente avec les principes de l'écoulement compressible. En général, à mesure que l'écoulement s'accélère le long de la tuyère, la pression diminue en conséquence.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

Il est important de noter que la pression statique est étroitement liée à la densité de l'écoulement. En effet, la pression est directement proportionnelle à la densité. Ainsi, l'évolution de la pression statique suit généralement la même tendance que celle de la densité.

Cette corrélation entre la pression statique et la densité est essentielle pour comprendre les variations de pression dans la tuyère et leurs implications sur le comportement de l'écoulement. En analysant les contours de la pression statique, il est possible d'obtenir des informations précieuses sur la répartition des forces exercées sur les parois de la tuyère.

➤ La température

La température statique joue un rôle crucial dans la détermination des conditions aux limites internes du modèle mathématique du transfert de chaleur à travers le matériau de la tuyère. Elle fournit des indications précieuses pour le choix du matériau de construction capable de résister à cette température.

En effet, en étudiant la température statique le long de la tuyère, nous sommes en mesure de comprendre les variations de température qui se produisent dans le matériau de la tuyère pendant le fonctionnement. Cela nous permet d'évaluer les contraintes thermiques auxquelles le matériau sera soumis et de choisir un matériau approprié qui peut résister à ces températures élevées.

La température statique est directement liée à la quantité de chaleur dissipée dans la tuyère. Une température élevée indique une dissipation de chaleur plus importante et, par conséquent, une contrainte thermique plus élevée sur le matériau.

En prenant en compte la température statique, nous pouvons déterminer les limites de température acceptables pour le matériau de la tuyère. Cela nous permet de choisir un matériau qui possède les propriétés thermiques nécessaires pour résister à ces températures élevées, assurant ainsi la sécurité et la durabilité de la tuyère.

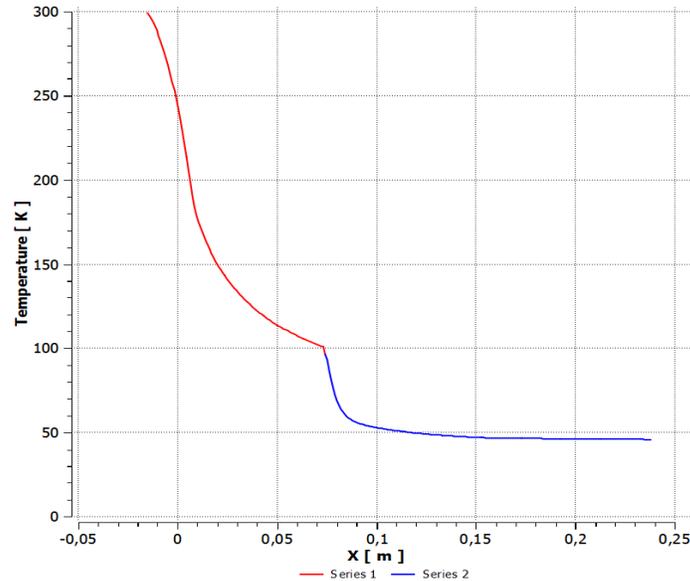


Figure (IV, 29) Evolution de la courbe de la température statique dans une tuyère double galbe 3D.

La courbe présentée ci-dessus illustre l'évolution de la température statique le long de la paroi de la tuyère. En observant cette courbe, on remarque une diminution rapide de la température statique.

Cette diminution de la température statique est conforme aux principes de l'écoulement compressible à travers la tuyère. Lorsque l'écoulement s'accélère le long de la tuyère, la conversion de l'énergie cinétique en énergie de pression s'accompagne d'une baisse de température. Ainsi, la diminution rapide de la température statique indique une augmentation de la vitesse de l'écoulement.

Il est intéressant de noter que l'évolution de la température statique suit une tendance similaire à celle de la densité et de la pression statique. En effet, ces trois variables sont étroitement liées dans les écoulements compressibles. La pression et la densité sont des paramètres clés qui influencent la température statique.

Lorsque la densité diminue et que la pression baisse, la température statique a également tendance à diminuer. Cette corrélation entre la température statique, la densité et la pression est essentielle pour comprendre les caractéristiques de l'écoulement dans la tuyère.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

L'évolution similaire de la température statique, de la densité et de la pression statique indique une cohérence dans les résultats obtenus. Cela renforce la confiance dans les prédictions et les analyses basées sur ces variables dans le cadre de l'étude de l'écoulement dans la tuyère.

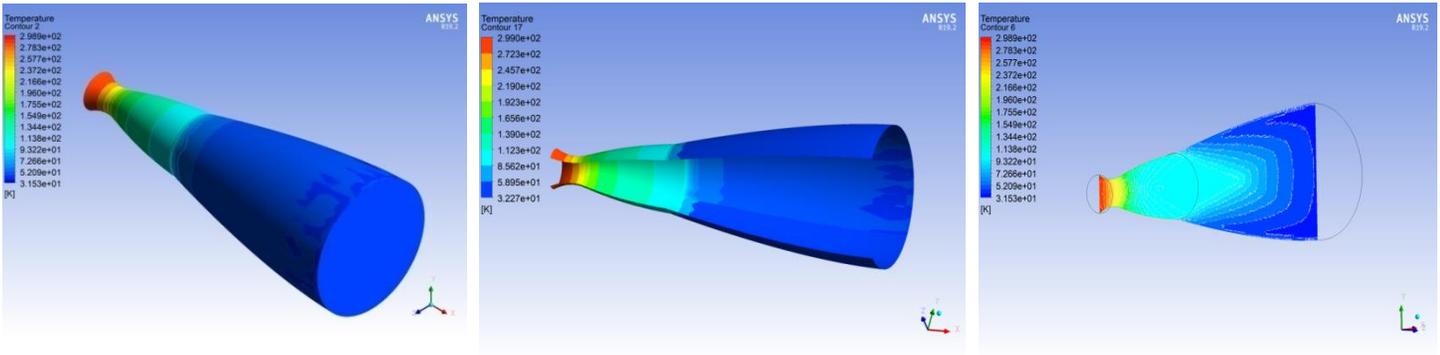


Figure (IV, 30) : Contour d'évolution de la température statique dans la tuyère double galbe.

Le contour représenté dans la figure (IV, 30) présente l'évolution de la température statique le long de la paroi de la tuyère. On observe une décroissance de la température statique à partir du col de la tuyère jusqu'à sa sortie.

Cette évolution de la température statique est cohérente avec les principes de l'écoulement compressible à travers la tuyère. En général, lorsque l'écoulement s'accélère, il se produit une conversion de l'énergie cinétique en énergie de pression, ce qui entraîne une baisse de la température. Ainsi, la décroissance de la température statique observée dans le contour confirme cette caractéristique de l'écoulement.

Il est important de souligner que la température statique est directement liée à la densité et à la pression statique. En effet, ces trois variables sont interdépendantes dans les écoulements compressibles. Lorsque la densité et la pression statique diminuent, la température statique a également tendance à diminuer.

Par conséquent, l'évolution de la température statique suit une tendance similaire à celle de la densité et de la pression statique. Cette similitude dans les variations indique une cohérence entre ces variables et renforce notre confiance dans les résultats obtenus.

➤ Les vitesses

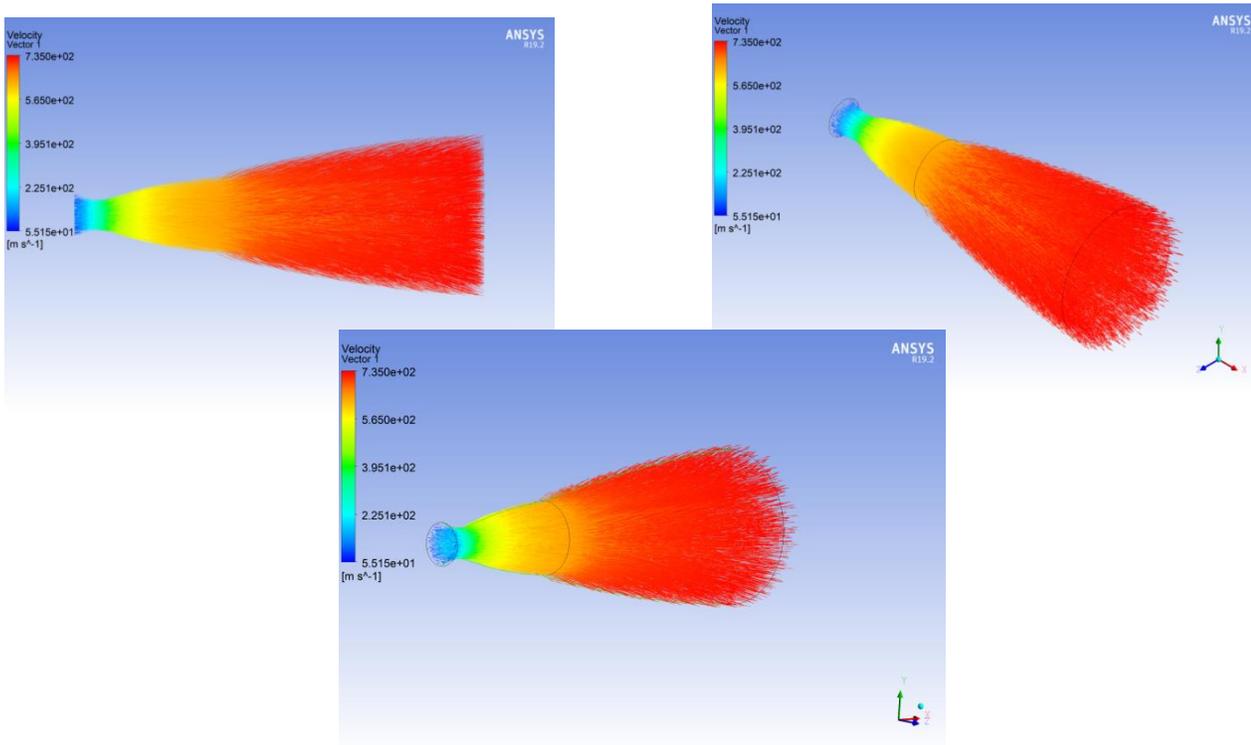


Figure (IV, 31) : les vecteurs des lignes de courant dans la tuyère double galbe.

La figure ci-dessus présente les vecteurs des lignes de courant dans la tuyère double galbe. Il est clairement observé que ces vecteurs suivent la forme de la tuyère, s'adaptant à sa configuration double galbe et condensée. À mesure que l'écoulement progresse le long de la tuyère, les lignes de courant se réarrangent et se rapprochent, convergeant vers une configuration plus uniforme à la sortie de la tuyère.

Cette observation des vecteurs des lignes de courant confirme la trajectoire de l'écoulement à travers la tuyère double galbe. Les lignes de courant suivent le profil géométrique de la tuyère, s'écoulant de manière régulière et ordonnée le long de sa forme. La convergence des lignes de courant à la sortie de la tuyère suggère une stabilisation de l'écoulement, où la distribution de la vitesse devient plus uniforme.

Cette configuration des lignes de courant dans la tuyère double galbe est importante pour l'optimisation de la conception et le bon fonctionnement de la tuyère. Elle assure un écoulement

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

fluide et efficace, en minimisant les perturbations et les pertes d'énergie. De plus, elle peut avoir un impact sur les performances aérodynamiques et la distribution des contraintes sur les parois de la tuyère.

IV. 3.3 : La comparaison entre les deux cas 2D et 3D:

Dans les deux simulations réalisées avec Ansys, les résultats obtenus peuvent être représentés sous forme de courbes et de contours pour visualiser le comportement des paramètres d'écoulement tels que le nombre de Mach, la densité, la pression et la température statique dans la tuyère.

En comparant les résultats 2D et 3D, vous pourrez observer les différences entre les deux approches de modélisation. Les simulations 2D considèrent généralement l'écoulement dans un plan, négligeant les variations dans la direction perpendiculaire à ce plan. Les résultats 2D peuvent être plus rapides à obtenir, mais ils peuvent également manquer de certaines informations cruciales sur le comportement tridimensionnel de l'écoulement.

Les simulations 3D prennent en compte les variations dans toutes les directions et fournissent une représentation plus complète de l'écoulement réel. Les résultats 3D peuvent révéler des phénomènes complexes tels que les vortex, les tourbillons et les zones de séparation de l'écoulement, qui peuvent avoir un impact significatif sur les performances de la tuyère.

En comparant les résultats 2D et 3D, vous pourrez évaluer l'importance de la modélisation tridimensionnelle et déterminer si les effets négligés dans les simulations 2D ont une influence significative sur les résultats. Cela peut aider à affiner et à développer votre compréhension de l'écoulement dans la tuyère et à améliorer la précision de vos simulations.

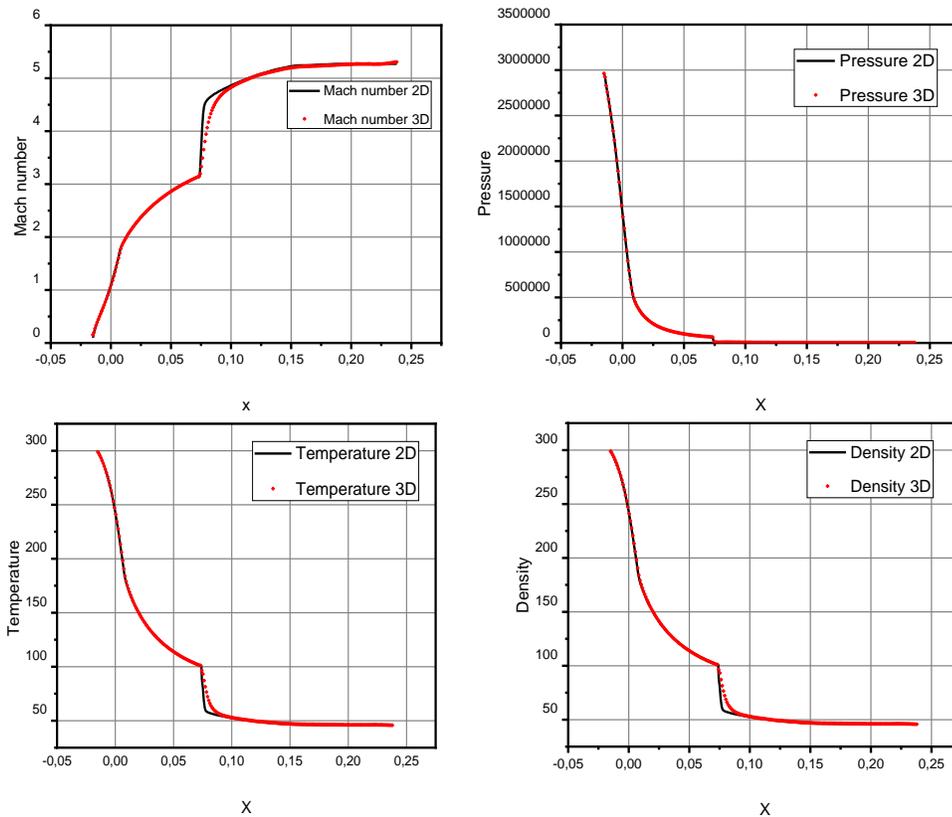


Figure (IV, 32) : comparaison des paramètres d'écoulement pour les deux cas 2D et 3D

Sur la figure (IV, 32), on peut observer l'évolution des paramètres d'écoulement tels que la pression, le nombre de Mach, la densité et la température sous forme de courbes. On constate que l'erreur relative entre les deux résultats est non significative, les résultats sont très proches. Cependant, cette erreur est accentuée au niveau du point de jonction. À la sortie, l'erreur devient nulle pour la pression qui est imposée, ainsi que pour la densité et la température.

En ce qui concerne le nombre de Mach, le résultat obtenu pour le cas 2D est de 5.4, tandis que pour le cas 3D il est de 5.3, ce qui correspond à une erreur de 1.85%. Cette légère différence peut être attribuée aux simplifications effectuées dans l'approche 2D, qui ne prend pas en compte certaines variations tridimensionnelles de l'écoulement.

Dans l'ensemble, l'approche axisymétrique de la tuyère lors d'une simulation s'avère très intéressante, car elle permet d'éviter des calculs colossaux et de gagner du temps. Cependant, il est important de noter que cette approche comporte des limitations, notamment en ce qui

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

concerne la modélisation précise des phénomènes tridimensionnels. Il est donc essentiel d'évaluer attentivement l'impact de ces simplifications sur les résultats et de prendre en compte les limitations inhérentes à l'approche 2D.

IV. 4. ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'ALTITUDE SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA TUYERE :

Dans cette partie de l'étude, nous souhaitons évaluer l'influence de l'altitude sur le comportement de la tuyère en effectuant des simulations pour les deux cas : l'approche axisymétrique et l'approche 3D. Cette analyse nous permettra de mieux comprendre comment les variations d'altitude peuvent affecter les performances de la tuyère.

Dans le cadre de notre étude numérique, nous supposons que le gaz dans la tuyère se comporte comme un gaz parfait. Cette approximation est couramment utilisée pour simplifier les calculs et modéliser l'écoulement de manière efficace. Un gaz parfait est un modèle simplifié dans lequel on considère que les molécules du gaz n'interagissent pas entre elles et que les forces intermoléculaires sont négligeables. Bien que cette simplification puisse ne pas capturer tous les aspects réels du comportement du gaz, elle est souvent suffisante pour fournir des résultats acceptables dans de nombreuses applications.

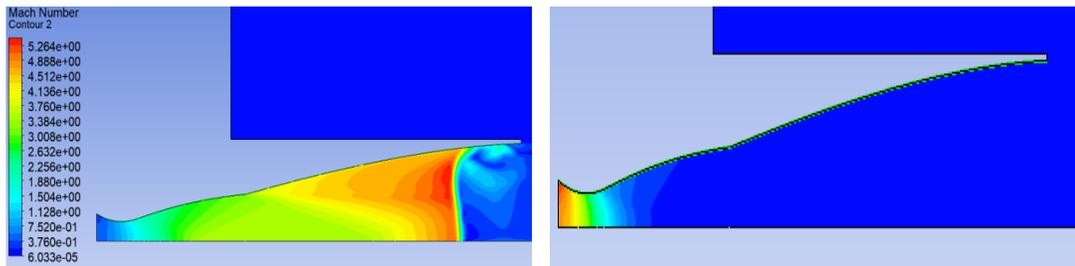
En réalisant des simulations pour différents niveaux d'altitude, nous pourrons observer comment les paramètres d'écoulement, tels que la pression, le nombre de Mach, la densité et la température, varient en fonction de ces changements altitudinaux. Ces informations nous aideront à comprendre comment l'altitude peut influencer les performances de la tuyère, notamment en termes de poussée, d'efficacité et de stabilité de l'écoulement.

IV. 4.1 : Cas de la tuyère 2D

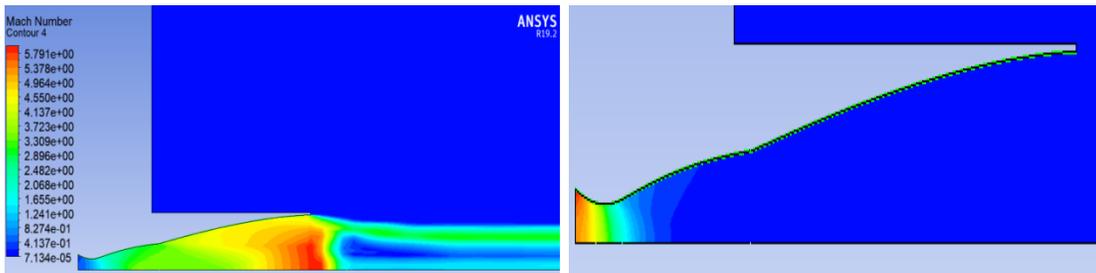
➤ Résultats et discussions:

Ces simulations nous ont permis de mettre en évidence tous les modes de fonctionnement de la tuyère double galbe passant du mode basse altitude au mode haute altitude.

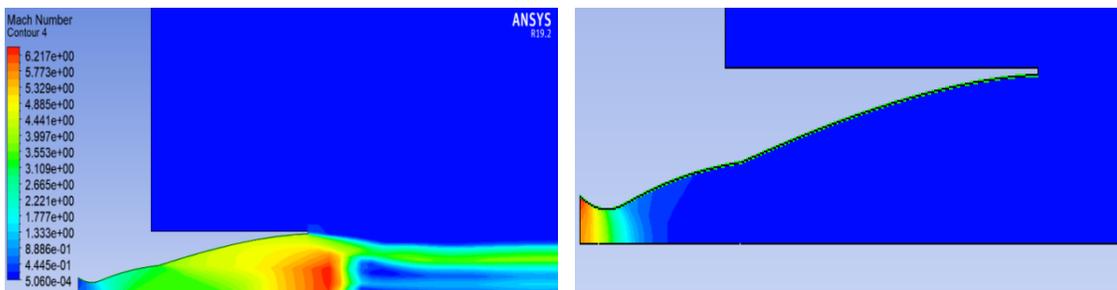
Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats



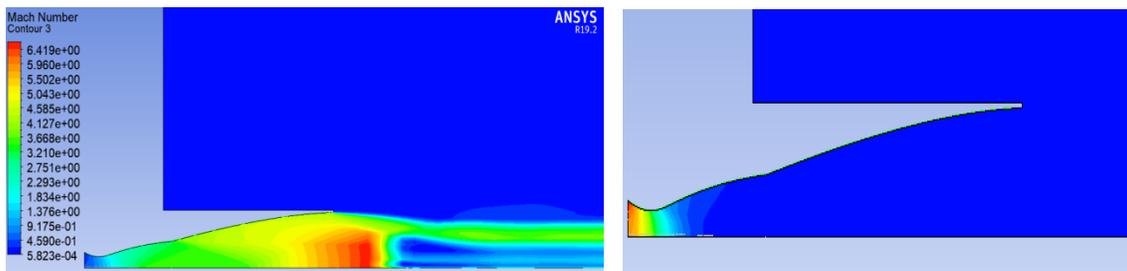
NPR= 40



NPR= 80

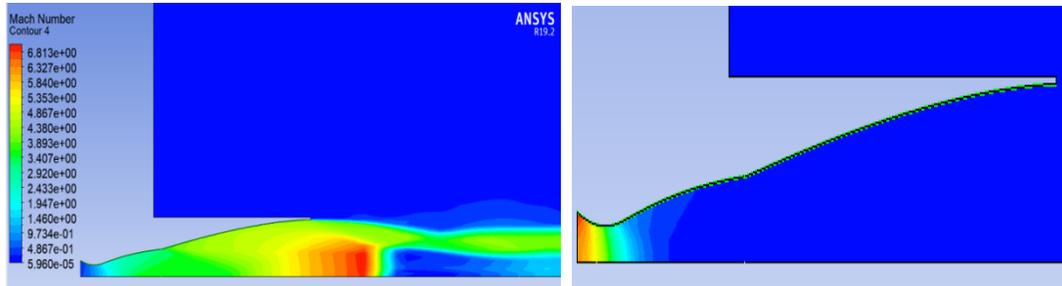


NPR= 100

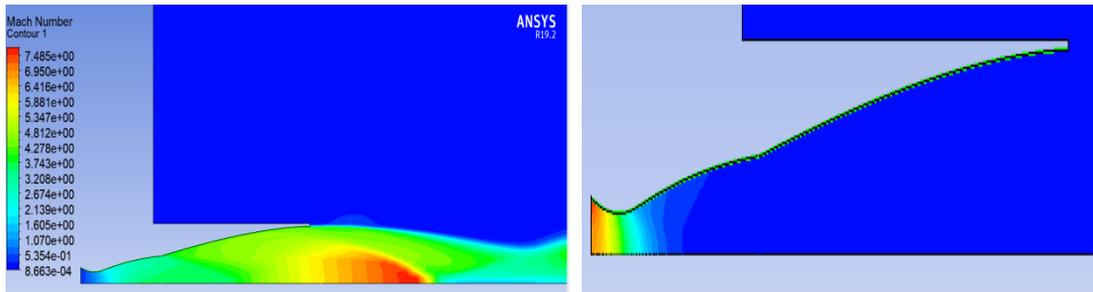


NPR= 120

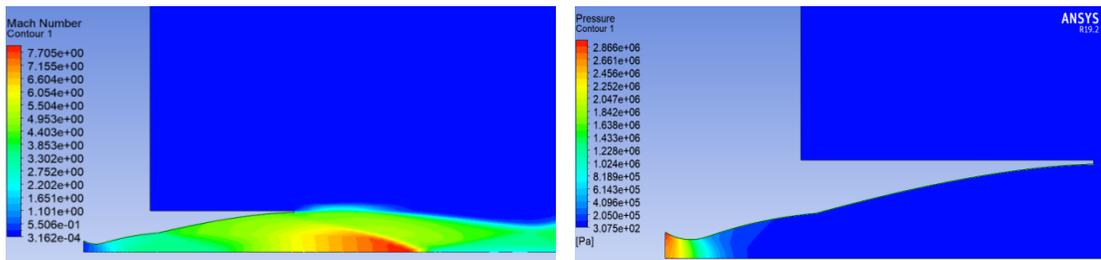
Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats



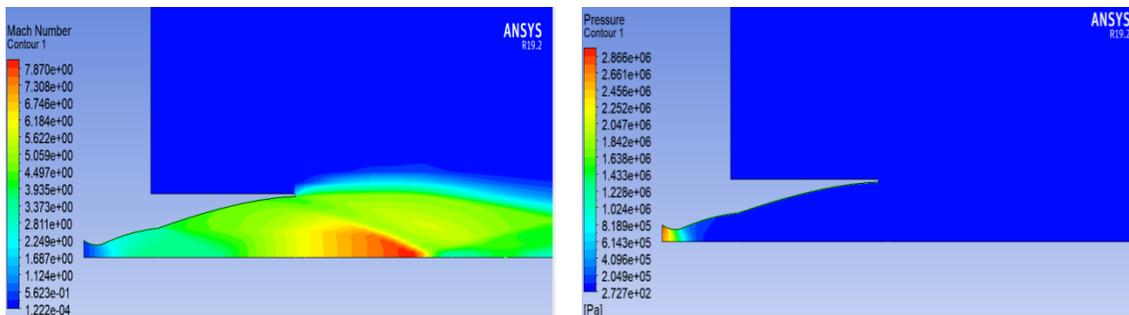
NPR= 155



NPR= 180



NPR= 200



NPR= 300

Figure (IV, 33) : Contour de nombre de Mach et la pression pour différentes NPR

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

En analysant les figures précédentes, plusieurs observations importantes peuvent être faites :

L'évolution de la pression statique est décroissante : On remarque que la pression statique diminue le long de la tuyère. Cette évolution est inverse à celle du nombre de Mach, ce qui signifie que lorsque le nombre de Mach augmente, la pression statique diminue. Cela est cohérent avec les principes de l'écoulement compressible.

Régime basse altitude (SeaLevel mode) : Dans ce régime, seul le premier galbe de la tuyère est en fonctionnement. On observe que l'écoulement se sépare immédiatement au point d'inflexion, c'est-à-dire à la jonction entre le premier et le deuxième galbe de la tuyère. Ce phénomène de séparation de l'écoulement peut avoir des conséquences sur les performances et l'efficacité de la tuyère.

Mode transitoire : Dans ce mode, on observe que l'écoulement se détache de la paroi du deuxième galbe de la tuyère. Le point de détachement de l'écoulement est repoussé vers la section de Laval sur la paroi de l'extension de la tuyère, en fonction de la variation des NPR (Nozzel Pressure Ratio). Ce phénomène de détachement de l'écoulement peut avoir des effets significatifs sur les performances et la stabilité de l'écoulement.

Régime haute altitude : Dans ce régime, l'écoulement épouse la paroi du deuxième galbe de la tuyère. Cependant, il est important de noter que la non-adaptation de la tuyère peut provoquer le détachement du flux à partir de cette tuyère. Ce détachement de l'écoulement peut avoir des implications sur les performances et l'efficacité de la tuyère dans les conditions de haute

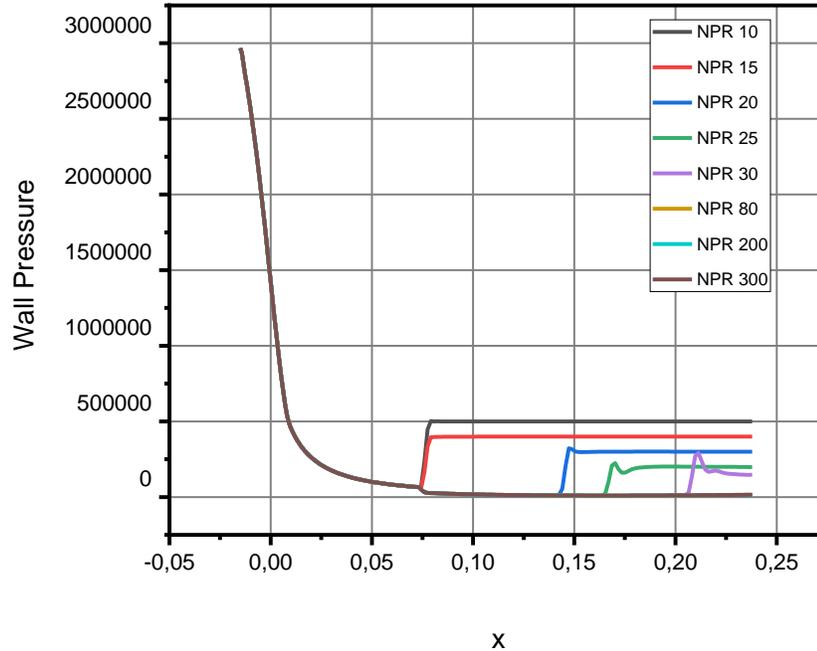


Figure (IV, 34) : Différentes évolutions de pression pour différents NPR

L'analyse de la figure met en évidence les différentes évolutions de la pression en fonction des NPR (Nozzle Pressure Ratio) allant de 10 à 300. Voici quelques observations importantes à partir des courbes présentées :

Expansion dans le premier galbe : Pour tous les NPR étudiés, on observe une expansion de l'écoulement dans le premier galbe de la tuyère. Cela se traduit par une diminution de la pression à mesure que l'écoulement se propage le long de cette section de la tuyère. L'expansion permet d'augmenter la vitesse de l'écoulement et d'améliorer les performances de la tuyère.

Chute de pression à l'approche du point d'inflexion : Une caractéristique notable de toutes les courbes est la chute de pression observée lorsque l'écoulement approche du point d'inflexion, c'est-à-dire la jonction entre le premier et le deuxième galbe de la tuyère. Cette chute de pression peut être attribuée aux variations de la géométrie de la tuyère et aux changements d'écoulement qui se produisent à cette transition.

Stabilisation de la pression dans le galbe d'extension : Dans le galbe d'extension de la tuyère, toutes les courbes montrent une stabilisation de la pression. Cela signifie que la pression devient constante et ne varie que légèrement jusqu'à la sortie de la tuyère. Cette caractéristique est

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

importante car elle indique que l'écoulement atteint une certaine stabilité et uniformité dans cette section de la tuyère.

IV. 4.2 : cas de la tuyère 3D :

Une fois que vous avez créé la section transversale de la tuyère, vous pouvez effectuer la révolution de la géométrie pour obtenir une forme 3D. Voici les étapes à suivre :

Sélectionner la section transversale : Dans votre logiciel de modélisation 3D, sélectionnez la section transversale que vous avez créée pour représenter le profil de la tuyère.

Définir l'axe de révolution : Définissez l'axe de révolution autour duquel vous souhaitez faire tourner la section transversale. Cet axe peut être vertical, horizontal ou incliné, selon les spécifications de votre tuyère. Assurez-vous que l'axe est correctement positionné pour obtenir la forme souhaitée.

Effectuer la révolution : Utilisez l'outil de révolution de votre logiciel pour effectuer la rotation de la section transversale autour de l'axe défini. Cela créera la forme 3D complète de la tuyère en tenant compte de la géométrie de révolution.

Vérifier la géométrie : Une fois la révolution effectuée, vérifiez la géométrie obtenue pour vous assurer qu'elle correspond à vos attentes. Vérifiez les dimensions, les angles et les formes pour vous assurer qu'elles respectent les spécifications de conception.

Enrichir la géométrie : Si nécessaire, vous pouvez ensuite enrichir la géométrie de la tuyère en ajoutant des détails supplémentaires. Cela peut inclure des renforts, des nervures, des caractéristiques internes ou externes spécifiques, des filetages, etc. Utilisez les outils de modélisation appropriés pour ajouter ces détails.

Appliquer les conditions aux limites : Enfin, appliquez les conditions aux limites nécessaires à votre simulation sur la géométrie de la tuyère 3D. Cela peut inclure les conditions de débit, de pression, de température, etc., qui sont pertinentes pour votre analyse ou votre simulation.

Les figures suivantes résument succinctement ces étapes :

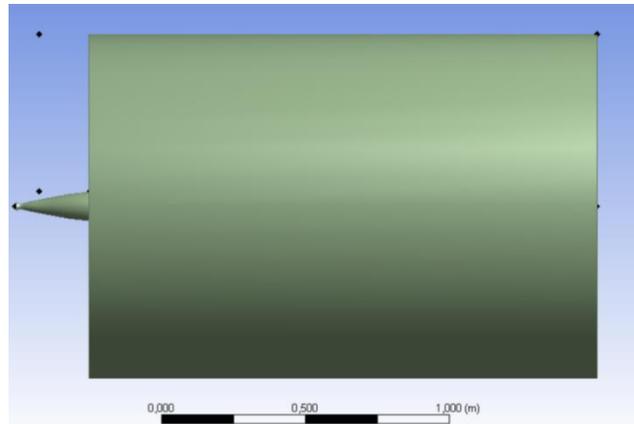


Figure (IV, 35) : la création de la géométrie

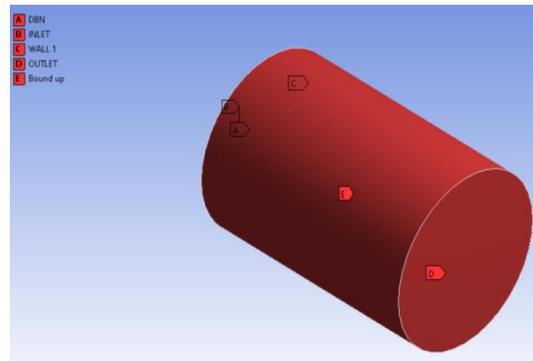
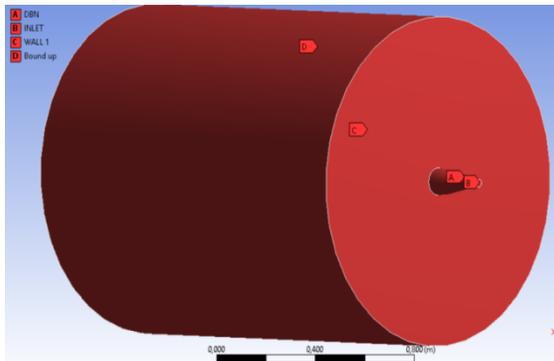


Figure (IV, 36) : Création de Sélection Nommés

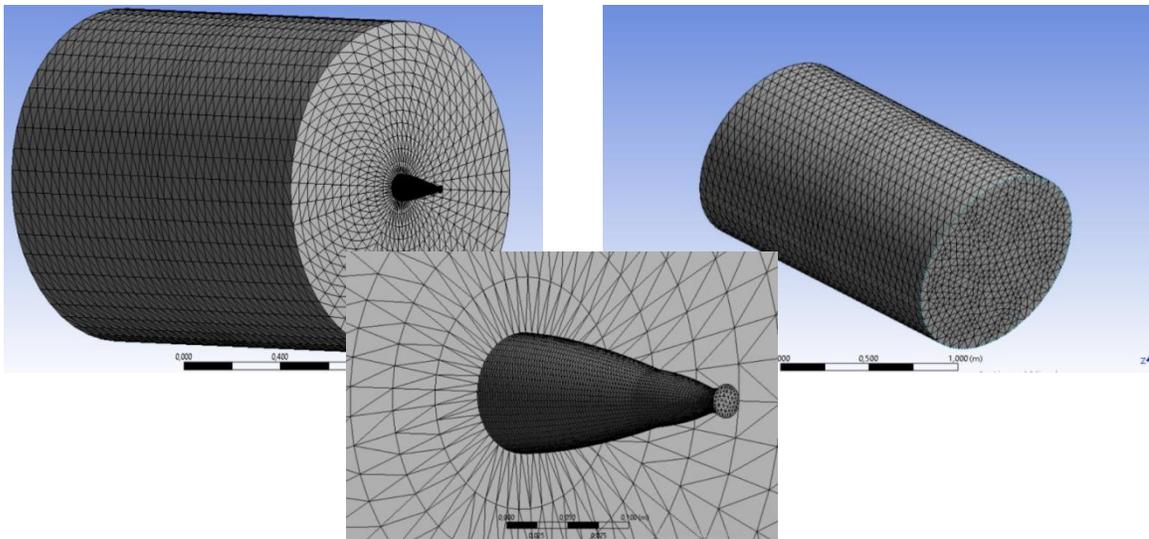


Figure (IV, 37) : Maillage structuré quadrilatère

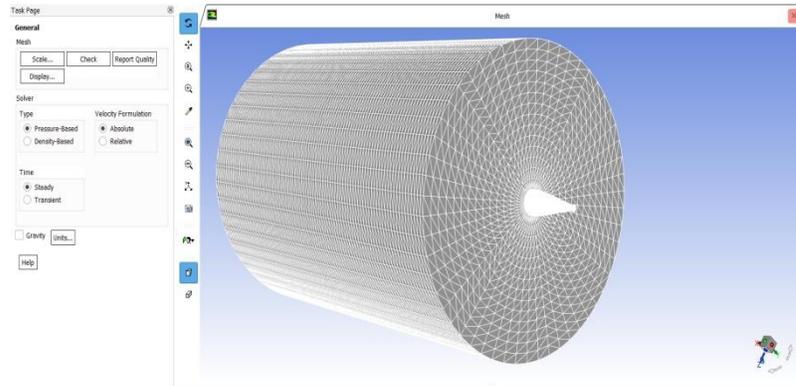


Figure (IV, 38) : Maillage structuré quadrilatère de la Tuyère DBN sur Fluent.

➤ **Résultats et discussions :**

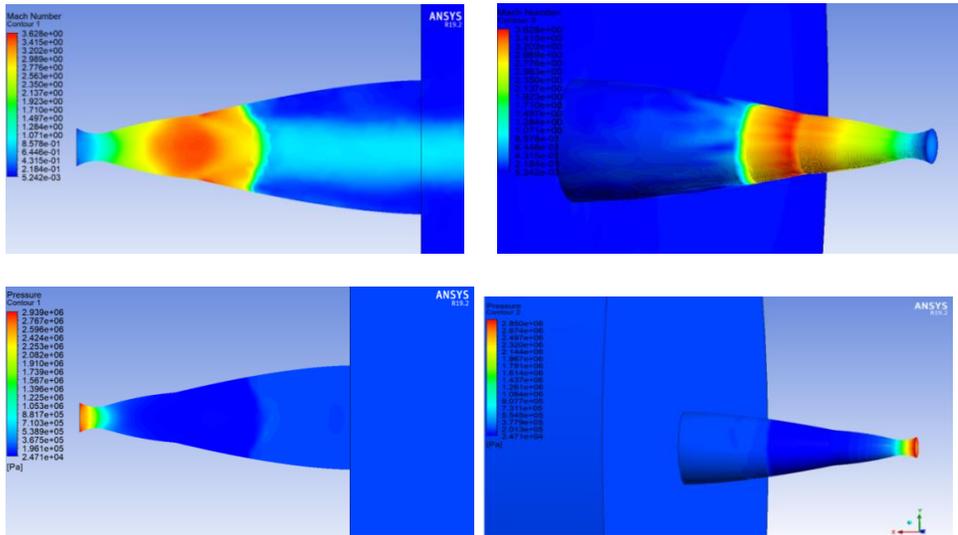
Dans cette partie, nous avons utilisé la simulation 3D pour étudier les différents modes de fonctionnement de la tuyère double galbe, en passant du mode basse altitude au mode haute altitude. Nous avons réalisé cette étude pour différents rapports de pression à l'entrée (NPR) égaux à 10, 30, 40, 50, 100 et 300. La simulation 3D nous a permis de visualiser et d'analyser en détail le comportement de la tuyère dans chaque mode de fonctionnement.

En utilisant Fluent ou un logiciel similaire, nous avons créé la géométrie de la tuyère en 3D en suivant les étapes appropriées. Nous avons ensuite généré un maillage structuré quadrilatère pour représenter la géométrie de manière précise et efficace.

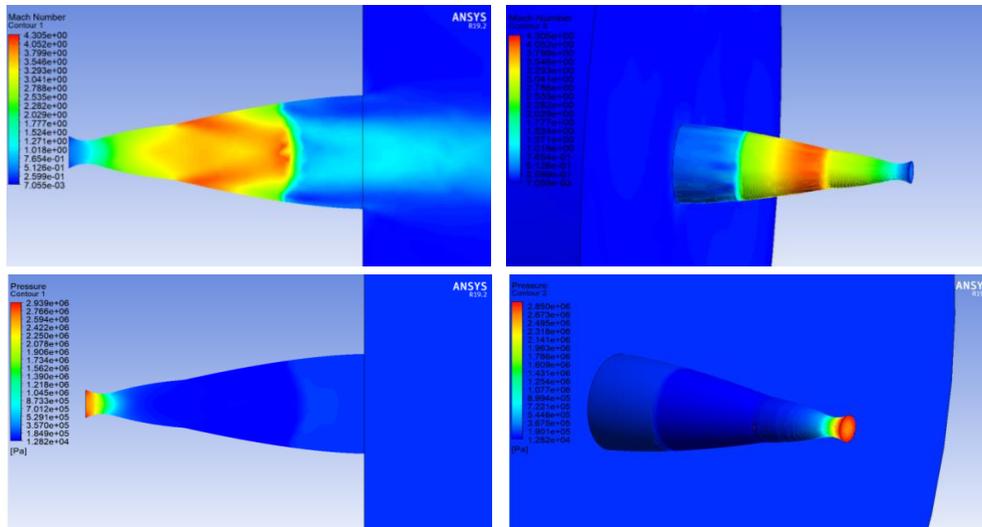
Une fois que nous avons obtenu le maillage et appliqué les conditions aux limites appropriées, nous avons procédé à la résolution de la simulation. En utilisant les différentes valeurs de NPR, nous avons observé les variations des caractéristiques de la tuyère, telles que la distribution des vitesses, des pressions et des températures.

Grâce à cette simulation 3D, nous avons pu observer et analyser les performances de la tuyère dans chaque mode de fonctionnement pour les différents NPR. Cela nous a permis de comprendre comment la géométrie de la tuyère et les conditions de fonctionnement influencent les caractéristiques du flux éjecté.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

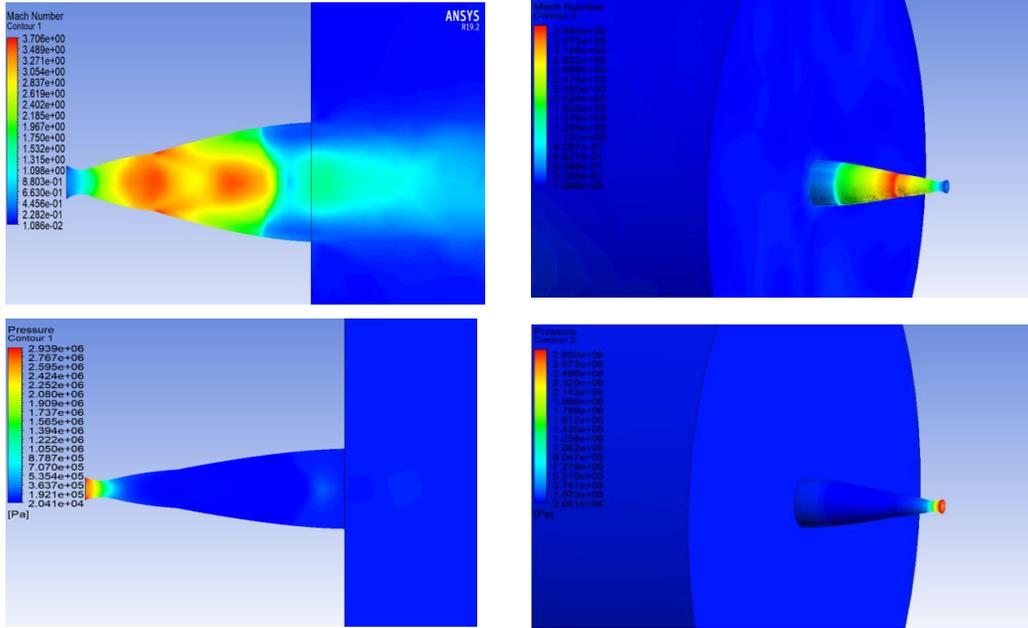


NPR= 10

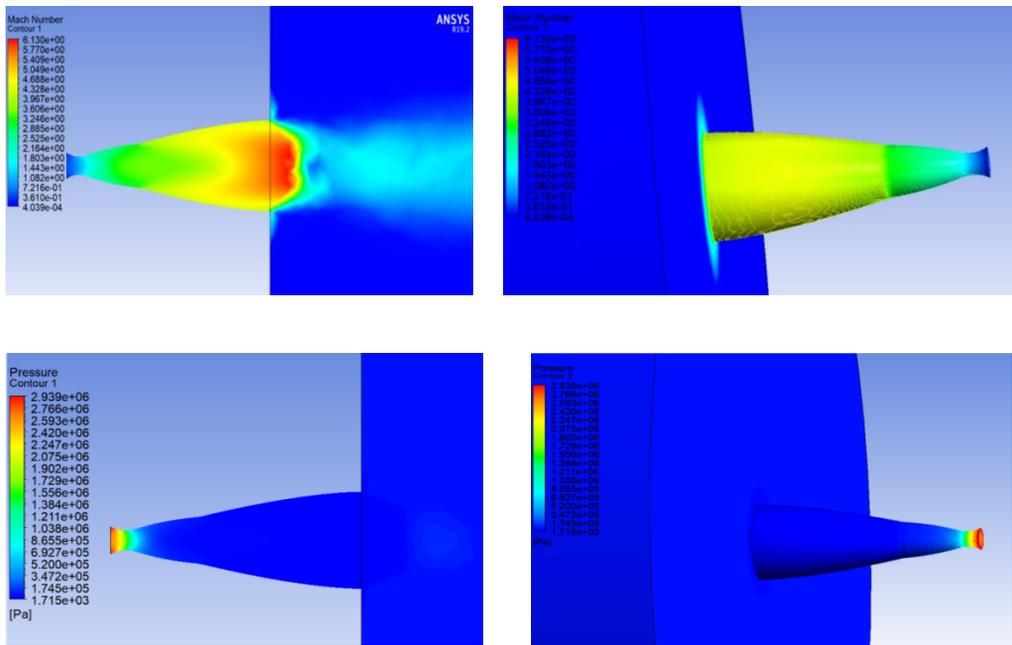


NPR= 30

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

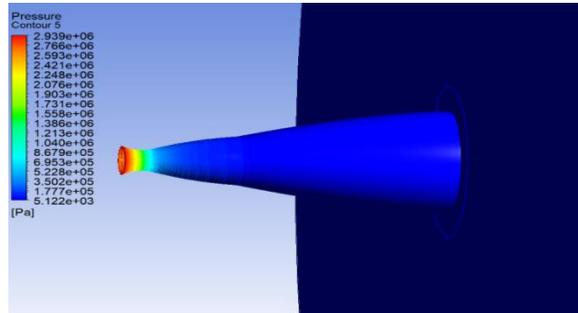
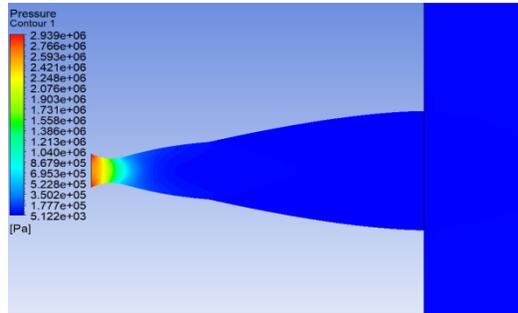
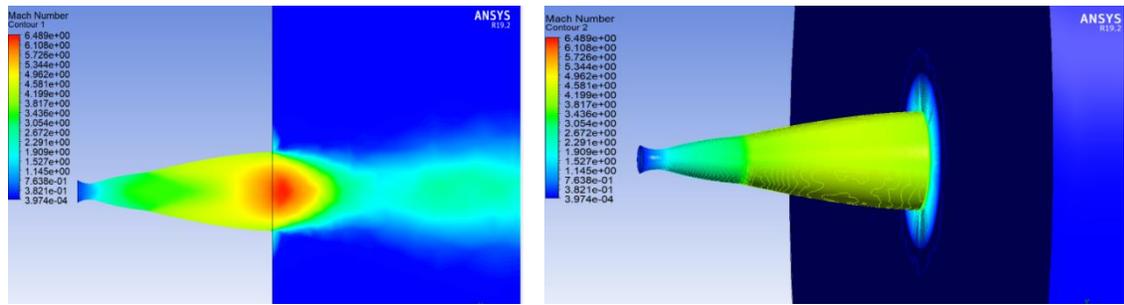


NPR= 40

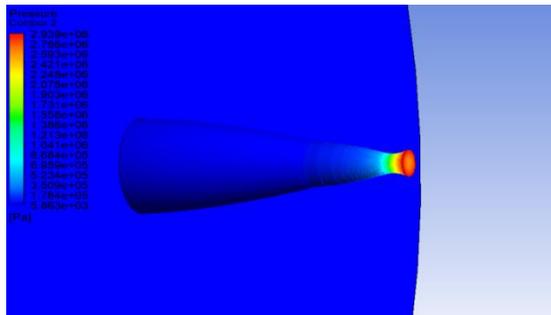
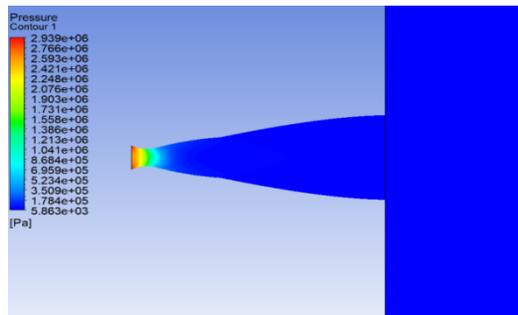
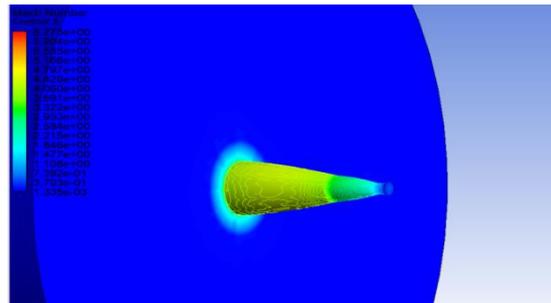
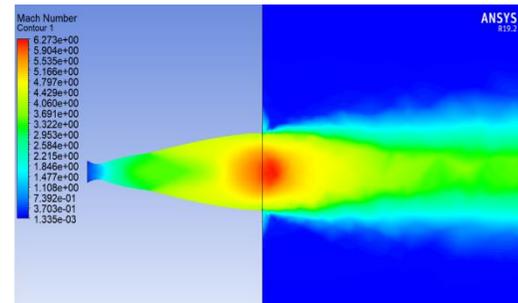


NPR= 50

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats



NPR= 100



NPR= 300

Figure (IV, 39) : Contour de nombre de Mach et la pression pour différents NPR

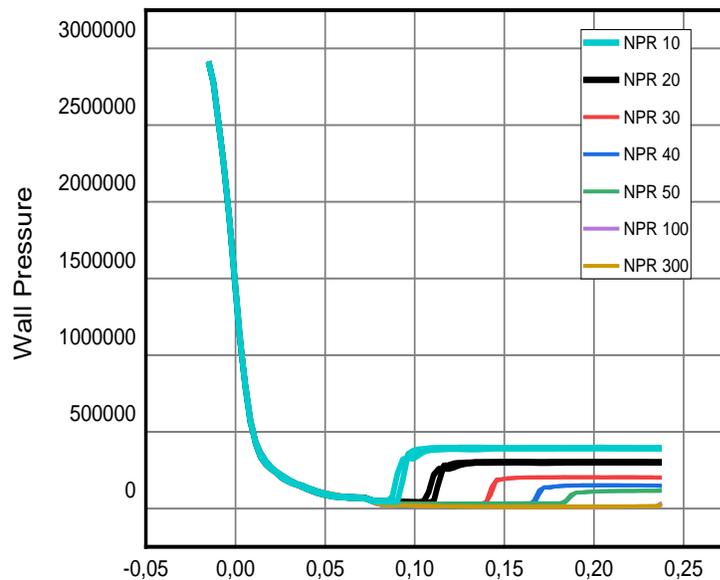
Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

D'après la figure (IV, 39) qui présente les contours de pression et de Mach pour différents rapports de pression à l'entrée (NPR), nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Régime basse altitude (Sea Level mode) : Dans ce mode de fonctionnement, seul le premier galbe de la tuyère est actif. L'écoulement se sépare immédiatement au point d'inflexion, qui est la jonction entre le premier et le deuxième galbe de la tuyère. Cela peut être observé par une variation marquée des contours de pression et de Mach à ce point de séparation.

Mode transitoire : Dans cette zone de fonctionnement, on observe le détachement de l'écoulement de la paroi du deuxième galbe. Le point de détachement est repoussé vers la section de Laval sur la paroi de l'extension de la tuyère, et cette position de détachement varie avec les différents rapports de pression à l'entrée (NPR). Cela peut être mis en évidence par des changements dans les contours de pression et de Mach dans cette région de détachement.

Régime haute altitude : Dans ce régime, l'écoulement épouse la paroi du deuxième galbe de la tuyère. Cependant, en raison de la non-adaptation de la tuyère pour les conditions de fonctionnement à haute altitude, on observe le détachement du flux à partir de cette tuyère. Ce détachement peut être identifié en examinant les contours de pression et de Mach, qui montrent des variations significatives et des signes de détachement de l'écoulement



X
Figure (IV, 40) : Différentes évolutions de pression pour différents NPR

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

La figure (IV, 40) présente les évolutions de la pression pour différents rapports de pression à l'entrée (NPR), allant de 50 à 300. En observant les courbes de pression, plusieurs observations peuvent être faites :

Expansion dans le premier galbe : Toutes les courbes de pression montrent une expansion dans le premier galbe de la tuyère. Cela signifie que la pression diminue progressivement le long de cette section, ce qui est caractéristique d'une expansion de l'écoulement. Cette expansion est généralement due à la forme de la géométrie de la tuyère, qui est conçue pour augmenter la vitesse de l'écoulement et maximiser la poussée.

Chute de pression à l'approche du point d'inflexion : À mesure que l'écoulement progresse vers le point d'inflexion, on observe une chute de pression significative. Cette diminution de pression est généralement associée à un changement brusque de la géométrie de la tuyère au niveau du point d'inflexion. L'écoulement subit une forte expansion et une accélération à cet endroit, ce qui entraîne une baisse de la pression.

Stabilisation de la pression dans le galbe d'extension : Une caractéristique intéressante est que toutes les courbes de pression deviennent constantes une fois que l'écoulement atteint le galbe d'extension de la tuyère. Cela signifie que la pression se stabilise et ne subit pas de changements significatifs jusqu'à la sortie de la tuyère. Cette stabilisation de la pression dans le galbe d'extension peut être attribuée à la géométrie spécifique de cette section, qui est conçue pour favoriser un écoulement uniforme et une évacuation optimale des gaz d'échappement.

En comparant les résultats obtenus pour le cas 2D et le cas 3D, plusieurs différences significatives émergent. Dans le cas 2D, la tuyère fonctionne en mode basse altitude pour un NPR de 40, tandis que le NPR de transition se situe à 80, au-delà duquel la tuyère bascule en mode haute altitude. En revanche, dans le cas 3D, la tuyère est en mode basse altitude pour des NPR de 10, 30 et 40, et le NPR de transition est fixé à 50, indiquant le passage au mode haute altitude pour des valeurs supérieures à 50. Ces variations mettent en évidence des différences dans les seuils de transition entre les deux cas, ce qui suggère des comportements différents pour la tuyère en fonction du nombre de Pression Totale (NPR) utilisé.

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

CONCLUSION :

La présente étude se concentre sur la simulation numérique axisymétrique et 3D pour analyser le comportement de l'écoulement dans une tuyère double galbe, en se basant sur différents paramètres thermodynamiques. Une comparaison des résultats obtenus entre les deux simulations a été réalisée pour mettre en évidence les différences significatives entre ces deux approches. Cette première partie de l'étude a permis d'observer des variations importantes dans le comportement de l'écoulement en fonction de la dimensionnalité de la simulation.

La deuxième partie de l'étude s'est focalisée sur l'impact de la variation des rapports de pression (NPR) sur l'écoulement au sein de la tuyère double galbe. Cette analyse nous a permis de comprendre les différents modes de fonctionnement de la tuyère, en passant du mode basse altitude au mode haute altitude. Les résultats obtenus ont révélé des seuils de transition spécifiques pour chaque cas, indiquant à quel NPR la tuyère bascule d'un mode à l'autre.

Les résultats obtenus dans cette étude sont très satisfaisants, car ils sont en accord avec la logique de fonctionnement des tuyères double galbe. La comparaison entre les simulations en 2D et en 3D a révélé une concordance satisfaisante, ce qui renforce la validité de nos résultats. Cette cohérence démontre que les modèles utilisés dans les simulations capturent efficacement les phénomènes physiques et les interactions complexes qui se produisent dans les tuyères double galbe.

En outre, cette comparaison a également permis de mettre en évidence les avantages et les limites des deux approches. La simulation en 2D offre une représentation simplifiée de l'écoulement, ce qui facilite la modélisation et réduit le coût computationnel. D'autre part, la simulation en 3D permet de prendre en compte davantage d'effets tridimensionnels et de capturer plus précisément les interactions complexes entre l'écoulement et la géométrie de la tuyère. Ainsi, ces deux approches se complètent mutuellement et peuvent être utilisées de manière complémentaire pour une compréhension approfondie du comportement des tuyères double galbe.

En conclusion, cette étude de simulation numérique a mis en évidence des différences significatives entre une approche axisymétrique et 3D pour l'analyse de l'écoulement dans une tuyère double galbe. De plus, l'influence du rapport de pression (NPR) a été démontrée,

Chapitre IV : Application sur les tuyères et les résultats

permettant de comprendre les différents modes de fonctionnement de la tuyère en fonction de ce paramètre. Ces résultats constituent une contribution importante à la compréhension et à l'optimisation des performances des tuyères double galbe dans des conditions de vol variées, notamment en ce qui concerne l'altitude.

En ce qui concerne les perspectives de cette étude, plusieurs suggestions peuvent être avancées :

1. Pour avoir une meilleure compréhension de la durée de transition, il serait intéressant d'envisager des calculs transitoires. Cela permettrait de suivre l'évolution de l'écoulement au fil du temps et d'observer la transition entre les modes basse et haute altitude de manière plus détaillée.
2. Une étude tridimensionnelle approfondie des effets de la couche limite sur le fonctionnement de la tuyère supersonique serait également pertinente. En prenant en compte les variations du flux à travers la couche limite, il serait possible de mieux appréhender les interactions entre l'écoulement et la géométrie de la tuyère.
3. Pour une analyse plus approfondie du comportement des écoulements dans la tuyère double galbe, il serait intéressant d'évaluer les variations des paramètres en utilisant différents modèles de turbulence dans le cadre d'une simulation tridimensionnelle visqueuse. Cela permettrait d'obtenir des informations plus précises sur les caractéristiques des écoulements supersoniques dans la tuyère.
4. L'étude du décollement de la couche limite à travers la tuyère double galbe dans des régimes élevés constitue également un sujet intéressant à explorer. En examinant les effets de ces régimes élevés, il serait possible de mieux comprendre les contraintes et les interactions particulières rencontrées dans ces conditions spécifiques.
5. Le développement d'un modèle tridimensionnel prenant en compte les aspects thermiques serait une extension importante de cette étude. En intégrant les variations de température et de transfert de chaleur dans la modélisation, on pourrait obtenir une représentation plus réaliste du comportement de la tuyère dans des conditions réelles.

CONCLUSION GENERALE

Les travaux de recherche décrits dans cette thèse nous a permis de découvrir un sujet d'actualité et de recherche qui concerne le domaine aéronautique et le spatial. Ainsi que les problèmes posés par la conception d'une tuyère supersonique peuvent être résolus par le calcul numérique.

Le travail présenté dans ce mémoire est une étude Numérique (CFD) d'un écoulement dans une Tuyère Double Galbe pour analyser le comportement de l'écoulement à travers des paramètres (Nombre de Mach, Pression et la densité) thermodynamiques afin de développer la conception pour avoir des meilleures performances.

Comme première partie du travail, on s'est intéressé tout d'abord sur la simulation axisymétrique et 3d de comportement de l'écoulement dans une tuyère double galbes et comprendre l'évolution des paramètres thermodynamiques dans ce type de tuyère. Cette étape s'est déroulée en Quatre phases dont : la création de la géométrie, le maillage de la géométrie, la résolution et la visualisation.

Les simulations (axisymétrique et 3D) présentées dans ce mémoire ont été réalisées avec le code commercial ANSYS-Fluent et les résultats obtenus pour l'écoulement d'un gaz parfait sont présentes en termes de courbes représentant les distributions de la pression et du Nombre de Mach le long de la paroi de la tuyère double galbe ainsi que la densité des gaz. Ils montrent une détente des gaz se faisant généralement pour tous les cas. Celle-ci se réalise d'une façon rapide le long de l'arc de circulaire aval du col jusqu'au point d'attache (zone d'expansion). Ce dernier, elle continue d'une manière progressive jusqu'à la sortie du premier galbe. Au point d'inflexion ce forme une onde de Prandtl-Meyer qui ramène le deuxième galbe à une pression d'adaptation tout le long de ce galbe. La partie restante ne servant essentiellement qu'à redresser l'écoulement afin de rendre axial uniforme pour avoir une poussée maximale. Le nombre de Mach obtenu à la sortie est 5,4, soit un gain traduit en termes de coefficient de poussée de la tuyère. L'évolution des paramètres thermodynamiques entre les deux simulations sont analysés et comparés. Cela nous permettra d'observer et de mettre en évidence les différences significatives entre les deux approches. Les résultats obtenus pour les deux approches sont très proches.

Comme deuxième partie du travail, on s'est intéressé sur l'influence de la variation des rapports de pression (NPR) sur l'écoulement dans une tuyère double galbe. Le but de cette partie est de

Conclusion générale

comprendre le fonctionnement de la tuyère en deux modes en passant du mode basse altitude (Sea level mode) au mode de transition puis le mode haute altitude (high Altitude mode).

L'avantage principal de cette tuyère est basé sur son fonctionnement à deux régimes différents sans aucune perturbation ou perte générée par le décollement de l'écoulement à la sortie de la tuyère.

A l'issue de ce travail de nombreuses perspectives apparaissent :

- Le décollement de la couche limite à travers la tuyère double galbe à de forts régimes désigne un thème intéressant à traiter.
- Développer le modèle tridimensionnel qui prend en compte les aspects thermiques.
- Utiliser des modèles de turbulences pour l'approche numérique afin d'avoir une analyse plus fine sur le comportement des écoulements dans la tuyère supersonique.
- Des tests expérimentaux pour valider d'une manière décisive une telle approche.

Enfin , nous dirons que ce modeste travail nous a permis de bien comprendre le comportement des écoulements dans des tuyères supersoniques et manipuler un code de calcul très puissant qui permet d'effectuer des recherches à moindre coût.

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]GEORGE P. SUTTON, OSCAR BIBLARZ .Rocket Propulsion Elements , Ninth Edition page 46-47

[2]GEORGE P. SUTTON, OSCAR BIBLARZ .Rocket Propulsion Elements ,Ninth Edition page 85-86-87

[3]Bertrand Gille : Histoire des techniques, Gallimard, coll. «La Pléiade» ‘, 1978 – (ISBN 978-2-07-010881-799)

[4]SHIVANGE KHARE et UJJWAL K SAHA .Department of energy and process engineering.Norwegiauniversity of science and technology 7491 Trondheim. Norway

[5]Ostlund J 2002 flow processes in rocket engine nozzles with focus on flow separation and side loads. Ph D. Dissertation, Royal Institute of Technology.

[6]Benecke T and Quick A 1957 History of German Guided missiles development.No. 20.Verlag E. Appelhans and Co.

[7]Anatoly Zak, « People >Tsiolkovsky> Konstantin Tsiolkovsky's work in Kaluga » [archive], sur russianspaceweb.com

[8]Becklake ,Jhon, The V2 Rocket –a Convergence of Tecknologies ?, 1995

[9]RAO, G.V.R – Exhaust Nozzle Contour For Optimum Thrust, Marquardt aircraft Co, Van Nuys , Calif page 377 – 382 ,Jaune 1958

[10]GEORGE P. SUTTON, OSCAR BIBLARZ . Rocket Propulsion Elements , Ninth Edition page 14-17

[11]Robert B. Dillaway , A Philosophy for Improved Rocket Nozzle Design, Rocketdyne, A Division of North American Aviation, Canoga Park, Calif, 1957, JET Propulsion 1088-1092

[12]Landsbaum Ellis M 1960 Contour Nozzles, jet propulsion laboratory, California Institute of Technology Pasadena calif, ARS Journal page 224-248

Les références bibliographiques

- [13]Berman K and Crimp F W 1961 Performance Of Plug Type Rocket Exhaust nozzle ARS J page 18-19-20
- [14]J H. Ahlberg, S. Hamilton, D. Migdal, E.N.Nilson, Truncated Perfect Nozzles in Optimum Nozzle Design, United Aircraft Corp. East Hartford, Conn.
- [15]Darwell H M and Badham H 1963 Shock formation in conical supersonic nozzles, AIAA J. 1 1932-1934
- [16]Sunley H L G and Ferriman V N 1964 jet separation in conical nozzles .Aeron. J. 68. 808-817
- [17]Migdal D and Kosson R 1965 Shock predictions in conical nozzles AAIAA J.3 1554-1556
- [18]Hoffman J D and Lorenc S A 1965, A parametric study of gas particle flows in conical nozzles AIAA J.3 103-106
- [19]Wehfer S and Moger W C 1970 Transonic Flow in conical convergent and convergent – divergent nozzles with nonuniform inlet conditions.In 6th Propulsion Joint Specialist Conference, San Diego, California 70-635.
- [20]SHIVANGE KHARE et UJJWAL K SAHA .Department of energy and process engineering.Norwegian university of science and technology 7491 Trondheim. Norway
- [21]Pilinski, Cyril, nebbache Abderrahmane, Flow separation in a truncated ideal contour nozzle 2004 page 03-08
- [22]Khan A A and Shembharkar T R 2008 Viscous flow analysis in a convergent- divergent nozzle.In Proceedings of the International Conference on Aerospace Science and Technology Bangalore India.
- [23]Chloe Genin, Ralf Stark and Drik Schneider, Transitional Behavior of Dual Bell Nozzles , contour Optimization German Aerospace, Lampoldshausen, D-74239, Germany.
- [24]Jia ,Ruyan, Jiang, Zhenyu, Xiang, Min, Zhang, Weihua. TH=here Dimensional Numerical Study of The Conical Nozzle Side Loads During Staging , 2016 J.Aeosp .Eng. 04016038

Les références bibliographiques

- [25] A Balabel, A M Hegab, M Nasr, Samy M. El Behery. Mechanical Power Engineering , Faculty of Engineering Menoufiya University , Shebin EL Kom Egypt 2011
- [26] Schneider D and Genin C 2016 Numerical investigation of flow transition behavior in cold flow dual bell rocket nozzles J Propuls Power 32 1212-1220
- [27] J.A Zhang et B. Shotorban et SijunZhang , Numerical Experiment of Aeroelastic Stability For a Rocket Nozzle, J AerospEng, 2017
- [28] Yohann Perrot , etude mise au point et validation de modelesturbulance compressible, These de doctorat, INSA de Rouen 2006
- [29] Mr. Bayou Fayssal , Mlle. Beneddine Amina, mémoire de fin d'études, calcul de l'écoulement supersonique à travers une tuyère a corps central bidimensionnelle type Plug Nozzle, 2014-2015
- [30] WANG? Chang-hui, Lui Yu , LIAO.Y, Studies on Aerodynamic Behavior and Performance of Aerospike Nozzles.
- [31] G. Hagemann, H. Immich , T. Van Nguyen, G. E. Dumnov , Advanced Rocket nozzles, Journal of Propulsion and Power vol.14 No 5, 1998
- [32] I. BOUMRAR, étude d'une tuyère convergente – divergente d'un moteur d'aviation, mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Mécanique.
- [33] conception et mise en operation de l'instalation supersonique a haute temperaturememoire presente a la faculte des etudessuperieurs de luniversite Laval dans le cadre du programme de maitrise en geniemeccanique, departement de geniemeccanique, Quebec
- [34] Jhon D Anderson , Modern Compressible Flow with Historical Perspective , series in Aeronautical and Aerospace Engineering , university of Maryland
- [35] Les écoulements compressibles, IUT – GTE – Marseille, 2011-12
- [36] Nadir BEKKA, thèse de doctorat, problématique des phénomènes des ondes de choc dans les tuyères supersoniques et leur interaction avec la structure, université D'Evry Val D'Essonne
- [37] Jhon D Anderson, Fundamentals of Aerodynamics, Sixth Edition

Les références bibliographiques

[38] Développement de méthode de conception de tuyère supersonique de propulsion, Kbab Kamel, Mémoire de Master, spécialité propulsion 2012

[39] Conception des tuyères supersoniques à haute température par la méthode des caractéristiques par Mr. ABADA OMAR, mémoire de Magister en aéronautique 2006.