

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique



Université SAAD DAHLEB de Blida

Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER

Spécialité : **Propulsion aérospatiale**

**THÈME : TUYÈRE DOUBLE  
GALBE PLANE À CORPS  
CENTRAL**

Dirigé par :

**Mr KBAB Hakim**

**Mr HAIF Sidali**

Réalisé par :

**DJENAD Rachida**

**ZAKHROUF Sara**

**Année Universitaire 2022/2023**

## Résumé

Les tuyères double galbe sont considérées comme une solution pour maximiser l'efficacité à haute altitude, tout en évitant les charges latérales dangereuses à des altitudes plus basses. Une tuyère à double galbe se compose de deux contours différents, le premier fonctionne à basses altitudes par contre le deuxième est destiné à fonctionner à hautes altitudes. Ces deux contours sont reliés par un point de jonction. La présente étude s'est concentrée sur la conception du contour de la tuyère double galbe plane. Le profil de la tuyère de base c'est un profil d'une tuyère Plug Inversée sans modification des Rayons (Contrairement au cas d'une tuyère axisymétrique). Car en 2D les équations restent valables quelle que soit le repère. La méthode de conception pour la tuyère Plug est basé sur la méthode approximative Angelino. En utilisant la méthode des caractéristiques appliquée pour une onde de détente de Prandtl-Meyer d'intensité  $P2/P1$  au point de jonction J, une de courant isobare est obtenue. Le profil du deuxième contour est calculé pour une pression paroi constante  $P2$ . Ce profil coïncide avec la ligne de courant isobare. À l'aide du logiciel commercial ANSYS Fluent nous avons étudié l'effet de la hauteur du corps et de l'angle d'extension sur la transition entre les deux modes de fonctionnement.

## Abstract

Dual bell nozzles are considered a solution to maximize efficiency at high altitudes, while avoiding dangerous lateral loads at lower altitudes. A dual bell nozzle consists of two different contours, the first operates at low altitudes while the second is intended to operate at high altitudes. These two contours are connected by a junction point. This study focused on the contour design of the flat dual bell nozzle. The profile of the basic nozzle is a profile of an inverted Plug nozzle without modification of the spokes (Unlike the case of an axisymmetric nozzle). Because in 2D the equations remain valid whatever the reference frame. The design method for the Plug nozzle is based on the approximate Angelino method. Using the characteristic method applied for a Prandtl-Meyer expansion wave of intensity  $P2/P1$  at the junction point J, an isobaric current is obtained. The profile of the second contour is calculated for a constant wall pressure  $P2$ . This profile coincides with the isobaric current line. Using the commercial ANSYS Fluent software we investigated the effect of body height and extension angle on the transition between the two operating modes.

## ملخص

تعتبر الفوهات (double galbe) حلاً لتحقيق أقصى قدر من الكفاءة على ارتفاعات عالية، مع تجنب الأحمال الجانبية الخطرة على ارتفاعات منخفضة. تتكون الفوهة (double galbe) من محيطين مختلفين، الأول يعمل على ارتفاعات منخفضة بينما يهدف الثاني إلى العمل على ارتفاعات عالية. يرتبط هذان المخططان بنقطة تقاطع. ركزت هذه الدراسة على التصميم الكنتوري للفوهة (double galbe) المسطحة. ملف تعريف الفوهة الأساسية هو ملف تعريف لفوهة التوصيل المقلوبة دون تعديل نصف القطر (على عكس حالة الفوهة المحورية المتماثلة). لأنه في D2 تظل المعادلات صالحة مهما كان الإطار المرجعي. تعتمد طريقة تصميم فوهة (Plug) على طريقة Angelino التقريبية. باستخدام الطريقة المميزة المطبقة على موجة تمدد Prandtl-Meyer ذات الكثافة  $P2 / P1$  عند نقطة التقاطع J، يتم الحصول على تيار متساوي الضغط. يتم حساب ملف تعريف المحيط الثاني لضغط جدار ثابت P2. يتزامن هذا الملف الشخصي مع خط التيار متساوي الضغط. باستخدام برنامج ANSYS Fluent التجاري، قمنا بالتحقيق في تأثير ارتفاع الجسم وزاوية التمديد على الانتقال بين وضعي التشغيل.

## Remerciement

Nos remerciements vont premièrement à ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la volonté, la patience qu'il nous donnés pour mener à terme ce travail.

En premier lieu, Nous remercions notre promoteur KBAB HAKIM et notre Co-promoteur HAIF SIDALI pour toute l'aide qu'ils nous ont apporté durant toute la durée de la réalisation de ce mémoire, pour leurs suivis et leurs conseils.

Nos sincères remerciements vont aussi à monsieur le président et messieurs les membres du jury pour avoir expertisé notre travail et nous avoir honoré par leurs présences.

En fin, que tous ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce long travail, trouvant ici l'expression de nos remerciements les plus sincères.

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail, à ceux qui sont mes plus chers au monde mon père et ma mère qui m'ont accordé leur confiance et m'ont encouragé durant toute ma vie.

A mon grand frère et ma petite sœur qui m'ont toujours donné de l'amour.

A tous mes enseignants dès le début de mon parcours jusqu'à la fin.

A ma copine qui m'a partagé tout effort pour accomplir ce travail, DJENAD RACHIDA.

A mes chères amies d'enfance qui m'ont soutenu et partagé avec moi des impérissables.

**Sara**

Je Dédie ce travail synonyme de concrétisation de tous mes efforts fournis ces dernières années à mes chers parents qui m'ont accordé leur confiance et m'ont encouragé durant toute ma vie, c'est grâce à eux que je suis arrivée là où je suis.

A mon cher frère et chères sœurs bien aimés qui m'ont soutenu, aidé et encouragé.

A ma collègue Sara ZAKHROUF qui m'a accompagné et soutenu tout au long de ce projet.

A tous mes compagnons dans la vie.

**Rachida**

# Table des matières

**Résumé**

**Remerciement**

**Dédicaces**

**Table de matières**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Nomenclature**

Résumé .....	ii
Remerciement .....	iv
Dédicaces .....	iv
Introduction générale : .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les tuyères</b>	
I.Introduction : .....	5
II.Types des tuyères : .....	5
II.1Tuyères conventionnelles : .....	5
Tuyère conique (conic nozzle) : .....	5
Tuyère à noyau central (central core nozzle) : .....	6
Tuyère à contour profilé (contoured nozzle) : .....	7
Tuyère annulaire (annular nozzle) : .....	8
II.2Tuyères innovantes : .....	9
Profil idéal tronqué TIC (truncated ideal contour) : .....	9
Les tuyères optimisées en poussée TOC (thrust optimized contour) : .....	9
Les tuyères optimisées parabolique TOP (thrust optimized parabolic) : .....	10
Tuyères orientables : .....	10
Tuyère double galbe (dual bell nozzle) : .....	11
Tuyères extensibles : .....	12
III.Définition de la tuyère supersonique : .....	13
IV.Principaux paramètres de performance : .....	14
V.Application des tuyères : .....	16

## **Chapitre II : méthodologie de conception des tuyères supersonique**

I.Introduction : .....	19
------------------------	----

II.Conception de la tuyère :.....	20
II.1Le premier galbe : .....	20
II.1.1Formulation mathématique du problème : .....	24
II.2.Le deuxième galbe : .....	32
II.2.1Procédure d'intégration numérique : .....	32
II.2.2La méthode de prédiction et de correction d'EULER :.....	34
II.2.3Les équations aux différences finis :.....	35
II.2.4Calcul d'un point interne : .....	35
II.2.5Calcul d'un point sur l'axe de symétrie : .....	39
II.2.6Calcul pour un point du jet libre : .....	40
II.2.7Le processus :.....	41

### **Chapitre III : calcul numérique**

I.Introduction : .....	45
II.Logiciels populaires pour l'analyse CFD : .....	46
III.Modèle de calcul Ansys19.0 :.....	47
IV.Techniques d'analyse numérique : .....	47
IV.1La méthode des différences finies (FDM) :.....	48
IV.2La méthode des éléments finis : (FEM).....	49
IV.3La méthode des volumes finis : (FVM).....	49
V.L'organisation d'un projet de simulation CFD : .....	51
VI.Les étapes d'une simulation : .....	52
VI.1La Géométrie :.....	52
VI.2Le Maillage :.....	52
VI.2.1Notions de Maillage : .....	52
VI.2.2Types de maillage :.....	53
VI.2.3Qualité du Maillage : .....	56
VI.3La Résolution :.....	58
VII.La modélisation des écoulements turbulents :.....	59
VII.1Simulation Direct Numérique (DNS).....	59
VII.2Simulation des grandes échelles (LES).....	59
VII.3Modélisation statistique de la turbulence (RANS).....	60
VII.4Les modèles de turbulence utilisés par la méthode de RANS.....	60

### **Chapitre IV : résultats et interprétations**

Introduction : .....	64
I.CAS D'ETUDE : TUYERES EXPANSION-DEFLEXION.....	65

I.1 Description de la tuyère étudiée : .....	65
I.1.1 Calculs non visqueux : .....	66
II. COMPARAISON ENTRE ED 2 ET CN : .....	73
II.1 Description de la tuyère : .....	73
II.2 Comparaison de poussée : .....	78
III. TUYERE DOUBLE GALBE : .....	78
III.1 TUYERE AVEC $r=0.7$ cm et $\alpha=14$ : .....	78
III.1.1 Géométrie : .....	78
III.1.2 Conditions aux limites : .....	79
III.2 L'effet du rayon : .....	80
III.2.1 : Les géométries : .....	80
III.3 L'effet de l'angle : .....	90
III.3.1 Les Géométries : .....	90
CONCLUSION.....	100

## Liste des figures

Figure I. 1:tuyères coniques.....	6
Figure I. 2:tuyère à noyau central.....	7
Figure I. 3:tuyère à contour profilé.....	8
Figure I. 4:tuyère annulaire.....	9
Figure I. 5:profil des tuyères TIC et TOC.....	10
Figure I. 6:Tuyère orientable.....	11
Figure I. 7:tuyère double galbe.....	12
Figure I. 8:tuyère extensible.....	12
Figure I. 9:diagramme simplifié de plusieurs configurations des tuyères et de leurs effets de débit. [18].....	13
Figure I. 10:schéma de la tuyère supersonique.....	14
Figure II. 1:a) tuyère double galbe bidimensionnel b) Tuyère double galbe annulaire.....	21
Figure II. 2:profils approximatifs d'une tuyère double galbe.....	21
Figure II. 3:Comparaison des solutions approximatives et exactes dans la conception d'une tuyère double galbe.....	23
Figure II. 4:Géométrie de la tuyère double galbe.....	24
Figure II. 5:Écoulement au col et à la section de sortie.....	24
Figure II. 6:Présentation de l'angle $\psi$ .....	24
Figure II. 7:Angle de Mach au niveau du col et de la section de sortie.....	25
Figure II. 8:Discrétisation de la zone d'expansion.....	25
Figure II. 9:Paramètres d'une ligne de Mach intermédiaire reliant les points A et i (i=2, 3, ..., N).....	26
Figure II. 10:Segment d'une tuyère double galbe.....	30
Figure II. 11:Schéma de calcul par différences finis pour la méthode des caractéristiques.....	33
Figure II. 12:schéma de calcul par différences finis pour la méthode des caractéristiques.....	33
Figure II. 13:La méthode directe.....	36
Figure II. 14:Point intérieur sur l'axe de symétrie.....	39
Figure II. 15:Point axiale.....	39
Figure II. 16:Point du jet libre.....	40
Figure II. 17:processus d'unité d'expansion Prandtl-Meyer.....	42
Figure II. 18:Étendue du champ déterminée par l'onde d'expansion Prandtl-Meyer au niveau de la lèvre de sortie de la tuyère.....	42
Figure II. 19:Onde de choc oblique dans un écoulement de tuyère sur-expansé....	43
Figure II. 20:Détermination du champ d'écoulement dans le jet.....	43
Figure III. 1:Domaines d'applications de la CFD.....	45
Figure III. 2: maillage uniforme suivant x.....	48
Figure III. 3: Volume fini à une dimension.....	49
Figure III. 4: composants du maillage.....	52
Figure III. 5: types du maillage en 2D et 3D.....	52
Figure III. 6: Maillage structuré dans une tuyère double galbe.....	53
Figure III. 7: maillage non structuré autour d'un profil.....	54
Figure III. 8: maillage Hybride (structuré et non structuré).....	55
Figure III. 9:la modélisation d'un jet turbulent par différentes approches.....	59



Figure IV. 1:Géométrie de la tuyère E-D.....	64
Figure IV. 2:iso mach de la tuyère E-D (non visqueux) .....	65
Figure IV. 3:iso mach de la tuyère E-D (non visqueux) .....	65
Figure IV. 4:pression de la tuyère E-D (non visqueux) .....	66
Figure IV. 5: graphe de pression .....	66
Figure IV. 6:température de la tuyère E-D (non visqueux) .....	68
Figure IV. 7: courbe de température .....	68
Figure IV. 8:densité de la tuyère E-D (non visqueux) .....	69
Figure IV. 9: courbe de densité.....	69
Figure IV. 10:Iso-Mach (NPR=10).....	70
Figure IV. 11:Iso-Mach (NPR=36.7).....	70
Figure IV. 12:Iso-mach (NPR=50) .....	71
Figure IV. 13:Pression calcul visqueux.....	71
Figure IV. 14:le profil de la tuyère E-D et la tuyère classique.....	72
Figure IV. 15: iso mach de la tuyère classique (NPR=7) .....	74
Figure IV. 16: iso mach de la tuyère E-D (NPR=7) .....	74
Figure IV. 17:iso mach de la tuyère classique (NPR=40) .....	74
Figure IV. 18: iso mach de la tuyère E-D (NPR=40) .....	74
Figure IV. 19: pression pour la tuyère classique.....	76
Figure IV. 20: pression pour la tuyère E-D .....	76
Figure IV. 21: Géométrie de la tuyère double galbe 0.7.....	79
Figure IV. 22: Configuration des 3 tuyères .....	80
Figure IV. 23:iso-Mach (r=0.4).....	81
Figure IV. 24: iso-Mach (r=1).....	81
Figure IV. 25: iso-Mach (r=0.7).....	81
Figure IV. 26:iso-Mach (r=0.4).....	82
Figure IV. 27: iso-Mach (r=1).....	82
Figure IV. 28:iso-Mach (r=0.7).....	83
Figure IV. 29:iso-Mach (r=0.4).....	84
Figure IV. 30:iso-Mach (r=1).....	84
Figure IV. 31:iso-Mach (r=0.7).....	84
Figure IV. 32:iso-Mach (r=0.4).....	85
Figure IV. 33: iso-Mach (r=1).....	85
Figure IV. 34: iso-Mach (r=0.7) .....	86
Figure IV. 35:iso-Mach (r=0.4).....	87
Figure IV. 36: iso-Mach (r=1).....	87
Figure IV. 37:: iso-Mach (r=0.7).....	87
Figure IV. 38: Courbes de Pression pour le rayon =0.4 .....	88
Figure IV. 39:Courbes de Pression pour le rayon =1 .....	88
Figure IV. 40: les courbes de pression pour différents NPR (r=0.7) .....	88
Figure IV. 41: courbes de coefficient de poussée.....	89
Figure IV. 42: Configuration des 3 tuyères .....	90
Figure IV. 43:iso-mach ( $\alpha =7$ ).....	91
Figure IV. 44:iso-mach ( $\alpha =21$ ).....	91
Figure IV. 45: iso-Mach ( $\alpha=14$ ) .....	91
Figure IV. 46: iso-mach ( $\alpha =7$ ).....	93
Figure IV. 47: iso-mach ( $\alpha=21$ ).....	93
Figure IV. 48: iso-mach ( $\alpha=14$ ).....	93
Figure IV. 49: iso-mach ( $\alpha =7$ ).....	94
Figure IV. 50: iso-mach ( $\alpha =21$ ).....	94
Figure IV. 51: iso-Mach ( $\alpha=14$ ) .....	95

<b>Figure IV. 52: iso-mach (<math>\alpha=7</math>)</b> .....	<b>95</b>
<b>Figure IV. 53: iso-mach (<math>\alpha=21</math>)</b> .....	<b>95</b>
<b>Figure IV. 54: iso-Mach (<math>\alpha=14</math>)</b> .....	<b>96</b>
<b>Figure IV. 55: iso-mach (<math>\alpha =7</math>)</b> .....	<b>97</b>
<b>Figure IV. 56: iso-mach (<math>\alpha =21</math>)</b> .....	<b>97</b>
<b>Figure IV. 57: iso-Mach (<math>\alpha=14</math>)</b> .....	<b>97</b>
<b>Figure IV. 58: Courbes de Pression Pour <math>\alpha=7^\circ</math></b> .....	<b>98</b>
<b>Figure IV. 59: Courbes de pression Pour <math>\alpha=21^\circ</math></b> .....	<b>98</b>
<b>Figure IV. 60: les courbes de pression pour <math>\alpha=14^\circ</math></b> .....	<b>99</b>
<b>Figure IV. 61: courbes de coefficient de poussée</b> .....	<b>100</b>

## Liste des tableaux :

<b>Tableau III. 1: calcul de facteur de distorsion</b> .....	<b>56</b>
<b>Tableau III. 2 : Qualité du maillage</b> .....	<b>56</b>
<b>Tableau IV. 1 : la poussée des deux tuyères (classique et E-D)</b> .....	<b>78</b>
<b>Tableau IV.2 : valeurs des NPR et Pout correspondantes</b> .....	<b>79</b>

## **Nomenclatures**

**C<sub>p</sub>** : chaleur spécifique

**λ** : La perte de poussée

**F** : la force de poussée

**P** : La pression

**P<sub>a</sub>** : Pression ambiante [Pa]

**A<sub>e</sub>** : La section de sortie

**C<sub>F</sub>** : Coefficient de poussée

**A<sub>t</sub>** : La surface du col

**Ċ** : La vitesse caractéristique

**V<sub>eff</sub>** : La vitesse effective

**g** : accélération de la pesanteur

**I<sub>s</sub>** : L'impulsion spécifique

**μ** : L'angle de mach

**v** : La fonction de Prandtl Meyer

**θ** : Angle

**M** : nombre de mach

**M<sub>s</sub>** : nombre de mach à la sortie

**γ** : Rapport de chaleurs spécifiques à pression et à volume constant

**T** : température

**ρ** : Densité

**u** : Composante axiale du vecteur vitesse

**v** : Composante radiale du vecteur vitesse

**C<sub>+</sub>** : caractéristique montante

**C<sub>-</sub>** : caractéristique descendante

**r** : rayon

## **Abbreviations:**

**CFD**: computational fluid dynamics

**TIC:** Truncated Ideal Contour

**TOC:** Thrust Optimized Contour

**TOP:** Thrust Optimized Parabola

**CAO :** conception assistée par ordinateur

**2D :** deux dimensions

**3D :** trois dimensions

**E-D :** Expansion – Deflexion

**NPR :** Nozzle Pressure Ratio

## Introduction générale :

Les conceptions aéronautiques dès ces débuts en 1935 étaient basées sur les expériences seulement [1] les résultats expérimentaux qui étaient utilisés pour la prédiction des caractéristiques des écoulements exigeaient un coût très élevé et prenaient beaucoup de temps. Quelques années après, les chercheurs ont pensé de développer leurs études numériquement afin d'améliorer les performances des tuyères supersoniques, et ils sont finis par inventer plusieurs types de tuyères grâce à une méthode développée appelée méthode des caractéristiques. Aujourd'hui les codes numériques occupent de plus en plus de grande importance et d'utilisation pour la réalisation des projets avec un moindre coût par rapport aux méthodes expérimentales.

La révolution étonnante dans les méthodes d'études théoriques pour les sciences de l'ingénieur et surtout l'aérodynamique a fait naître une nouvelle discipline importante dans la conception et l'optimisation des véhicules aériens, c'est l'aérodynamique numérique. [2]

Il existe deux branches essentielles pour l'aérodynamique : Externe et interne. L'aérodynamique externe permet l'étude de l'écoulement en présence de l'air libre, comme les écoulements autour des profils d'ailes. L'aérodynamique interne est consacrée à l'étude des écoulements internes des fluides comme les moteurs et les tuyères.

Afin d'atteindre des vitesses supersoniques dans le domaine aéronautique, il est devenu essentiel de calculer les caractéristiques aérodynamiques des tuyères pour la conception et l'analyse du régime de fonctionnement des turbomachines.

La tuyère conique est la tuyère la plus simple dans sa conception. Cependant, elle donne des pertes de performance considérables diminuant la poussée à cause de la divergence de l'écoulement à la sortie de la tuyère. Parmi les méthodes employées proposées pour corriger ce problème est celle de RAO (1958) qui sert à orienter l'écoulement à la sortie à une direction axiale en utilisant des sections divergentes sous forme de "cloche".

Le rôle principal des tuyères est de faire accélérer les gaz éjectés de la chambre de combustion à des vitesses supersoniques, en transformant l'énergie calorifique en une énergie cinétique. La tuyère généralement se divise en trois sections qui permettent le passage de l'écoulement à différents régimes : La partie convergente où l'écoulement est à des vitesses subsoniques, le col où le régime est sonique et le divergent où l'écoulement devient supersonique. C'est la configuration la plus simple qui prend le nom de la tuyère

de Laval. Cette division bien étudiée sert à déterminer la poussée totale générée et le champ d'écoulement dans chaque région, qui exige différentes méthodes d'analyse. Les méthodes utilisées pour ses calculs :

- méthodes analytiques.
- méthode expérimentale.
- méthode numérique CFD (computational fluid dynamics).

La poussée dépend principalement de l'accélération des gaz éjectés de vitesses subsoniques à des vitesses supersoniques à travers la section de sortie de la tuyère.

En effet, les fluides compressibles ou incompressibles sont omniprésents dans de nombreux domaines (transport, industrie...), ils sont caractérisés par leur propriété de conduction de la chaleur, ainsi de convection de l'énergie : Énergie cinétique, énergie potentielle, pression, énergie interne, etc. La discipline qui étudie ces fluides est relativement complexe en termes de résolution et de temps de calcul. Heureusement, il existe des situations particulières où on peut simplifier les équations de base et leur résolution, comme par exemple l'écoulement monodimensionnel pour un gaz parfait en régime permanent.

Pour des écoulements compressibles supersoniques, les performances et la fiabilité des tuyères convergentes divergentes sont influencées par plusieurs phénomènes physiques : Onde de choc, décollement de la couche limite, jet supersonique, l'écoulement de retour.... Ces difficultés peuvent être causées par différents problèmes : Complexité physique, complexité géométrique, la modélisation des phénomènes physiques (cohabitation, diversité et interaction), les méthodes numériques sont les moyens de calcul nécessaire pour ce type d'écoulements.

Pendant le vol d'un lanceur qui se déplace verticalement, la pression atmosphérique pose des grands problèmes technologiques en diminuant en fonction d'altitude. Pour cela les chercheurs ont développé plusieurs configurations des tuyères supersoniques afin d'obtenir une meilleure performance, cette dernière peut se réaliser par l'égalité entre la pression à la sortie de la tuyère et la pression atmosphérique.

En réalité, avec l'augmentation de la température totale de la chambre de combustion, la chaleur spécifique CP et le rapport gamma commence à varier. Le gaz ici et nommé un gaz calorifiquement imparfait [1]

### **Organisation du mémoire :**

L'étude de problématique envisagée est devisée en quatre chapitres.

Le premier chapitre contient des généralités sur les différents types de tuyères, leurs principaux paramètres de fonctionnement ainsi que leurs applications.

Le deuxième chapitre est consacré à la méthodologie de conception des tuyères supersonique.

Le troisième chapitre est dédié aux calculs numériques, on décrit les méthodes de discrétisation numériques, les différents types de maillage ainsi que les différentes approches pour la modélisation des turbulents (DNS, LES, RANS).

Dans le quatrième chapitre qui représente le dernier chapitre, on présente tous les résultats obtenus par le Logiciel Ansys fluent avec l'interprétation des différents paramètres (Nombre de Mach, Pression, vitesse).

**CHAPITRE I :**  
**GÉNÉRALITÉS SUR**  
**LES TUYÈRES**



## I. Introduction :

Le développement rapide effectué dans le domaine de la propulsion est étroitement lié au développement de l'analyse des phénomènes aérothermodynamique dans les moteurs, résultant des études d'écoulement dans plusieurs types de tuyères et leurs différentes configurations qui constituent des éléments importants dans les lanceurs.

Grâce à sa forme géométrique et sa simplicité, la tuyère a été considérée comme un organe essentiel qui assure le fonctionnement du moteur à un régime donné, et ces méthodes de calcul évoluées permettent de répondre à cette condition avec résultats satisfaisants.

## II. Types des tuyères :

Bien que le principe de fonctionnement des tuyères supersonique reste le même, il existe une grande gamme de type des tuyères ainsi une grande variété d'écoulements possibles correspondants. Dans un écoulement non visqueux chaque tuyère possède son propre comportement concernant son écoulement interne et présente une différente performance.

La géométrie de la tuyère joue un rôle important, à la fois sur le plan de la conception (rapport performance/ encombrement) que sur le pilotage de la position du décollement en régime de forte sur-détente. Le but principal de l'invention de ces types actuels est de perfectionner le maximum ses performances et de résoudre certains problèmes tels que le poids, la longueur, les charges latérales, la non axialité de l'écoulement à la sortie...

### II.1 Tuyères conventionnelles :

#### Tuyère conique (conic nozzle) :

Les tuyères coniques sont les plus utilisés pour les petit moteurs propulsifs grâce à sa simplicité de sa conception, sa construction qui est sous forme d'un cône et de la réalisation de leur divergent, elles sont généralement inclinées d'un angle allant de 15 à 30 degrés, cette inclinaison engendre une perte considérable de poussée due à la divergence de l'écoulement (direction non axial) à la sortie. Ces tuyères équipent les petits moteurs qui produisent de faible poussée (par exemple pour le contrôle d'altitude des satellites). Les missiles et les propulseurs à poudres utilisent également ce type de profil.

Le coefficient de poussée pour ce type de tuyère selon [3] est égal à :

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



**Figure I. 1:tuyères coniques**

Tuyère à noyau central (central core nozzle) :

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. Cependant son poids et sa longueur représentent un grand problème concernant son intégrité sur le lanceur.

Le calcul de profil est fait par la méthode de Rao G.V.R[4]. En haute altitude ce type possède les mêmes performances qu'une tuyère conventionnelle ayant même rapport de section [5].

Il existe également d'autres types de tuyères à corps central :

- Tuyère à corps central tronqué.
- Tuyère plane à corps central tronqué.



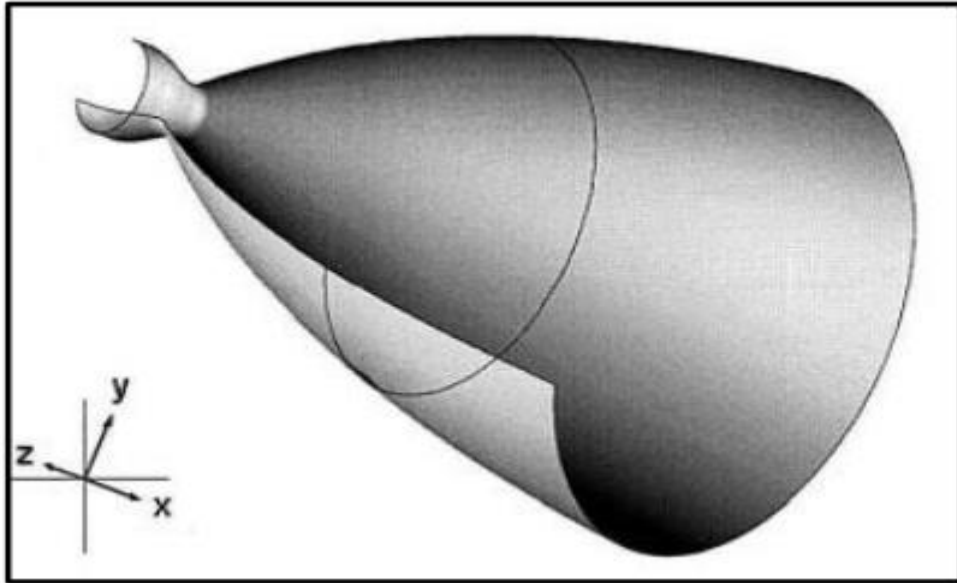
**Figure I. 2:tuyère à noyau central**

Tuyère à contour profilé (contoured nozzle) :

Afin d'améliorer les performances des tuyères de propulsion, les constructeurs ont proposé l'application de la méthode des caractéristiques qui peut fournir une poussée optimale en faisant tourner le contour de divergent près du col qui va donner des valeurs de divergence relativement importantes 20 à 50 degrés, et par cela la partie du divergent peut ramener l'écoulement à une direction axiale pour compenser la détente manquée. C'est justement le but de cette conception.

Il existe plusieurs formes pour ce type de tuyère dont les deux formes les plus importantes sont :

- tuyère à détente centrée.
- tuyère à zone d'expansion.



**Figure I. 3:tuyère à contour profilé**

Tuyère annulaire (annular nozzle) :

La tuyère annulaire comme son nom l'indique, elle est formée d'un espace sous forme d'anneau où la combustion se produit autour de la base de la tuyère et les gaz d'échappement en aval du col se détendent, cet anneau se forme d'un bouchon central qui bloque l'écoulement et d'une paroi externe divergente. Suite de la configuration de ce type, le gaz d'éjection s'écoule d'une direction non axiale ce qui implique une perte de poussée mais moins considérable que celle de la tuyère conique de même rapport de section et même longueur. Cette tuyère est la moins utilisée par rapport aux autres types à cause de sa plus grande complexité de conception.

La perte de poussée résultante est exprimée par la relation suivante :

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

Avec :

$\alpha$  : L'angle formé par l'axe de la tuyère et la paroi extérieure

$\beta$  : L'angle formé par l'axe de la tuyère et de la paroi intérieure du bouchon



**Figure I. 4:tuyère annulaire**

## II.2 Tuyères innovantes :

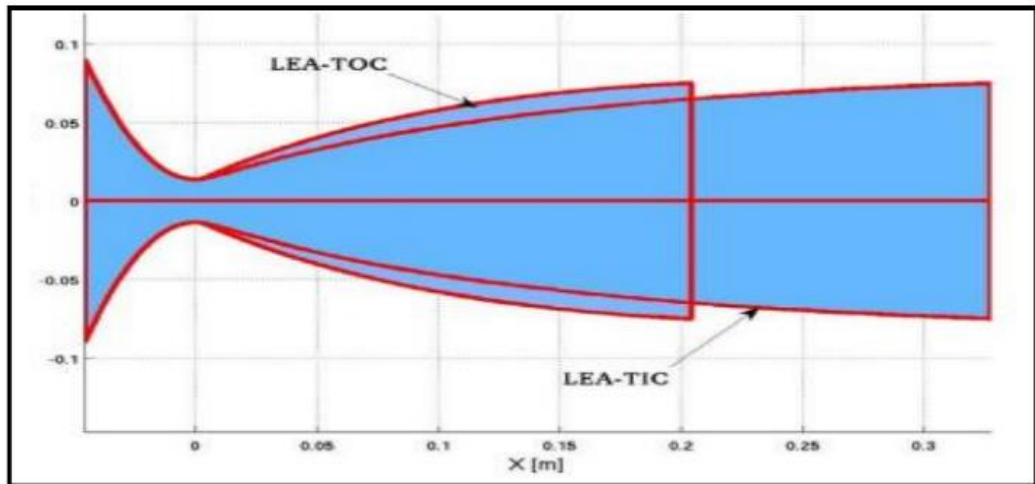
### Profil idéal tronqué TIC (truncated ideal contour) :

Malgré la nécessité des tuyères longues pour la production d'un écoulement 1D, ils ne sont pas adaptés pour les applications aérospatiales à cause des problèmes du poids et des structures. Au contraire TIC (qui sont définies par la méthode des caractéristiques) sont des tuyères où la partie terminale en aval est tronquée, cette troncature présente un gain d'espace et du poids non négligeable, sans perte significative en performance due à la non-uniformité de l'écoulement en sortie. Ahlberg [6] a proposé une méthode d'optimisation, basée sur les lignes caractéristiques, qui permet de fournir un contour présentant une performance maximale pour un rapport de section donné. Ce type de profil est utilisé pour des tuyères réelles comme : [7]

La LR-115, viking et la RD-0120 utilisées respectivement sur les lanceurs américains Saturn C-1, européen Ariane-4 et russe Energia.

### Les tuyères optimisées en poussée TOC (thrust optimized contour) :

Le type TOC a été formulé par Guderly K.G et al. Pour modéliser des géométries des tuyères optimisées en poussée respectant les contraintes de longueur et de pression ambiante [8][4] pour donner une poussée optimale, et simplifié par Rao G.V.R[8]. Ce type est caractérisé par la présence d'un choc interne au niveau du col suite au changement de courbure entre le col et le divergent [9]. Une tuyère TOC est 75 à 85% plus allongée qu'une tuyère conique (de 15°) ayant le même rapport de section.



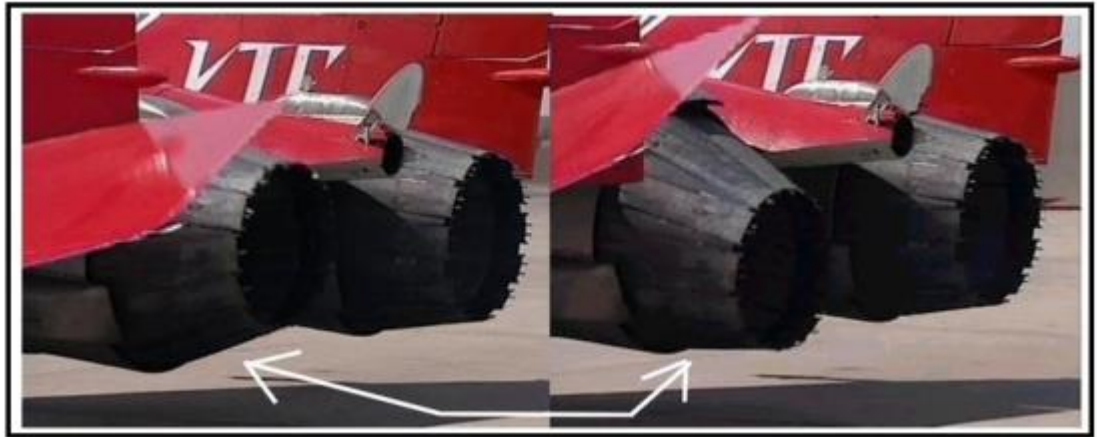
**Figure I. 5:profil des tuyères TIC et TOC**

Les tuyères optimisées parabolique TOP (thrust optimized parabolic) :

Malgré la simplification fait par RAO, le profil TOC est assez compliqué en termes de calculs et son contour ne peut être décrit que par une liste de coordonnées. Donc les tuyères TOP furent développées, Rao G.V.R [10] à montrer que le profil TOC peut-être approché par une parabole sans perte significative de performance. Les tuyères de Vulcain et de la SSME (Space Shuttle Main Engine, respectivement utilisé sur le lanceur européen Ariane-5 et la navette spatiale américaine [11]) sont conçus avec des profils TOP. Comme le type TOC, les tuyères TOP sont caractérisées par l'apparition d'un choc interne.

Tuyères orientables :

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

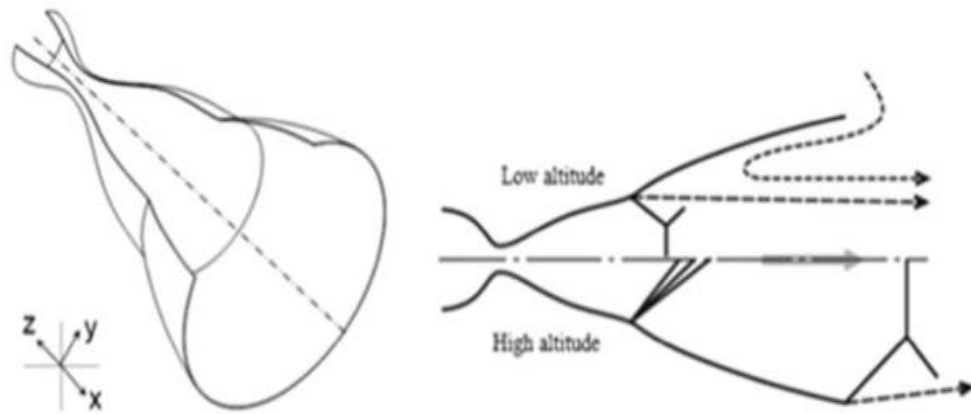


**Figure I. 6:Tuyère orientable**

Tuyère double galbe (dual bell nozzle) :

C'est une nouvelle génération et l'une des tuyères innovantes utilisées généralement pour les navettes spatiales, appelée aussi tuyère à double cloche, elle a reçu l'intérêt des motoristes grâce à son adaptation de l'écoulement à deux plages de fonctionnement (basse altitude et très haute altitude) sans activation mécanique, c'est le principe d'auto-adaptation en fonction d'altitude qui implique une performance très élevée. Comme son nom l'indique la tuyère double galbe est formé par une jonction d'une tuyère de base liée à un brusque changement d'angle d'une autre tuyère d'extension, cette jonction est appelée point d'inflexion. Pour augmenter la poussée, la tuyère double galbe est désignée de telle sorte que l'écoulement décolle de la paroi à une position bien déterminée (c'est le point d'inflexion) à basse altitude. Cette configuration permet à augmenter la poussée et limiter les charges latérales. Cependant comme inconvénient, la traînée d'aspiration à basse altitude et les charges latérales durant la transition entre les deux modes de fonctionnement diminuent la poussée générée.

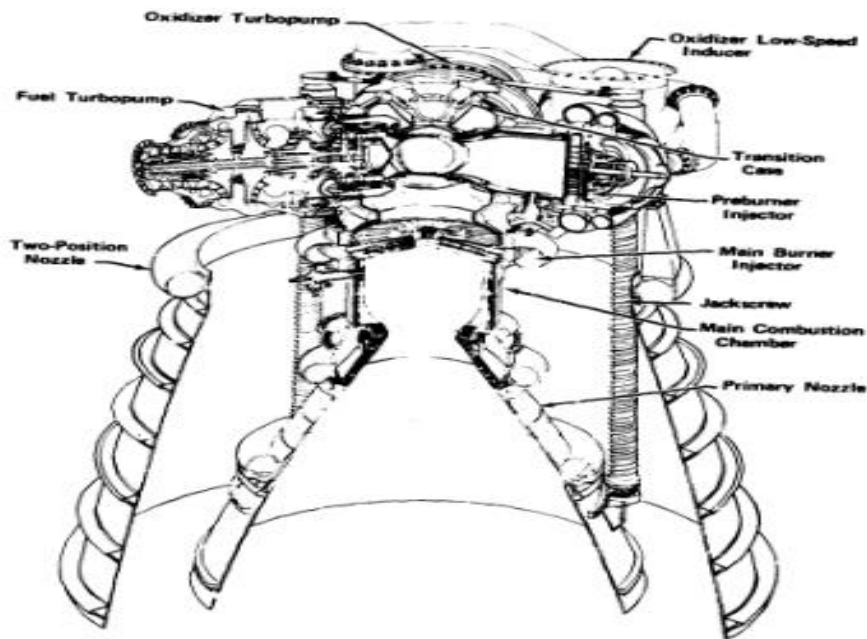
Les performances de la tuyères double galbe sont tellement proche de l'efficacité optimale d'une tuyère idéal (entre 1 et 3 %) qui a un rapport de section maximum donnée [12] qu'elle peut être une alternative aux tuyères conventionnelles [13]



**Figure I. 7:tuyère double galbe**

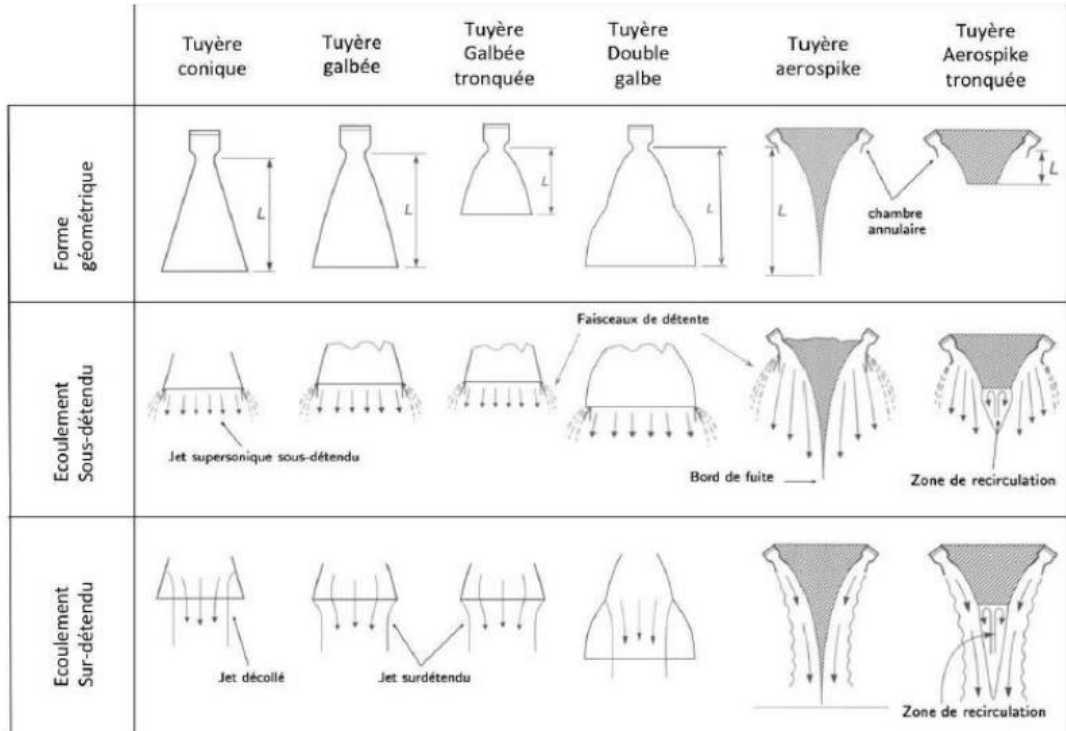
Tuyères extensibles :

On les trouve dans les moteurs à propergol solide comme «inertial Upper Stage » ou les moteurs à propergol liquide comme RL10. La tuyère extensible nécessite des actionneurs, une alimentation électrique, Des mécanismes pour mise en place de l'extension pendant le vol dispositif de fixation et d'étanchéité [14]. Les charges latérales résultant dans ce type de tuyère représentent une contrainte majeure pour le dimensionnement mécanique du moteur.



**Figure I. 8:tuyère extensible**





**Figure I. 9:diagramme simplifié de plusieurs configurations des tuyères et de leurs effets de débit. [18]**

### III. Définition de la tuyère supersonique :

Une tuyère supersonique appelée tuyère de Laval est une conduite d'éjection de forme convergente-divergente ayant un profil spécifiquement étudié, elle lie la chambre de combustion au milieu extérieur qui ont des pressions différentes pour diriger l'écoulement vers la sortie.

Son principal rôle est de transformer l'énergie thermique en énergie cinétique afin de produire de la poussée. Cette dernière dépend énormément de la configuration géométrique de la tuyère, la quantité et la vitesse des produits de combustion. Cette poussée peut arriver à des valeurs maximales lorsque la tuyère est conçue pour un écoulement uniforme parallèle à la sortie et la pression du flux d'échappement sortant de la tuyère est égale à celle récepteur ou à la pression ambiante.

La tuyère supersonique permet aussi d'accélérer les gaz brûlés dans la chambre de combustion à l'entrée du convergent d'une vitesse subsonique, à une vitesse supersonique vers la sortie du divergent passant par un col caractérisé par une vitesse sonique. Cette accélération dépend en premier lieu de la forme géométrique du divergent de la tuyère et de la section de sortie.

On trouve les tuyères supersoniques dans beaucoup de structure comme les moteurs fusées, missiles et les moteurs d'avion. Elles interviennent également dans la fabrication des souffleries supersoniques pour la modélisation et la réalisation expérimentales des écoulements supersoniques. L'organe tuyère constitue environ 70% de la masse de la structure.

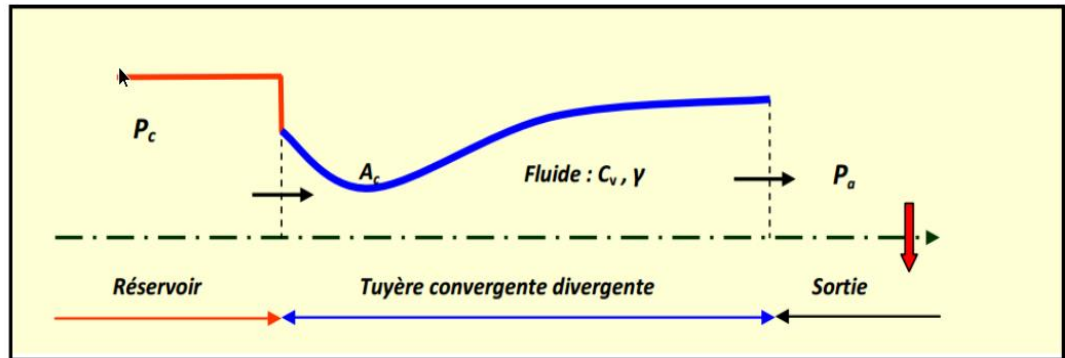


Figure I. 10:schéma de la tuyère supersonique

#### IV. Principaux paramètres de performance :

➤ La force de poussée :

C'est la force générée de la tuyère et le paramètre le plus important qui permet d'évaluer les systèmes propulsifs en termes de performance [14]. Il dépend de la différence entre les pressions de sortie et ambiante, la vitesse d'éjection des gaz de combustion, et le débit massique.

En théorie monodimensionnel d'un écoulement permanent non visqueux la poussée s'écrit :

$$F = \dot{m} \cdot V_e + A_e [P_e - P_a]$$

Avec :

$P_e$  : La pression de sortie

$P_a$  : La pression ambiante (atmosphérique)

$A_e$  : La surface de sortie

➤ Coefficient de poussée :

C'est un paramètre sans dimension peut être considéré comme caractéristique de la performance du contour de la section divergente supersonique, et définie comme le

rapport entre la poussée  $F$  et le produit de la pression total par l'aire de la section au col  $A^*$ . C'est un coefficient caractéristique de la détente des gaz dans la section divergente de la tuyère. Il est en fonction de la chaleur spécifique des gaz brûlés, la pression de la chambre de combustion, la pression ambiante et aussi les paramètres de la tuyère.

$$C_F = \frac{F}{A_t \cdot P_0}$$

Avec :

$A_t$  : La surface du col

$P_0$  : La pression totale

➤ La vitesse caractéristique :

Pour un système où la vitesse au col est sonique, la vitesse caractéristique traduit la quantité d'énergie efficace du propulseur et la qualité de conception et la performance de la chambre de combustion exigée pour la tuyère. Elle présente en général un repère pour exprimer les vitesses tout au long des tuyères. Elle est inversement proportionnelle à la consommation de fuel.

$$\dot{C} = \frac{A_t \cdot P_0}{\dot{m}}$$

➤ La vitesse effective :

La vitesse effective notée  $V_{eff}$  est la vitesse mesurée à la sortie de la tuyère adaptée. Elle est définie par le rapport de la poussée au débit massique. C'est un paramètre qui tient compte de la correction atmosphérique.

$$V_{eff} = \frac{F}{\dot{m}}$$

$F$  : La poussée (N)

➤ L'impulsion spécifique  $I_s$  :

Est le rapport de la poussée au produit du débit massique et de l'accélération de la pesanteur. Les performances des propergols utilisés pour la propulsion sont évaluées par ce paramètre.

$$I_s = \frac{F}{\dot{m}g}$$

$g$  : La gravité ( $m \cdot s^{-2}$ )

## V. Application des tuyères :

Dès ses débuts la tuyère supersonique a occupé beaucoup de structures dans les domaines aéronautique et aérospatiale tel que les moteurs à réaction utilisés dans les avions, les moteurs fusés qui propulsent les lanceurs et les missiles et dans la fabrication des souffleries supersoniques pour la modélisation et la réalisation expérimentale des écoulements supersoniques réels.

- Les moteurs fusée et avion :

Le moteur fusé est le moteur le plus simple et le plus rapide pour des vitesses qui dépassent 1500 km/h, où la tuyère représente une partie essentielle, son rôle est de guider et d'éjecter les gaz brûlés de la chambre de combustion vers la sortie en accélérant l'écoulement à des vitesses supersoniques. Cela produit une force de poussée comme résultante de cette accélération. Notons que la tuyère représente environ 70 % de la masse totale d'une chambre propulsive.

Les tuyères profilées sont utilisées par tous les avions supersoniques conventionnels. Pour les applications des fusées on trouve principalement une large utilisation des tuyères aérospike qui s'appellent aussi les tuyères de compensation d'altitude [15].

Les tuyères coniques sont aussi adaptées à l'application hypersonique. Pour obtenir un écoulement parallèle dans la section test pour les souffleries supersoniques, la tuyère galbée est la plus convenable.

- Les souffleries supersoniques :

Une soufflerie supersonique est une installation d'essais utilisée en aérodynamique permet de recréer des conditions de vol d'un appareil dont l'écoulement d'air à des vitesses supersoniques est détendu à travers une tuyère (qui est l'élément primordial de la soufflerie) et simulé sur des prototypes à échelle réduite (profil d'aile, maquette d'avion...), qui sont fondés sur le principe de l'uniformité et l'analogie à l'air libre de l'atmosphère, du profil de vitesse ainsi que celui du nombre de Mach en sortie de tuyère.

Il existe différentes configurations de soufflerie supersonique :

- Soufflerie à cycle fermé.
- Soufflerie à rafales.
- Soufflerie à impulsion.

Elle comprend un équipement qui permet de générer une différence de pression entre les deux extrémités de la tuyère.

La composition générale de la soufflerie est de trois parties principales :

- Le collecteur ou le convergent.
- La chambre d'expérience.
- Le diffuseur ou le divergent.

**CHAPITRE II :**  
**MÉTHODOLOGIE DE**  
**CONCEPTION DES**  
**TUYÈRES**  
**SUPERSONIQUE**

## I. Introduction :

Les systèmes de transport spatial de nouvelle génération exigent une augmentation de l'efficacité opérationnelle et une réduction des coûts de lancement de la Terre à l'orbite. A la hauteur de la concurrence pour le transport spatiale les moteurs de fusée doivent être conçus pour offrir des performances élevées avec la moindre complexité de système. Le moteur doit fonctionner sur une large plage d'altitudes, ce qui entraîne un fonctionnement hors conception. Le fonctionnement hors conception du moteur produit une perte de performance significative dans les tuyères conventionnelles, où le débit sur ou sous se dilate en raison du rapport de surface de sortie fixe. Cela peut parfois entraîner une perte de 10 % ou plus de l'impulsion spécifique. Afin de réduire cette perte de performance, divers concepts de tuyères adaptatives à l'altitude ont été proposés dans, parmi lesquels le concept le plus prometteur est la tuyère à double galbe. [11-15].

Une tuyère à double galbe est une combinaison entre deux tuyères conventionnelles de conception différente en une seule tuyère. La première tuyère avec un taux d'expansion relativement faible est appelée "tuyère de base", tandis que la deuxième tuyère avec le taux d'expansion le plus élevé est communément appelée "tuyère d'extension". [15-16] Essentiellement, la tuyère à double galbe est une tuyère d'auto-adaptation d'altitude sans activation mécanique, mais permet de passer en une seule étape du mode de fonctionnement à basse altitude au mode de fonctionnement à haute altitude. Cette propriété a réussi à attirer l'attention des scientifiques. Pour le mode de fonctionnement à basse altitude, le flux principal provenant de l'entrée de la tuyère remplit uniquement la tuyère de base tandis que le point de séparation du flux se stabilise au point d'inflexion. Inversement, pour un fonctionnement à haute altitude, le flux principal de l'entrée de la buse remplit également les buses de base et d'extension, tandis que le point de dérivation se déplace vers la lèvre de la buse, prolongeant la buse. Lors de l'ascension de la fusée du niveau de la mer vers l'espace, la transition du mode de fonctionnement du mode de fonctionnement à basse altitude au mode de fonctionnement à haute altitude a lieu dans la tuyère à double galbe [16-17]. En particulier, le paramètre de dynamique des fluides régit purement cette transition de la tuyère de base à plein débit à la tuyère d'extension à plein débit avec le changement d'altitude, c'est-à-dire le rapport de pression de la tuyère, NPR.

## II. Conception de la tuyère :

### II.1 Le premier galbe :

La méthode approximative pour la conception de la tuyère double galbe axisymétrique décrite ici est dérivée d'une technique exacte simple valable dans le cas bidimensionnel, dont une brève description est utile pour comprendre les limites de validité de la procédure axisymétrique.

En référence à la Figure II.1a, un écoulement sonique, présent au col  $AB$ , est supposé se dilater à travers une onde centrée, prenant naissance au niveau de la lèvres de la tuyère. Le Streamline passant par le point B est le profil de la tuyère requis. Une ligne caractéristique typique est une ligne de propriétés droite et constante, inclinée par rapport à la direction du flux sonique, à l'angle  $\alpha = \mu - \nu$ .

Où  $\mu$  est l'angle de Mach et  $\nu$  est la fonction de Prandtl Meyer. [18]

Il traverse la limite de la tuyère à une distance  $L$  de la lèvres, qui est calculée en écrivant l'équation de continuité :

$$l/l_t = (A/\sin\mu)(1/A_t) \quad \text{Où : } \lambda = \epsilon M$$

Où  $A$  est l'aire de passage normale au vecteur de vitesse,  $\lambda$  est une longueur adimensionnelle, et  $\epsilon$  est le rapport d'expansion.

Les équations polaires de la tuyère sont alors :

$$\lambda = M\epsilon(M)$$

$$\alpha = \mu(M) - \nu(M)$$

Dans lequel le nombre de Mach est un paramètre à faire varier de 1 à la valeur de sortie souhaitée  $M_e$ . De cette manière, chaque point de la courbe est calculé indépendamment, améliorant la précision de la procédure par rapport à la technique classique utilisée pour le dessin des lignes de courant dans un champ d'écoulement.

Considérons maintenant une tuyère annulaire à boisseau axisymétrique, dont un exemple typique est illustré à la Figure II.1b. Un rapport d'une enquête expérimentale sur une buse similaire est donné dans la réf. [19].

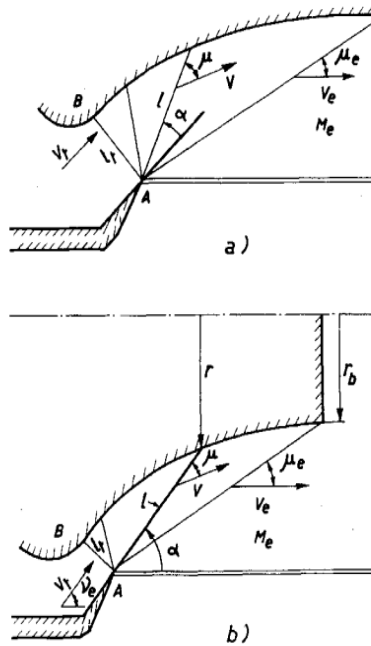
La tuyère double galbe habituelle est obtenue comme un cas particulier lorsque le rayon de la base  $r_b$  devient nul.

Une sélection appropriée de  $r_b$  permet une sorte d'adaptation de la buse au corps du véhicule, réduisant peut-être son médicament de base.



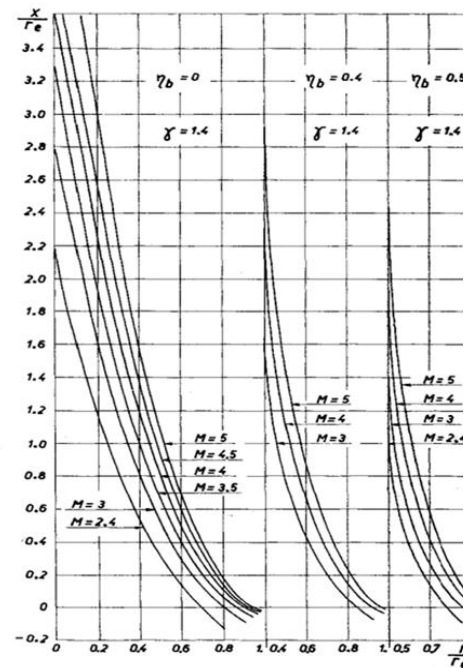
Nous admettons la présence d'un débit sonore à la gorge géométrique  $AB$ , dont la vitesse est inclinée par rapport à l'axe de la tuyère à l'angle de Prandtl Mayer correspondant aux conditions d'échappement de conception.

Le fan d'expansion à proximité de la lèvre de la tuyère suit la loi bidimensionnelle ; De plus, les deux caractéristiques qui lient le fan sont droites comme dans le cas en deux dimensions.



**Figure II. 1:a) tuyère double galbe bidimensionnel**

**b) Tuyère double galbe annulaire**



**Figure II. 2: profils approximatifs d'une tuyère double galbe**

Nous supposons que les autres caractéristiques sont également des lignes de propriétés droites et constantes. (Un calcul détaillé du flux réel montrerait que les deux hypothèses précédentes, dans les considérations géométriques qui suivent, ont, dans une certaine mesure, équilibré les effets.)

Comme dans le cas bidimensionnel, nous écrivons l'équation de continuité à travers une caractéristique typique (dans la réf. [20], une ligne droite perpendiculaire au profil de fiche réel a plutôt été sélectionnée).

La surface croisée par le flux est :

$$S = 2\pi \frac{r_e + r}{2} \frac{r_e - r}{\sin \alpha} \quad (1)$$

Puisque la vitesse fait un angle  $\mu$  avec la surface, la zone de passage réelle est :

$$A = S \sin\alpha = \frac{\pi(r_e^2 - r^2)}{M \sin\alpha} \quad (2)$$

La longueur de la caractéristique de la lèvre de la tuyère à la surface du bouchon :

$$l = \frac{r_e - r}{\sin\alpha} \quad (3)$$

Alors que la zone de sortie est :

$$A_e = \pi(r_e^2 - r_b^2)$$

L'équation (3), en tenant compte de l'équation (2), peut être écrite comme :

$$l = \frac{r_e - [r_e^2 - (AM \sin\alpha / \pi)]^{1/2}}{\sin\alpha}$$

Ou, sous une forme non dimensionnelle,

$$\xi = \frac{l}{r_e} = \frac{1 - \{1 - [\epsilon(1 - \eta_b^2) M \sin\alpha / \epsilon_\epsilon]\}^{1/2}}{\sin\alpha} \quad (4)$$

Dans lequel  $\eta_b$  représente le rayon de base non dimensionnel.

Les équations du profil de fiche sont une forme paramétrique sont alors

$$\begin{aligned} \xi &= \xi(M) \\ \alpha &= \nu_e - \nu(M) - \mu(M) \end{aligned} \quad (5)$$

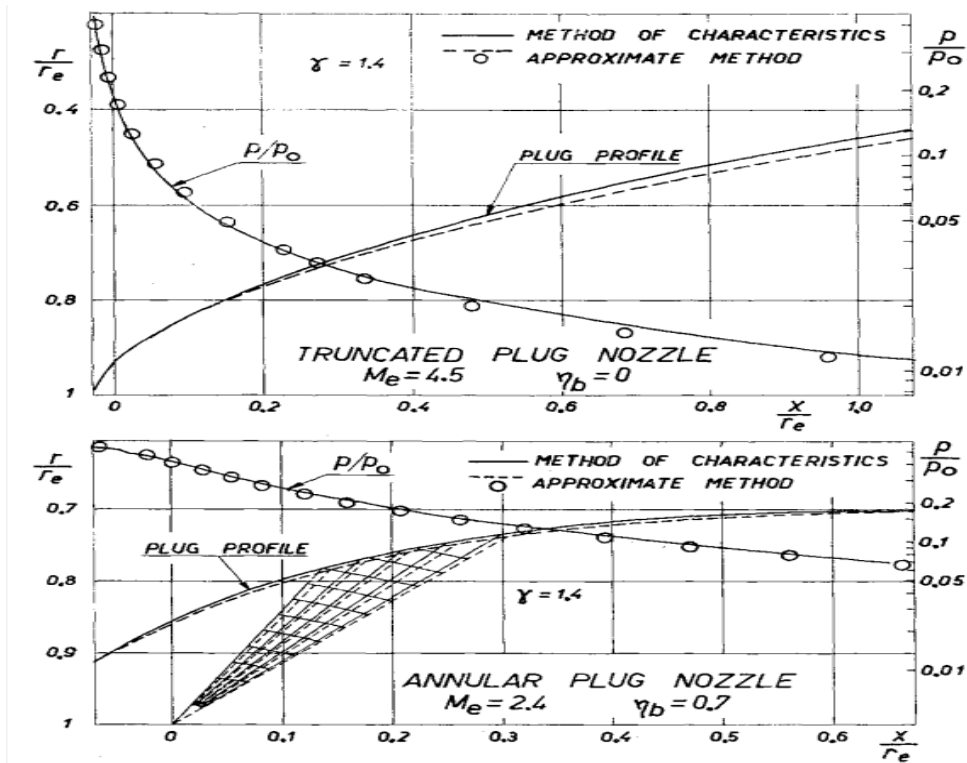
Dans lequel le nombre de Mach varie de 1 à la valeur de sortie de conception  $M_e$

La figure 2 montre plusieurs profils de fiche calculés de cette manière pour divers nombres Mach et rayons de base.

Sur la figure 3, les formes et les distributions de pression de deux tuyères isentropiques, calculées par la méthode des caractéristiques, sont comparées aux résultats de la méthode approximative.

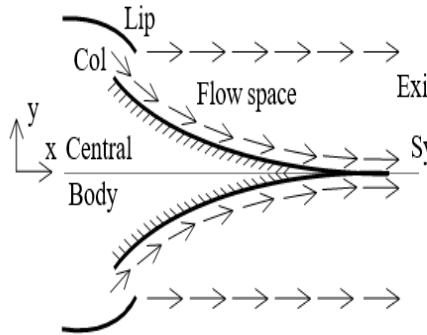
En conséquence de nos hypothèses, l'accord entre les deux techniques de conception est bon quelles que soient les caractéristiques d'expansion qui ne s'écartent pas de manière significative des lignes de propriétés constantes de constance constante.

En fait, cela se produit pour les buses ayant un grand rayon de base, quel que soit le nombre de machines de sortie, et pour les buses avec un nombre de machines à sortir dans la région supersonique juste en aval de la gorge, quel que soit le rayon de base.

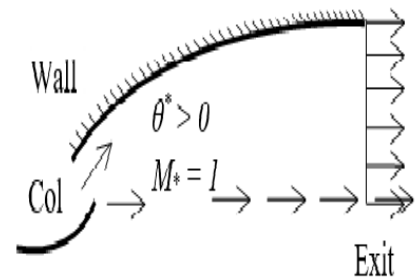


**Figure II. 3: Comparaison des solutions approximatives et exactes dans la conception d'une tuyère double galbe**

Dans l'industrie de la construction aéronautique, on s'est toujours intéressé à concevoir des moteurs ayant une longueur et un poids minimum. Pour la fabrication des missiles, la grande partie de la masse est consacrée à la tuyère. Une amélioration de la masse veut dire une minimisation du poids de l'engin et par conséquent, on peut utiliser ce gain pour embarquer d'autres appareils utiles ou pour augmenter la masse du carburant ce qui nous donne une chance d'augmenter le temps d'autonomie du vol. A partir de cette étude, nous concevrons la forme d'une tuyère supersonique toute récente, qui répond bien à notre souhait d'amélioration des performances. Ce type de tuyères est nommé par tuyère à double galbe à corps central, présentée sur la figure II.4. La forme du corps central sera obtenue de manière à obtenir un écoulement uniforme et parallèle à la section de sortie [21-25]. L'application portera sur différentes valeurs du rapport du gaz parfait dans le but de concevoir des tuyères de moteurs de soufflantes et de fusées. L'application sera pour différents types de gaz pour but de concevoir des tuyères de soufflerie et des moteurs de fusée.

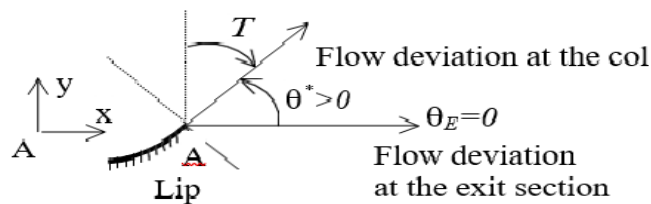


**Figure II. 4: Géométrie de la tuyère double galbe**



**Figure II. 5: Écoulement au col et à la section de sortie.**

La tuyère est composée de convergente et divergente dépendant entre eux par le col sonore. Notre étude est basée pour la partie divergente. La partie subsonique est utilisée pour donner un écoulement sonique dans le col.



**Figure II. 6: Présentation de l'angle  $\psi$**

La différence entre notre modèle et les autres modèles est que l'écoulement au niveau du col est incliné d'un angle  $\theta$  par rapport à l'horizontal comme indique la Figure II.5 quel n'est pas le cas pour un autre type, où l'écoulement est horizontal [24]. Par conséquent, la lèvre doit être inclinée d'un angle  $T$  par rapport à la verticale comme la Figure II.6 le montre.

Pour les autres formes, l'écoulement est horizontal au Col. Le flux est permanent, bidimensionnel et irrotationnel. L'application est limitée dans le champ supersonique jusqu'à ce que Mach Nombre  $Me \leq 5.00$  ne pas avoir la dissociation des molécules. La ligne de flux déterminée par calcul sera remplacée par une surface rigide limitant le champ d'écoulement et qui représente la forme du centre.

### II.1.1 Formulation mathématique du problème :

L'écoulement à la section col et Exit est une direction, le repute des sections critiques reste toujours valide et il est pris pour comparer les calculs numériques trouvés par notre modèle et la théorie. Le calcul de l'écoulement est plutôt délicat, car la forme de

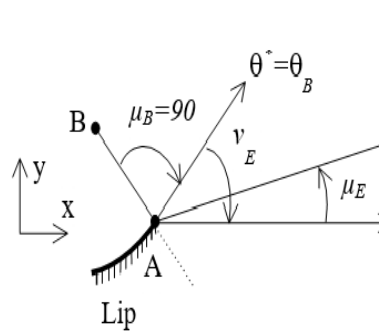
la buse est inconnue a priori. La forme requise du corps central accélère le flux d'un nombre de Mach  $M = 1,00$  au col jusqu'à ce que Mach soit le nombre de  $M_E$  à la section de sortie. Comme l'écart d'écoulement n'est pas nul au col, le flux à travers le corps central ne redessine que  $\theta = \theta^*$  à  $\theta = 0$ . Le calcul de l'écoulement et la détermination de la paroi du corps central pour un gaz parfait sont basés sur la fonction Prandtl Meyer indiquée dans RÉF. [21], par :

$$v(M) = [(\gamma + 1)/(\gamma - 1)]^{1/2} \arctg[(\gamma - 1)/(\gamma + 1) (M^2 - 1)]^{1/2} - \arctg[M^2 - 1]^{1/2} \quad (6)$$

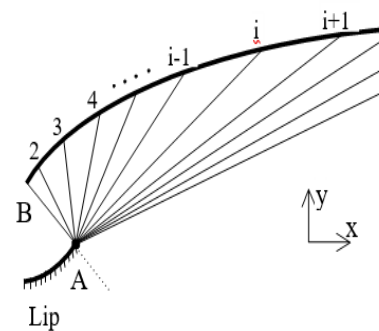
L'angle  $V$  est mesuré par rapport au vecteur de vitesse du col.

Sur la figure II.7, la ligne AB et AE présente respectivement les ondes Mach de la section col et de sortie. Ces lignes sont inclinées respectivement par les angles :

$$\mu_B = 90 \quad \text{et} \quad \mu_E = \arcsin[1/M_E] < 90 \text{ degrés.}$$



**Figure II. 7: Angle de Mach au niveau du col et de la section de sortie.**



**Figure II. 8: Discrétisation de la zone d'expansion**

Entre ces deux lignes, il y a une infinité d'ondes de Mach, centrées, sortie du point A comme le montre la figure II.8. Chaque ligne donne un nombre de Mach, dont on peut facilement déduire un point sur le mur. Comme le gaz est parfait, le vecteur de vitesse est tangent à une ligne de courant, qui sera considérée comme le contour de la paroi centrale du corps à exiger.

Les propriétés de l'écoulement comme, nombre de Mach, écart d'écoulement, rapports thermodynamiques, de pression, les températures et la densité sont constantes le long de chaque ligne de sorties de Mach du point A, qui seront absorbées par la paroi du corps central [22]. La figure II.9 présente les paramètres d'une ligne de Mach intermédiaire reliant les points A et i. L'angle  $\theta_B$  est inconnu a priori. La conception est

considérée sur la base du nombre de Mach de sortie. Pour avoir un flux uniforme et parallèle en sortie, il faut incliner le flux au col d'un angle  $\theta_B$  de :

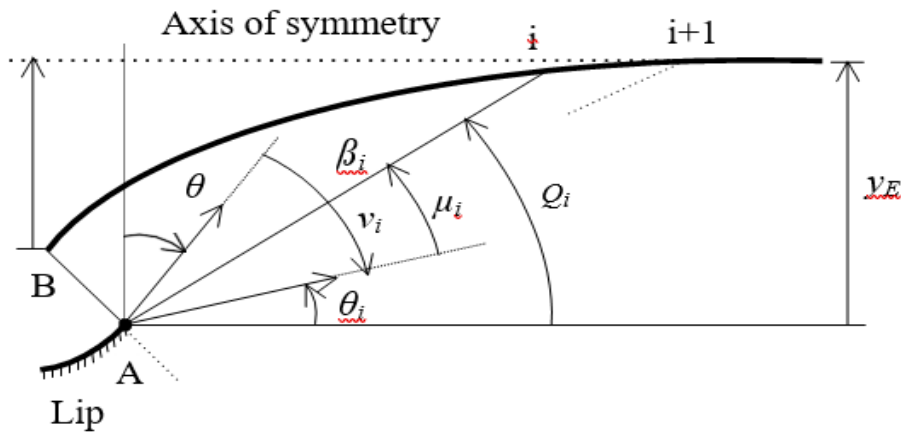
$$\theta_B = \nu_B = \nu(M_B) \quad (7)$$

La pente d'une lèvre par rapport à la verticale sera calculée par :

$$T = 90 - \nu_E \quad (8)$$

### A. discrétisation

Partageons la zone d'expansion allant entre les lignes AB et AE à n ondes, y compris les deux extrémités, et complétez ces ondes de la gauche vers la droite, nous obtenons le diagramme présenté sur la Figure II.8. La marque de référence du calcul est placée au point A. Le calcul et la détermination du contour du corps central sont indépendants du choix du positionnement de la marque de référence étant donné que la tuyère est bidimensionnelle



**Figure II. 9: Paramètres d'une ligne de Mach intermédiaire reliant les points A et i (i=2, 3, ..., N).**

Plus de nombres n des ondes de Mach est grande, plus nous obtenons une très bonne présentation du corps central. Nous préférons dans notre étude pour commencer le calcul du point A du col vers le point E de la sortie.

La détermination des points muraux se fait de manière explicite. Si nous connaissons la position et les propriétés d'un point sur le mur, nous pouvons facilement déterminer ceux du point adjacent à droite jusqu'à l'endroit où nous arrivons au point de section de sortie. Notons ici que les vagues de Mach sont des lignes droites.

Pour arriver à concevoir la tuyère, nous avons choisi la discrétisation de la zone de variation du nombre de Mach  $1.00 \leq M \leq M_E$  par N valeurs afin que les calculs soient rapides.

Le diagramme du modèle sous la présence d'une ligne de Mach est illustré sur la Figure II.9. Le nombre de Mach  $M_i$

Au point  $i$  est connu. Dans ce cas, nous pouvons écrire

$$\mu_i = \arcsin(1/M_i) \quad (9)$$

$$v_i = v(M_i) \quad (10)$$

$$Q_i = 90 - T - v_i + \mu_i \quad (11)$$

$$\theta_i = Q_i - \mu_i \quad (12)$$

Sur la figure II.9, les propriétés  $M_i, \theta_i, v_i, x_i$  et  $Y_i$  au point  $i$  sont connus, et le problème devient la détermination de ces propriétés au point  $i + 1$ . Sur le triangle reliant les points A,  $i$  et  $i+1$ , nous pouvons écrire :

$$\alpha = \pi - Q_i + v_E - v_i \quad (13)$$

$$\beta = Q_{i+1} - v_E + v_i \quad (14)$$

$$\lambda_{i+1}/\lambda_B = \lambda_i/\lambda_B \sin(\alpha)/\sin(\beta) \quad (15)$$

Par analogie avec les équations. (9), (10), (11) et (12), nous pouvons déduire les relations pour le point  $i+ 1$  en modifiant l'index  $i$  par  $i + 1$ . À ce point-là, le nombre de Mach  $M_{i+ 1}$  est connu. La position du point  $i + 1$ , sous forme adimensionnelle, est donnée par :

$$x_{i+1}/\lambda_B = \lambda_{i+1}/\lambda_B \cos(\varphi_{i+1}) \quad (16)$$

$$y_{i+1}/\lambda_B = \lambda_{i+1}/\lambda_B \sin(\varphi_{i+1}) \quad (17)$$

Chaque point  $I$  sur le mur a son propre nombre de Mach, différent aux autres points, et qui tous, sont connectés au point A par une ligne Mach. Ensuite, au point A, il y a une infinité de valeurs du nombre de Mach et par conséquent, le point A est un point de discontinuité des propriétés  $m, et \theta \dots etc.$

## B. Procédure de calcul

La première étape consiste à déterminer certains résultats nécessaires à la conception :

### 1. Rapports critiques

Pour un gaz parfait, les rapports critiques  $T_*/T_0, \rho_*/\rho_0$  et  $P_*/P_0$  sont présentés dans Réf. [21].

## 2. Rapports thermodynamiques à la section de sortie

Les rapports thermodynamiques  $T_E/T_0$ ,  $\rho_E/\rho_0$  et  $P_E/P_0$  d'un gaz parfait correspondant au nombre de Mach de sortie sont présentés en Réf. [21].

## 3. Rapport théorique des sections critiques

Il est donné par la relation suivante :

$$A_E/A_* = M_E^{-1} (\gamma + 1)^{-1} \left[ 1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M_E^2 \right]^{(\gamma+1)/[2(\gamma-1)]} \quad (18)$$

Ce rapport nous sera utile comme une source de comparaison de validation de nos calculs numériques.

## 4. Valeur de la fonction Prandtl Meyer correspondant au nombre de Mach

La valeur de la fonction de Prandtl Meyer est donnée par Eq. (7).

L'écart de la lèvre par rapport à la verticale sera calculé en utilisant l'équation (8).

Comme le processus de calcul est lié à deux points successifs, il est nécessaire de donner les résultats du point de départ. Le point de départ est que le point B à ce point, nous avons :

- 1) Le nombre de Mach est égal à  $M = 1.00$  . Entrée sonique.
- 2) L'angle de Mach est égal à  $\mu_B = 90.0$  degré.
- 3) La valeur de la fonction de Prandtl Meyer est égale à  $\nu_B = 0.0$  degré.
- 4) L'angle polaire est égal à  $Q_B = 90 - T - \nu_B + \mu_B$  .
- 5) Le rayon polaire est égal à  $\beta_B = 1.00$  (parmi les données).
- 6) La position du premier point de la paroi est donnée par :

$$x_B/\lambda_B = \cos(\varphi_B) \quad (19)$$

$$x_B/\lambda_B = \sin(\varphi_B) \quad (20)$$

- 7) L'angle de déviation de l'écoulement au niveau du col est donné par :

$$\theta^* = \theta_B = \phi_B - \alpha_B \quad (21)$$

8) Le rayon adimensionnel théorique de la section de sortie est donné en utilisant des équations. (18) et (20) par :

$$y_E/\lambda_B = (y_B/\lambda_B)(A_E/A_*) \quad (22)$$



La même valeur sera calculée par le modèle numérique en utilisant Eq. (25) comme dernier point de calcul.

La deuxième étape consiste à assigner les résultats obtenus au point B comme le premier point de calcul numérique pour  $i=1$ .

Pour chaque ligne de Mach, il est nécessaire de connaître le nombre de Mach au centre d'expansion A qui représente aussi le nombre de Mach sur le mur. Ainsi, les droites de Mach représentent les courbes iso Mach. Tels que le nombre de points choisis est égal à N, on obtient N-1 de panneaux, d'où le nombre de Mach tel que dans le point i est donné par :

$$M_i = 1 + (i - 1)[(M_E - 1)/(N - 1)] \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (23)$$

En incrémentant le mètre de  $i=2$  à N, on peut déterminer les propriétés thermodynamiques et physiques le long de toute ligne de Mach sélectionnée. Par conséquent la forme du corps central sera obtenue.

De ce dernier point, on peut fixer les résultats suivants :

1) La position du point E de la section de sortie est donnée sous forme adimensionnelle par :

$$x_E/\lambda_B = x_N/\lambda_B \quad (24)$$

$$y_E/\lambda_B = y_N/\lambda_B \quad (25)$$

2) La distance axiale entre la section de sortie et la lèvre (point a) est donnée par :

$$x_{Plug}/\lambda_B = x_E/\lambda_B \quad (26)$$

3) La longueur de la tuyère est mesurée sous forme de distance axiale entre le point B du col et le point E de la section de sortie. Il est donné sous forme adimensionnelle par :

$$L/\lambda_B + (x_E/\lambda_B) - (x_B/\lambda_B) \quad (27)$$

4) Le rapport des sections correspondant à la discrétisation de N points est donné par :

$$A_E/A_* (\text{computes}) = y_E/\lambda_B = y_N/\lambda_B \quad (28)$$

### C. Paramètres de thermodynamique

Dans chaque point i du mur, le rapport de thermodynamique peut être déterminé par les relations suivantes

$$(T/T_0)_i = [1 + (\gamma - 1)/2M_i^2]^{-1} \quad (29)$$

$$(\rho/\rho_0)_i = [1 + (\gamma - 1)/2M_i^2]^{-1/(\gamma-1)} \quad (30)$$

$$(P/P_0)_i = (\rho/\rho_0)_i (T/T_0)_i \quad (31)$$

Le rapport des températures sera utilisé pour faire le choix approprié du matériau de construction du corps central résistant à cette température. Le rempot de densité sera utilisé pour évaluer la masse de gaz existant à chaque instant de l'espace de l'écoulement, celle des pressions pour la détermination de la force de pression exercée sur le mur. Nous pouvons calculer ces rapports lors de la détermination du contour du corps central.

#### D. Masse du corps central

Le numéro de segment (i) du mur est illustré sur la figure II.10. Pour arriver à calculer la masse de structure du corps central, considérons les deux hypothèses suivantes :

- 1) La forme du mur entre deux points successifs est approchée par une droite. Cette hypothèse donne de bons résultats si le nombre de points N est très élevé.
- 2) Le corps central est constitué du même matériau, et d'épaisseur constante.

Le calcul de la masse de la structure est lié au calcul de la longueur curviligne de la paroi du corps central. Alors, par unité de profondeur et sous forme adimensionnelle, on obtient :

$$\begin{aligned} \text{Masse}/\rho_M t_M \lambda_M l \\ = 2 \sum_{i=1}^{i=N-1} [(x_{i+1}/\lambda_B - x_i/\lambda_B)^2 \\ + (y_{i+1}/\lambda_B - y_i/\lambda_b)^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (32)$$

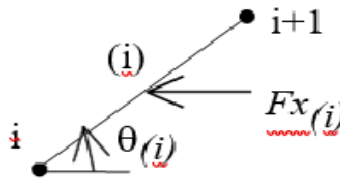


Figure II. 10:Segment d'une tuyère double galbe

#### E. force de pression exercée sur le mur

La pression exercée sur le panneau de la Figure II.10 est approximé par l'interpolation suivante :

$$P_{(i)} = \sigma P_i + (1 - \sigma) P_{i+1} \quad (33)$$

La force de pression axiale exercée sur ce panneau est donnée par :

$$Fx_{(i)} = P_{(i)} (y_{i+1} - y_i) \quad (34)$$

La force de pression axiale exercée sur le corps central, par unité de profondeur, est calculée comme la somme de toutes les forces de pression axiale exercées sur tous les panneaux. Le corps central est formé de deux parties par raison de symétrie. Sous forme adimensionnelle, on obtient :

$$Fx/(P_0 \lambda_B l) = 2 \sum_{i=1}^{i=N-1} (P/P_0)_{(i)} (y_{i+1}/\lambda_B - y_i/\lambda_b) \quad (35)$$

### F. masse de gaz dans le divergent

La masse existante de gaz dans la partie divergente du corps central entre les lignes de Mach AB et AE, y compris la zone uniforme, peut être évaluée. Nous pouvons considérer l'espace de la tuyère, comme l'union des triangles placés à côté de l'autre comme la Figure II.8 le montre, y compris la zone uniforme entre la ligne de Mach AE et horizontal. Le nombre de triangles est égal à N-1 en ajoutant le triangle de la zone uniforme. La masse de gaz, par unité de profondeur, qui se trouve dans l'espace allant entre deux lignes successives de Mach reliant les points A et i et les points A et i + 1 comme Figure II.9 le montre, est approximé par :

$$Mass_{Gas(i)} = \rho_{(i)} A_{(i)} l \quad (36)$$

$$\text{Avec } \rho_{(i)} = (\rho_i + \rho_{i+1})/2 \quad (37)$$

$$A_i = (x_{i+1}y_i - x_i y_{i+1})/2 \quad (38)$$

Au point A du triangle considéré, il y a deux valeurs de la densité, l'une égale aux valeurs du point i et l'autre égale à la valeur du point i+1. Pour cette raison, nous avons considéré la valeur moyenne de la densité entre ces deux points comme l'équation actuelle. (37). La position du point A n'est pas illustrée dans l'équation. (38), car  $x_A = y_A = 0$

Dans la zone uniforme, la masse de gaz, par unité de profondeur, est donnée par :

$$mass_{Gas}(\text{uniform zone}) = \rho_E (x_E y_E)/2 l \quad (39)$$

La masse de gaz dans le divergent y compris la symétrie du corps central, par unité de profondeur, sera donc donnée sous forme adimensionnelle, par la relation suivante :

$$\begin{aligned}
 Mass_{Gas}/(\rho_0 \lambda_B^2 l) &= (\rho/\rho_0)_E [(x_E/\lambda_B)(y_E/\lambda_B)] \\
 &+ 0.5 \sum_{i=1}^{i=N-1} [(\rho/\rho_0)_i + (\rho/\rho_0)_{i+1}] [(x_{i+1}/\lambda_B)(y_i/\lambda_B) \\
 &- (x_i/\lambda_B)(y_{i+1}/\lambda_B)]
 \end{aligned} \tag{40}$$

## II.2. Le deuxième galbe :

La deuxième courbe est le profil de rayon libre. Une extension de la tuyère a été construite en utilisant la méthode des courbes caractéristiques appliquée à l'écoulement isentropique d'un gaz parfait.

Mise en œuvre numérique de la méthode des Caractéristiques :

Dans cette partie, une procédure numérique basée sur la méthode de prédiction correction d'Euler et de la méthode des différences finis pour l'intégration de cette dernière est développée.

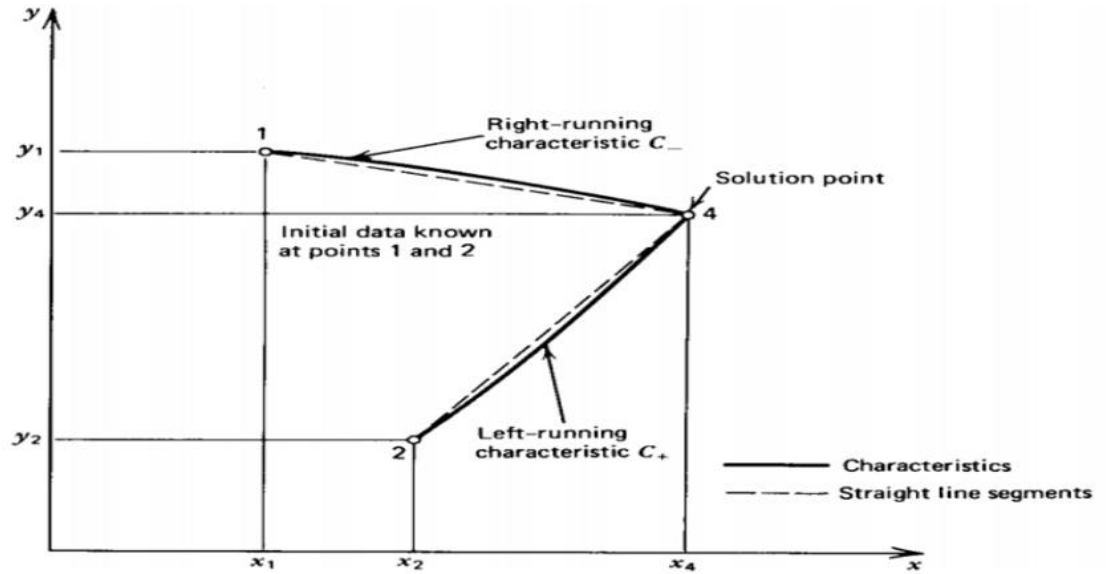
$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{\pm} = \lambda_{\pm} = \tan(\theta \pm \alpha) \tag{41}$$

$$(u^2 - a^2)du_{\pm} + [2uv - (u^2 - a^2)\lambda_{\pm}]dv_{\pm} - \left(\frac{\delta a^2 v}{y}\right)dx_{\pm} = 0 \tag{42}$$

### II.2.1 Procédure d'intégration numérique :

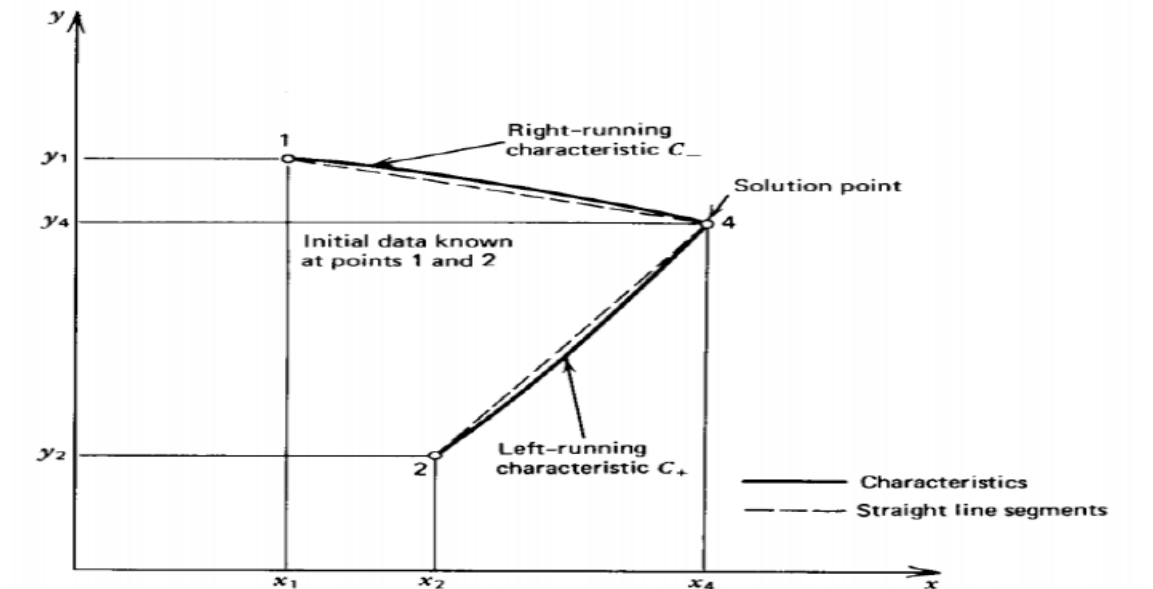
La relation (41) décrit les deux caractéristiques passant par chaque point de l'écoulement, et l'équation (42) définit la relation entre les composantes (u, v) de la vitesse V dans une des deux caractéristiques précédentes. Le processus de calcul qui doit être effectué à l'intersection des deux caractéristiques peut nous donner deux relations indépendantes entre u et v dans l'écoulement. Donc deux équations à deux inconnues, deux relations pour les deux inconnues peuvent être dérivées.

La figure II.11 [26] les caractéristiques passant par le point 1 et 2 s'interceptent au point 4. Cette procédure concerne une petite modification à un point interne, et qui fonctionne sur un point paroi et un point sur l'axe.



**Figure II. 11: Schéma de calcul par différences finis pour la méthode des caractéristiques**

Généralement, les équations (41) et (42) sont intégrées par la méthode des différences finis. Dans la construction du maillage, la partie du maillage qui relie les deux points comme par exemple un avec 4 les deux avec 4 et remplacé par une ligne droite en pointillée, comme montre la figure II.12.



**Figure II. 12: schéma de calcul par différences finis pour la méthode des caractéristiques**

Dans ce travail on a intégré les équations (41) et (42) en utilisant une méthode d'intégration numérique des équations différentielles totales, qui s'appelle la méthode de prédiction correction d'Euler [27],[28] La partie correction de cet algorithme qui donne

des bons résultats [29] est basé sur la moyenne des coefficients qui sont déterminés comme moyenne des valeurs initiales initiale.

## II.2.2 La méthode de prédiction et de correction d'EULER :

Les étapes de bases de cette méthode sont montrées ci-dessous :

Considérons l'équation différentielle ordinaire suivante :

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \quad (43)$$

Qui peut être écrite sous la forme :

$$dy = f(x, y)dx \quad (44)$$

Le problème est d'intégrer l'équation (44) numériquement à partir d'un point de départ connu et désigné comme  $(x_i, y_i)$  ou  $y_i = y(x_i)$

La valeur prédite de la solution à  $x_{i+1} = x_i + \Delta x$ , notée par  $y^0(x_i + \Delta x) = y_{i+1}^0$  est obtenue à partir de l'algorithme de prédiction d'Euler suivant ;

$$y_{i+1}^0 = y_i + f(x_i, y_i)\Delta x \quad (45)$$

Où  $\Delta x$  est le pas choisit pour la méthode des différences finis. Et puisque l'erreur commise par la méthode de prédiction dépend linéairement avec  $\Delta x$ , ce dernier doit être choisit attentivement [26]

L'exactitude de la solution par la méthode d'Euler est obtenue en employant  $y_i$  et  $y_{i+1}^0$  pour estimer la valeur de  $y_{i+\frac{1}{2}} = \left(x_i + \frac{\Delta x}{2}\right)$ , et en remplaçant  $f(x_i, y_i)$  dans l'équation (46) par  $f(x, y)$  déterminé au point central de l'intervalle, donc :

$$y_{i+1}^0 = y_i + f(x_i, y_i)\Delta x \quad (46)$$

$$y_{i+1}^1 = y_i + f\left(x_i + \frac{\Delta x}{2}, \frac{y_i + y_{i+1}^0}{2}\right)\Delta x \quad (47)$$

Où  $y_{i+1}^1 = y^1(x_i + \Delta x)$  est la valeur correcte de la solution au point  $x_{i+1}$ . L'équation (48) est l'algorithme de correction.

$$y_{i+1}^1 = y_i + f\left(x_i + \frac{\Delta x}{2}, \frac{y_i + y_{i+1}^0}{2}\right)\Delta x \quad (48)$$

Le remplacement de la valeur de  $y_{i+1}^0$  par la valeur de  $y_{i+1}^1$  dans l'équation (47) pour obtenir le résultat le plus exact  $y_{i+1}^2$  rend la méthode de prédiction correction plus exacte, où le signe 2 représente la deuxième application du correcteur, et la formule suivante représente le cas général du correcteur :

$$y_{i+1}^n = y_i + f\left(x_i + \frac{\Delta x}{2}, \frac{y_i + y_{i+1}^{n-1}}{2}\right) \Delta x \quad (49)$$

Où  $y_{i+1}^n$  est la valeur de  $y$  après  $n$  applications du correcteur.

L'équation (53) est appelée l'algorithme de prédiction correction d'Euler avec itérations.

Généralement, on limite la valeur de  $\Delta x$  par une borne supérieure pour la stabilité de cette méthode numérique, mais dans notre cas d'étude d'un écoulement isentropique, la stabilité n'est pas affectée car cette valeur de  $\Delta x$  est très grande [26].

### II.2.3 Les équations aux différences finis :

La figure (II.12) illustre schématiquement le maillage pour différences finis pour déterminer des propriétés de l'écoulement dans un point interne.

$$\Delta y_{\pm} = \lambda_{\pm} \Delta x_{\pm} \quad (50)$$

$$Q_{\pm} \Delta u_{\pm} + R_{\pm} \Delta v_{\pm} - S_{\pm} \Delta x_{\pm} = 0 \quad (51)$$

$$\lambda_{\pm} = \tan(\theta \pm a) \quad (52)$$

$$Q = u^2 - a^2 \quad (53)$$

$$R = 2uv - (u^2 - a^2)\lambda \quad (54)$$

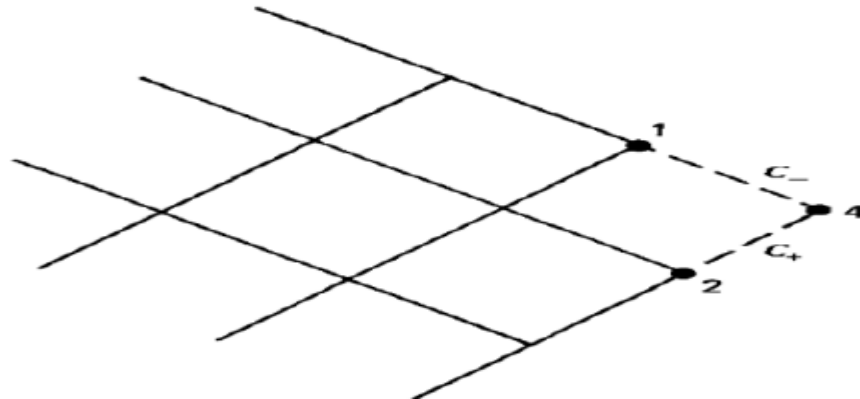
$$S = \delta \frac{a^2 v}{y} \quad (55)$$

Ces relations présentent les équations en différences finis des équations de caractéristiques et de compatibilités où le signe + et - représentent respectivement les caractéristiques montantes et les caractéristiques descendantes. Pour la méthode d'Euler, en remplaçant  $dx, dy, du$  et  $dv$  par  $\Delta x, \Delta y, \Delta u$  et  $\Delta v$  on obtient les équations en différences finis. Les coefficients  $\lambda, Q, R$  et  $S$  sont déterminés aux points initiaux pour le prédicteur et à une valeur moyenne pour le correcteur.

### II.2.4 Calcul d'un point interne :

Le point 4 sur la figure II.13 est appelé un point interne. C'est le point situé à l'intérieur de l'écoulement supersonique. La figure II.12 présente la logique des différences finies et le maillage correspondant, l'intersection des caractéristiques  $C_+$  et  $C_-$  résultant respectivement des points 2 et 1 donne le point interne.

La position et les paramètres de l'écoulement des valeurs initiales qui sont les points 1 et 2 sont supposés connus.



**Figure II. 13:La méthode directe**

Le problème est de trouver une méthode pour déterminer la position et les paramètres de l'écoulement au point interne 4 en utilisant les données du point 1 et 2.

Pour résoudre ce problème, on doit :

Intégrer les équations des caractéristiques et déterminer les deux caractéristiques 14 et 24.

Intégrer ensuite les équations de compatibilités valables le long de ces deux caractéristiques.

Enfin résoudre le système de 4 équations algébrique pour les quatre inconnus  $x_4, y_4, u_4$  et  $v_4$ .

La logique de résolution est présentée ci-dessous sans entrer dans les détails de la résolution numériques ou les techniques de programmation.

En utilisant les équations (50) dans leurs formes éclatées on trouve :

$$y_4 - \lambda_+ x_4 = y_2 - \lambda_+ x_2 \quad (56)$$

$$y_4 - \lambda_- x_4 = y_1 - \lambda_- x_1 \quad (57)$$

On peut tirer facilement les inconnues  $x_4$  et  $y_4$  à partir des équations (56) et (57) qui forment un système à deux équations. Où les pentes sont présentées ci-dessous :

$$\lambda_+ = \tan(\theta_+ - a_+) \quad (58)$$

$$\lambda_- = \tan(\theta_- - a_-) \quad (59)$$

Où :



$$\theta_{\pm} = \tan^{-1} \left( \frac{v_{\pm}}{u_{\pm}} \right) \quad (60)$$

$$V_{\pm} = \sqrt{u_{\pm}^2 + v_{\pm}^2} \quad (61)$$

$$a_{\pm} = a(V_{\pm}) \quad (62)$$

$$M_{\pm} = \frac{V_{\pm}}{a_{\pm}} \quad (63)$$

$$a_{\pm} = \sin^{-1} \left( \frac{1}{M_{\pm}} \right) \quad (64)$$

Par conséquent les valeurs de  $\theta_{\pm}$ ,  $a_{\pm}$  et de  $\lambda_{\pm}$  peuvent être déterminées en spécifiant  $u_{\pm}$  et  $v_{\pm}$ .

On peut aussi écrire les équations de compatibilités (51) sous la forme :

$$Q_+ u_4 + R_+ v_4 = T_+ \quad (65)$$

$$Q_- u_4 + R_- v_4 = T_- \quad (66)$$

Tel que :

$$T_+ = S_+(x_4 - x_2) + Q_+ u_2 + R_+ v_4 \quad (67)$$

$$T_- = S_-(x_4 - x_-) + Q_- u_1 + R_- v_1 \quad (68)$$

De même manière on peut résoudre le système d'équations formé par (65) et (66) pour  $u_4$  et  $v_4$ , où les coefficients sont listés ci-dessus :

$$Q_+ = (u_+^2 - a_+^2) \quad (69)$$

$$R_+ = (2u_+ v_+ - Q_+ \lambda_+) \quad (70)$$

$$S_+ = \delta \frac{a_+^2 v_+}{y_+} \quad (71)$$

$$Q_- = (u_-^2 - a_-^2) \quad (72)$$

$$R_- = (2u_- v_- - Q_- \lambda_-) \quad (73)$$

$$S_- = \delta \frac{a_-^2 v_-}{y_-} \quad (74)$$

Par conséquent les coefficients  $Q_+$ ,  $R_+$  et  $T_+$  peuvent être déterminées en spécifiant uniquement  $u_{\pm}$ ,  $v_{\pm}$  et  $y_{\pm}$ .

Pour l'algorithme de prédiction d'Euler, les valeurs de  $u_{\pm}$ ,  $v_{\pm}$  et  $y_{\pm}$  sont données par :

$$u_{+} = u_2 ; v_{+} = v_2 ; y_{+} = y_2$$

$$u_{-} = u_1 ; v_{-} = v_1 ; y_{-} = y_1$$

Insérant ces valeurs dans les équations (56), (61), (65) et (66) et résolvant ces équations simultanément pour obtenir la solution prédite  $x_4^0, y_4^0, u_4^0$  et  $v_4^0$ .

Et pour l'algorithme de correction d'Euler, les valeurs de  $u_{\pm}$ ,  $v_{\pm}$  et  $y_{\pm}$  sont données par :

$$u_{+} = \frac{u_2 + u_4}{2} ; v_{+} = \frac{v_2 + v_4}{2} ; y_{+} = \frac{y_2 + y_4}{2}$$

$$u_{-} = \frac{u_1 + u_4}{2} ; v_{-} = \frac{v_1 + v_4}{2} ; y_{-} = \frac{y_1 + y_4}{2}$$

En résolvant ces équations simultanément pour obtenir la solution prédite  $x_4^0, y_4^0, u_4^0$  et  $v_4^0$ .

En injectant les valeurs ci-dessus dans les équations (69) à (74), on obtient les valeurs moyennes de  $\theta_{\pm}, V_{\pm}, a_{\pm}, M_{\pm}$  et de  $a_{\pm}$ . En résolvant les mêmes équations qu'avant pour une deuxième fois, on obtient les solutions corrigées suivantes  $x_4^1, y_4^1, u_4^1$  et  $v_4^1$ .

En utilisant l'algorithme de prédiction correction d'Euler avec itération (49). On peut répéter la même procédure ci-dessus pour corriger la solution pour une deuxième fois ou pour une troisième et ainsi de suite,

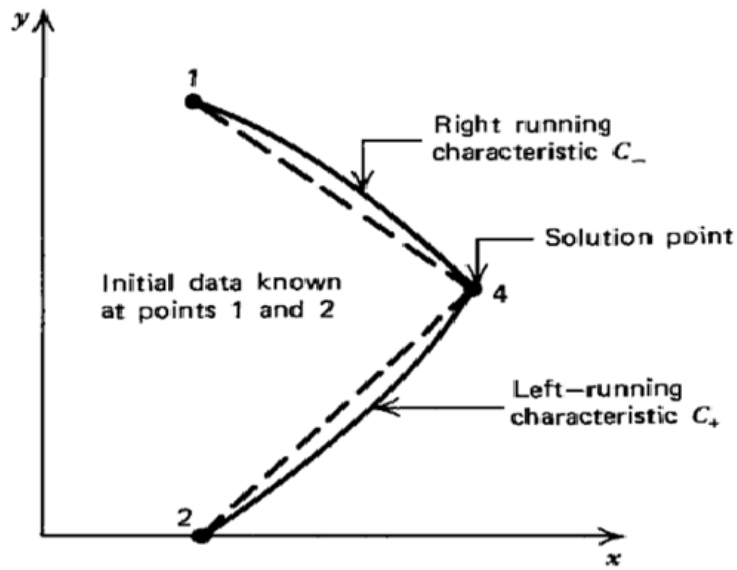
On arrête le processus de calcul à  $n$  itérations, lorsque on atteint la convergence décrite par la relation logique suivante :

$$|P^n - P^{n-1}| \leq (\text{tolérance spécifiée})$$

Où  $P$  représente  $x_4, y_4, u_4$  et  $v_4$ .

Comme montré sur la figure II-14, pour un écoulement axisymétrique le coefficient  $S$  donné par la relation (55) est indéfini sur l'axe  $X$  car  $y$  et  $v$  sont nuls. [139], mais on ne trouve pas de problèmes durant le calcul du prédicteur, parce que le prédicteur calcule  $S$  au point 1, de plus le correcteur calcule  $S$  en se basant sur les valeurs moyennes de  $y_{+}$  et de  $v_{+}$  qui sont différents de zéro.

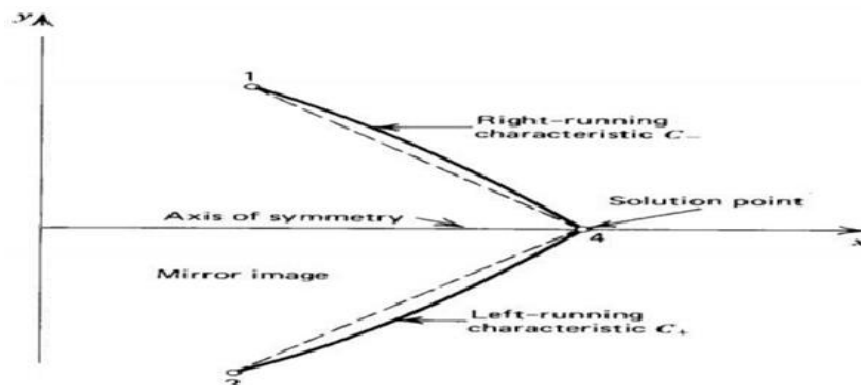
Dans ce cas le rapport  $\frac{v_2}{y_2}$  est approximé au rapport  $\frac{v_1}{y_1}$  pour le prédicteur, par contre le correcteur  $S$  est basé sur la valeur moyenne de  $y_{+}$  et de  $v_{+}$  qui ne sont pas nulles.



**Figure II. 14: Point intérieur sur l'axe de symétrie**

II.2.5 Calcul d'un point sur l'axe de symétrie :

Pour un écoulement bidimensionnel axisymétrique, l'axe  $X$  représente l'axe de symétrie. La figure II-15 [26] présente schématiquement le point axial qui est le point 4. Si le point 1 est un point sur la caractéristique  $C_-$  passant sur le point 4, alors comme illustré sur la figure II-15, le point 2 en dessous de l'axe de symétrie peut être défini comme une image du point 1. Le point 4 est donc identique à un point interne, alors on peut utiliser la procédure développée pour les points intérieurs pour calculer les propriétés d'un point sur l'axe. Cependant dans ce cas pour ce qui suit, seule la caractéristique 14 est employée et les équations (55) et (66) sont résolues simultanément avec les données  $y_4 = v_4 = \theta_4 = 0$  ce qui simplifie la procédure de calcul

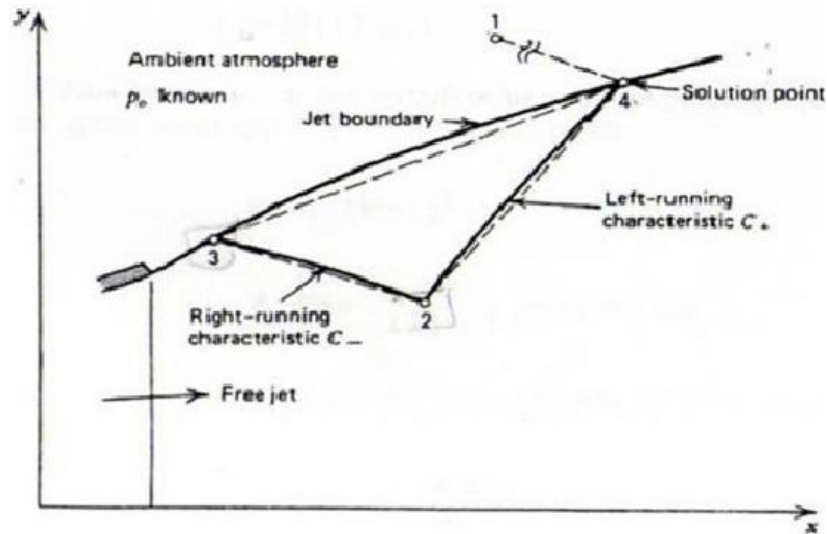


**Figure II. 15: Point axiale**

## II.2.6 Calcul pour un point du jet libre :

La figure II-16 [26] montre schématiquement la partie supérieure de la région où le flux de fluide compressible débouche dans l'atmosphère à une pression statique  $P_0$ . La pression statique du fluide est  $P_4 = P_0$  au point de la limite externe du jet dénoté point 4 d'où l'appellation point du jet libre.

Par conséquent, la procédure numérique de l'analyse du point de jet libre doit prendre en considération la condition  $P_4 = P_0$ .



**Figure II. 16: Point du jet libre**

Comme dans le cas d'un point paroi, seulement une équation de la compatibilité est applicable car la caractéristique 14 se situe à l'extérieur de l'écoulement, et c'est valide le long de la caractéristique 24 (voir figure II-16). En effet, puisque la pression statique au point 4 est connue, ( $P_4 = P_0$ ) et la vitesse d'écoulement  $V$  et la pression statique  $P$  dans le jet libre sont uniquement reliées par la relation de l'écoulement isentropique. Donc la vitesse  $V_4$  est donnée par :

$$V_4 = (u_4^2 + v_4^2)^{\frac{1}{2}} = f(P_4) = f(P_0) = \text{valeur connue} \quad (75)$$

Les équations (65) et (75) donnent deux relations entre  $u_4$  et  $v_4$ .

$$u_4 = \frac{Q_+ T_+ - R_+ [V_4^2 (Q_+^2 + R_+^2) - T_+^2]^{\frac{1}{2}}}{Q_+^2 + R_+^2} \quad (76)$$

$$v_4 = (V_4^2 - u_4^2)^{\frac{1}{2}} \quad (77)$$

Pour déterminer l'emplacement du point 4, il est nécessaire de fournir un rapport supplémentaire par la condition que la limite du jet est une ligne de courant, le long de cette ligne 34, le  $\lambda_0$  est :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v}{u} = \lambda_0 \quad (78)$$

En différences finies, l'équation (78) s'écrit :

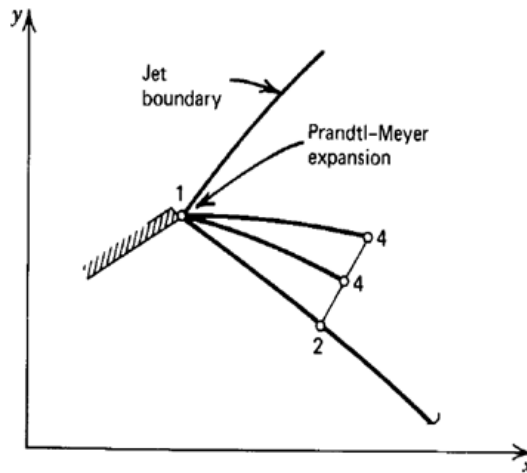
$$y_4 - \lambda_0 x_4 = y_3 - \lambda_0 x_3 \quad (79)$$

Les équations (56) et (79) doivent être résolues simultanément pour déterminer l'emplacement du point 4.

#### II.2.7 Le processus :

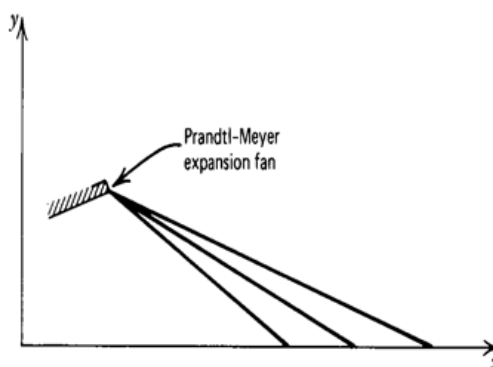
En utilisant la méthode des caractéristiques appliquée pour la Détente de Prandtl-Meyer autour de point de jonction J avec l'intensité égale  $\frac{M_2}{M_1}$  Pour l'hypothèse d'un fluide non visqueux, Le contour de la deuxième galbe (de l'extension de la tuyère) est conçu pour donner un nombre de Mach de paroi constante  $M_2$ .

Une fois le champ d'écoulement à l'intérieur de la tuyère déterminé, la solution peut être étendu dans le jet, ou panache, déchargé par la tuyère en appliquant l'unité de **Calcul pour un point du jet libre**. Au niveau de la lèvre de sortie de la tuyère, une onde Prandtl-Meyer, ou centrée apparaît lorsque la pression statique du gaz dépasse celle de pression atmosphérique. La figure II-17 illustre le processus pour déterminer les caractéristiques right-running émanant à des angles de rotation spécifiés du point de sortie de la lèvre de la tuyère.



**Figure II. 17: processus d'unité d'expansion Prandtl-Meyer**

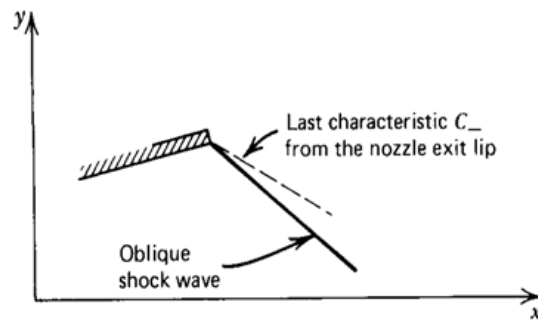
Pour déterminer les propriétés d'écoulement au point, il faut appliquer l'analyse d'onde d'expansion de Prandtl-Meyer, et pour déterminer l'emplacement et les propriétés d'écoulement au point 4, on peut utiliser Le processus d'unité de point intérieur, et les right-running caractéristiques peuvent être étendues de la lèvre de sortie de la tuyère à l'axe. Pour que la pression statique du gaz dans le panache soit égale à celle de l'atmosphère environnante, Ce dernier processus doit être répété jusqu'à ce que le flux au niveau de la lèvre de sortie de la tuyère soit tourné de l'angle requis. La figure II-18 illustre la partie du champ d'écoulement déterminée à partir d'onde de détente au niveau de lèvre de la tuyère.



**Figure II. 18: Étendue du champ déterminée par l'onde d'expansion Prandtl-Meyer au niveau de la lèvre de sortie de la tuyère**

Comme montré sur la figure II-19. Si la pression du gaz au niveau de la lèvre de sortie de la tuyère est inférieure à celle de la pression atmosphérique, une onde de choc oblique se produit de la lèvre de sortie de la tuyère et se propage dans le champ

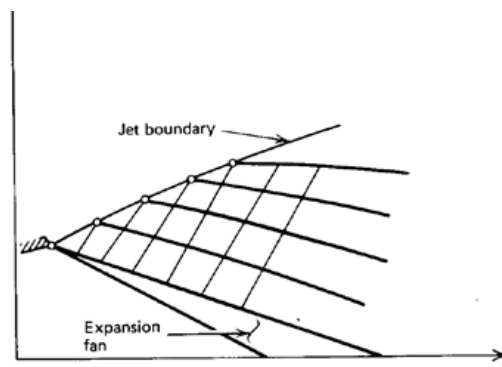
d'écoulement. Par conséquent, le champ d'écoulement dans cette région doit être recalculé pour tenir compte de la présence de l'onde de choc oblique.



**Figure II. 19: Onde de choc oblique dans un écoulement de tuyère sur-expansé**

Cette procédure est assez complexe, mais il faut que l'emplacement de l'onde de choc oblique et les propriétés d'écoulement devant et derrière celle-ci soit déterminables. Par conséquent, le champ d'écoulement dans le panache peut être déterminé à partir des données pertinentes pour le côté aval de l'onde de choc oblique.

Pour obtenir des points sur la frontière du jet, on applique le processus unitaire pour un point frontière de pression libre. La figure II-20 illustre schématiquement la procédure. À partir de chaque point de la limite du jet, une right-running caractéristique est étendue à l'axe de symétrie. Finalement, des ondes de choc obliques, puis normales, apparaissent incrustées dans le jet. La solution dans cette région du jet exige à l'écoulement de rester continue et supersonique, ce qui n'est pas très loin. On rappelle qu'une limitation fondamentale de la méthode des caractéristiques est que les variables dépendantes doivent être continues, et l'écoulement doit être supersonique.



**Figure II. 20: Détermination du champ d'écoulement dans le jet**

# CHAPITRE III : CALCUL NUMÉRIQUE



## I. Introduction :

Aujourd'hui, la dynamique des fluides computationnelle (CFD) joue un rôle important dans de nombreux problèmes de recherche fondamentale et industriel, elle devient de plus en plus importante grâce à l'amélioration des systèmes informatiques et des méthodes numériques nouvellement développées. [29] Elle consiste à étudier les écoulements d'un fluide, le transfert de chaleur et de masse, les réactions chimiques et des phénomènes connexes, en résolvant numériquement l'ensemble des équations mathématiques gouvernantes :

- Conservation de la masse
- Conservation de la quantité de mouvement
- Conservation de l'énergie

La CFD est actuellement un passage obligé avant tout développement de dispositifs dont le fonctionnement est lié à la circulation d'un fluide. [30] Elle est utilisée comme alternative aux expériences réelles car elle offre un moyen rentable d'observer et d'expérimenter. En utilisant la simulation, la CFD permet aux scientifiques, ingénieurs et praticiens d'observer plusieurs scénarios et de tirer des conclusions plus précises en fonction des mesures souhaitées [31], avec la possibilité de faire varier plus de paramètres, Les utilisateurs peuvent également modifier le calendrier d'une étude donnée, ce qui n'est pas possible dans des situations pratiques.

En effet, la CFD peut simuler des expériences qui seraient en réalité trop coûteuses, difficiles ou impossibles à réaliser dans une situation donnée. Elle est donc devenue un outil indispensable pour le développement de la recherche et de l'industrie.

La CFD est particulièrement utile pour :

Pré-dimensionnement.

Optimisation de forme/process.

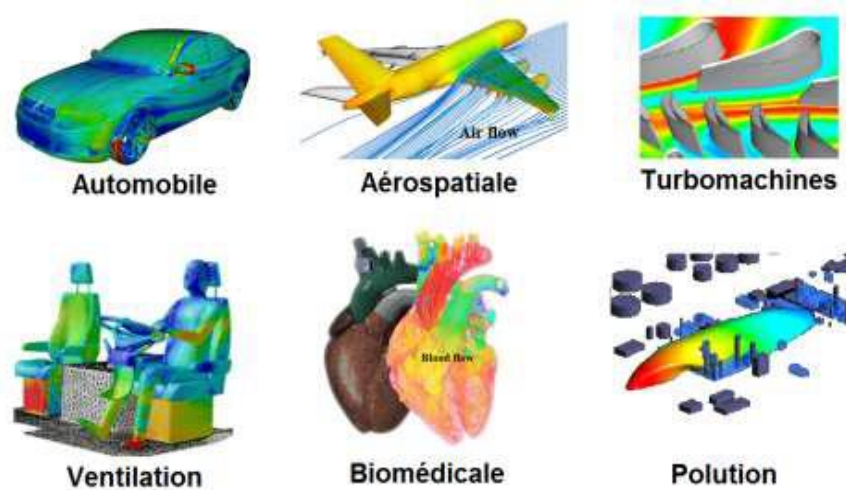
Calcul/Dimensionnement d'efforts sur des structures.

Visualisation des champs de pression, vitesse...etc.

Domaines d'applications de la CFD :

- Aérodynamique des avions et des véhicules : portance et trainée
- Hydrodynamique des navires.

- Turbomachines : écoulement à l'intérieur des passages tournants, diffuseurs, etc.
- Industries des procédés et de la chimie.
- Applications de défense et spatiales.
- Centrale thermique et nucléaire.
- Applications biomédicales.



**Figure III.1 : Domaines d'applications de la CFD**

## II. Logiciels populaires pour l'analyse CFD :

Plusieurs logiciels CFD sont à la disposition des utilisateurs parmi eux des logiciels faciles à utiliser et à apprendre grâce au guide de l'utilisateur et le matériel de formation qui sont fournis (logiciels commerciaux). Cependant, ils ont des frais de licence élevés. En effet ils existent d'autres logiciels qui sont disponibles gratuitement mais les utilisateurs CFD ne peuvent pas obtenir de matériel de formation détaillé.

### ➤ Les logiciels commerciaux :

Fluent et Star-CCM+ sont des outils d'excellence et de diversité pour les simulations CFD. Fluent semble conquérir plus de parts de marché sur les marchés des produits électroniques et industriels et Star-CCM+ dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'automobile et de l'énergie. [30] COMSOL et AcuSolve d'Altair sont moins utilisés, ils sont des Simulations multi-physiques plus importantes. Pourtant, ils ont rapidement pris de l'ampleur, la capacité supplémentaire est désormais proche de celle des deux géants. Tout quatre avec des capacités de maillage et de post-traitement, peuvent accepter et générer tous les types et formats de fichiers populaires. Cependant ces logiciels sont coûteux.

➤ Les logiciels libres Open Source :

Ces logiciels offrent une utilisation libre et fournissent aux utilisateurs une licence pour modifier le code source selon leurs besoins. Parmi ces logiciels les plus utilisés on trouve OpenFOAM, SU2, Palabos, Fire Dynamics Simulator et MFX. OpenFOAM est devenu le principal logiciel open source pour la dynamique des fluides computationnelle, il a acquis une crédibilité considérable ces dernières années grâce à des études de vérification et de validation réalisées par une base d'utilisateurs croissante.

### III. Modèle de calcul Ansys19.0 :

Ansys est un logiciel de simulation numérique leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels, il est un outil de conception assistée par ordinateur (CAO) qui permet de concevoir et de générer des géométries 3D/2D et d'appliquer des simulations. Il permet la construction de surfaces et de volumes à partir d'une série de points qui définissent des formes géométriques de base [32], ANSYS fournit une plate-forme informatique multi-physique qui intègre la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique et la simulation de systèmes et de circuits.

Les utilisateurs d'ANSYS viennent de différents domaines industriels tels que l'ingénierie mécanique, l'énergie, l'automobile, les chemins de fer, l'aérospatiale, le médical, la microtechnique, la microélectronique. L'Ansys couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage et système d'analyse FLUENT.

FLUENT est un programme de simulation numérique des écoulements de fluide compressibles, incompressibles, stationnaires ou instationnaires impliquant divers phénomènes physiques tels que le transfert de chaleur, la turbulence, les réactions chimiques, les écoulements dans les machines tournantes, moteurs thermiques, et ce pour des géométries industrielles très complexes. Il utilise la méthode des volumes finis (maillage non structuré 2D ou 3D) pour la discrétisation des différentes équations aux dérivés partielles modélisant le phénomène physique.

### IV. Techniques d'analyse numérique :

Afin de résoudre les équations gouvernantes du mouvement des fluides, il faut d'abord générer leur analogue numérique. Cela se fait par un processus appelé discrétisation. Dans le processus de discrétisation, chaque terme de l'équation aux

dérivées partielles décrivant le flux est écrit de telle manière que l'ordinateur peut programmer pour calculer. Il existe différentes techniques de discrétisation numérique. Nous présenterons ici trois des techniques les plus couramment utilisées, à savoir :

1. la méthode des différences finies.
2. la méthode des éléments finis.
3. la méthode des volumes finis.

Actuellement, la méthode la plus largement utilisée en CFD est la méthode des volumes finis, qui discrétise directement la forme intégrale de l'équation de conservation. Sa généralité et sa simplicité, ainsi que sa facilité d'application aux grilles structurées et non structurées en ont fait le succès. Comprendre et assimiler cette approche aide grandement à garder une trace des derniers développements derrière les outils CFD, ainsi qu'à interpréter les résultats obtenus en appliquant les codes de trading à des problèmes pratique.

#### IV.1 La méthode des différences finies (FDM) :

La méthode des différences finies est considérée comme la méthode la plus ancienne et la plus simple pour la résolution des EDP, elle est connue pour la première fois par LEONARD EULER (1707-1783), [41] elle utilise le développement en série de Taylor pour écrire les dérivées d'une variable sous forme de différences entre les valeurs de la variable à différents points de l'espace ou du temps.

Pour une fonction  $u(x)$ , la dérivée au point  $x$  est définie par :

$$u_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{u(x+\Delta x) - u(x)}{\Delta x} \quad \text{III.(1)}$$

Si  $\Delta x$  est petit mais fini, l'expression du droit est une approximation de la valeur exacte de  $u_x$ , l'approximation va être améliorée par la réduction de  $\Delta x$ .

Ces équations sont mathématiquement exactes si le nombre de termes  $x$  est infini et  $\Delta x$  est petit.

Pour n'importe quelle valeur de  $\Delta x$ , une erreur est introduite, appelée erreur de troncation (erreur de discrétisation).

La formule de Taylor constitue la colonne vertébrale de la méthode des différences finis. [34]

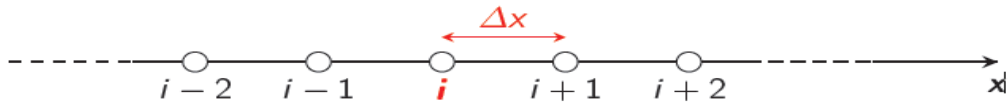
Développement de  $U(x + \Delta x)$  au voisinage de  $x$  :

$$u(x+\Delta x) = u(x) + \Delta x u_x(x) + \frac{\Delta x^2}{2} u_{xx}(x) + \frac{\Delta x^3}{6} u_{xxx}(x) + \dots \quad \text{III.(2)}$$

Développement de  $u(x - \Delta x)$  au voisinage de  $x$  :

$$u(x+\Delta x)=u(x) - \Delta x u_x (x) + \frac{\Delta x^2}{2} u_{xx} (x) - \frac{\Delta x^3}{6} u_{xxx} (x)+\dots \quad \text{III.(3)}$$

On considère un maillage de  $m$  points régulièrement espacé de  $\Delta x$  :



**Figure III.2 : maillage uniforme suivant  $x$**

Approximation de la première dérivée :

$$\frac{u(x+\Delta x)-u(x)}{\Delta x} = u_x (x) + \frac{\Delta x}{2} u_{xx} (x) \quad \text{III.(4)}$$

Erreur de troncation :

$$u(x+\Delta x) - \frac{u(x)}{\Delta x} \approx u_x (x) + O(\Delta x) \quad \text{III.(5)}$$

Approximation de la deuxième dérivée :

Une approximation aux différences finies des dérivées supérieures peut être obtenue en répétant la première cartographie du premier ordre. Par exemple, une approximation du second ordre de la dérivée seconde peut être obtenue par :

$$(u_{xx})_i = \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_i = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \quad \text{III.(6)}$$

#### IV.2 La méthode des éléments finis : (FEM)

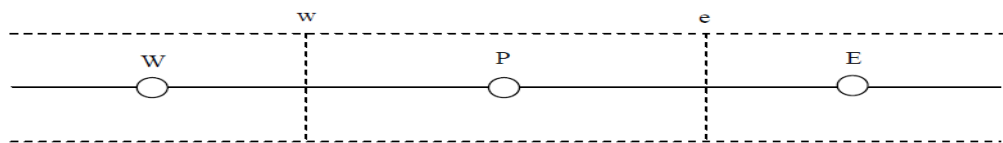
Dans la méthode des éléments finis on utilise des fonctions linéaires ou quadratiques, sur chaque élément, pour décrire la variation locale de l'inconnu. Les équations différentielles sont exactement vérifiées par la solution exacte. En remplaçant l'approximation de l'inconnu dans les équations différentielles, on constate que celles-ci ne vérifient pas exactement, et un résidu est défini dans ce cas pour mesurer l'erreur.

#### IV.3 La méthode des volumes finis : (FVM)

La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation bien adaptée à la simulation numérique de divers types (elliptiques, paraboliques ou hyperboliques) de

lois de conservation ; elle a été largement utilisée dans plusieurs domaines d'ingénierie, tels que la mécanique des fluides, le transfert de chaleur et de masse ou l'ingénierie pétrolière. Elle est actuellement la méthode la plus populaire en CFD. La raison principale est qu'elle peut résoudre certaines des difficultés rencontrées par les deux autres méthodes.

Elle consiste sur discrétisation du domaine de calcul : diviser ce domaine en un nombre de sous domaines appelés volumes de contrôle non chevauchant et entourant chacun d'eux un nœud. Un volume fini typique est illustré à la Figure.



**Figure III.3 : Volume fini à une dimension**

Dans cette figure, le centroïde du le volume, point P, est le point de référence auquel on veut discrétiser l'équation différentielle partielle.

Ces voisins, dans le cas unidimensionnel sont les nœuds West et Est, sont respectivement identifiés par W et E.

La face West du volume de contrôle est désignée par w.

La face Est du volume de contrôle est désigné par e.

**La première dérivée :**

$$\left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_e = \frac{u_E - u_P}{x_E - x_P} \quad \text{et} \quad \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_w = \frac{u_P - u_W}{x_P - x_W} \quad \text{III.(7)}$$

**La deuxième dérivée :**

$$\left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right]_P = \frac{\left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_e - \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_w \right]}{x_e - x_w} \quad \text{III.(8)}$$

La méthode ci-dessus est également appelée méthode centrée sur la cellule (CC), dans laquelle les variables de flux sont attribuées au centre de la cellule de calcul. La disposition variable CC est la plus populaire, car elle conduit à des implémentations considérablement plus simples que d'autres arrangements. D'autre part, l'arrangement CC

est plus sensible aux erreurs de troncature, lorsque le maillage s'écarte des rectangles uniformes.

Traditionnellement, les méthodes de volumes finis ont utilisé des grilles régulières pour l'efficacité des calculs. Cependant, récemment, les grilles irrégulières sont devenues plus populaires pour simuler des écoulements dans des géométries complexes. De toute évidence, l'effort de calcul est plus important lorsque des grilles irrégulières sont utilisées, car l'algorithme doit utiliser une table pour rechercher les relations géométriques entre les volumes ou les faces des éléments. Il s'agit de trouver des données à partir d'un stockage sur disque de l'ordinateur, ce qui augmente le temps de calcul. [33]

#### **Etapas dans la CFD pour arriver à la solution :**

- La discrétisation du domaine en un ensemble fini de volume de contrôle.
- La résolution des équations générales de conservation de la masse, quantité de mouvement, l'énergie ...etc.
- La discrétisation des équations différentielles partielles en un système d'équations algébriques  $[A].\{\emptyset\} = [b]$

Où :  $[A]$  la matrice des coefficients.

$\{\emptyset\}$  Vecteur solution.

$[b]$  Vecteur second membre.

Toutes les équations algébriques sont ensuite résolues numériquement pour avoir la solution.

### **V. L'organisation d'un projet de simulation CFD :**

#### **1. Identification du problème :**

Dès le début de l'étude, il est nécessaire de connaître quels sont les objectifs à atteindre en termes de caractéristiques de l'écoulement ou de phénomènes à reproduire, donc il est important de comprendre l'influence des phénomènes qui peuvent impacter le sujet d'étude afin de réaliser le modèle adéquat, ainsi qu'identifier le domaine de calcul et ses frontières, donc il faut avoir des informations sur les conditions aux limites.

Et pour gagner du temps du calcul il faut voir si le problème peut être résolu simplifier ou approximer des problèmes 2D ou axisymétriques

#### **2. Prétraitement (pre-processing) :**

On construit la géométrie qui contient le domaine d'étude, puis on génère le maillage à l'intérieur de ce domaine, ensuite on spécifie les propriétés physiques du fluide et on choisit les modèles à appliquer, l'algorithme de calcul, les méthodes d'interpolation et autres schémas.

### 3. Résolution :

La phase de calcul, ou de résolution des équations algébriques.

### 4. Post-traitement (Post-processing) :

La phase de traitement et d'interprétation des résultats.

## VI. Les étapes d'une simulation :

### VI.1 La Géométrie :

Toute simulation CFD commence par la réalisation de la géométrie en 2D ou 3D, soit avec un logiciel intégré au code de calcul CFD soit à l'aide d'un logiciel de CAO qui permet de reproduire le plus explicitement possible la géométrie du système à étudier, dans ce cas la géométrie doit être exportée en un format lisible par le logiciel de maillage. Une géométrie bien conçue implique évidemment un bon résultat.

### VI.2 Le Maillage :

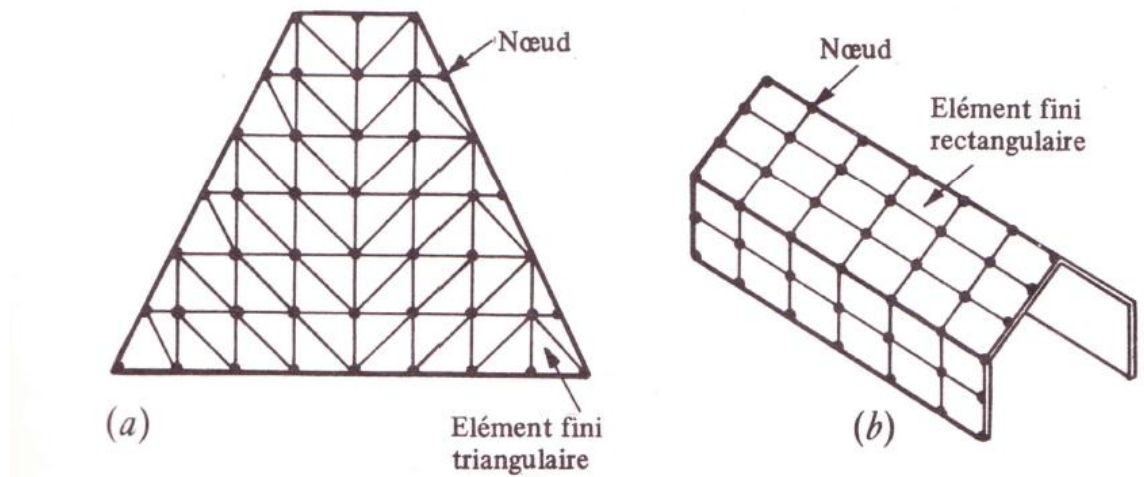
La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu son influence sur la solution calculée, il divise des géométries complexes en éléments qui peuvent être utilisés pour discrétiser un domaine. Le principe de base consiste à modéliser un problème physique par un système d'équations pour le résoudre dans un domaine de calcul représentant une géométrie particulière. La qualité du maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul. Une bonne qualité de maillage repose sur la minimisation des éléments présentant des « distorsions » et sur une bonne « résolution » dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc, . . .). [35] La création d'un maillage de haute qualité est l'un des facteurs les plus critiques qui devraient être pris en compte pour assurer la précision de la simulation.

#### VI.2.1 Notions de Maillage :

##### **Nœuds et éléments :**

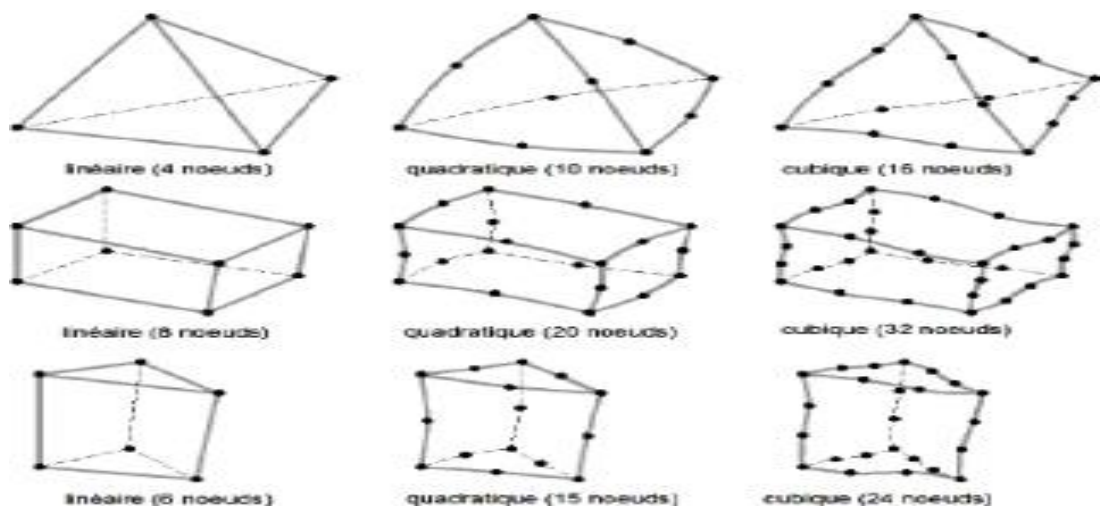
Avant d'exécuter une simulation CFD la géométrie est divisée en petits morceaux appelés éléments ou mailles, associés à ces éléments, nous retrouvons les nœuds de discrétisation, c'est-à-dire les points de résolution des équations discrètes.





**Figure III.4 : composants du maillage.**

La grille du maillage peut avoir différentes formes et tailles, par exemple dans les modèles tridimensionnels, la plupart des éléments sont des tétraèdres, un élément à quatre côtés et à face triangulaire. Dans les modèles bidimensionnels la plupart des éléments de triangle.



**Figure III.5 : types du maillage en 2D et 3D**

### VI.2.2 Types de maillage :

Il est courant de classer les maillages en deux types principaux : structurés et non structurés. Lorsqu'on utilise les deux types de maillage en même temps on appelle le maillage hybride.

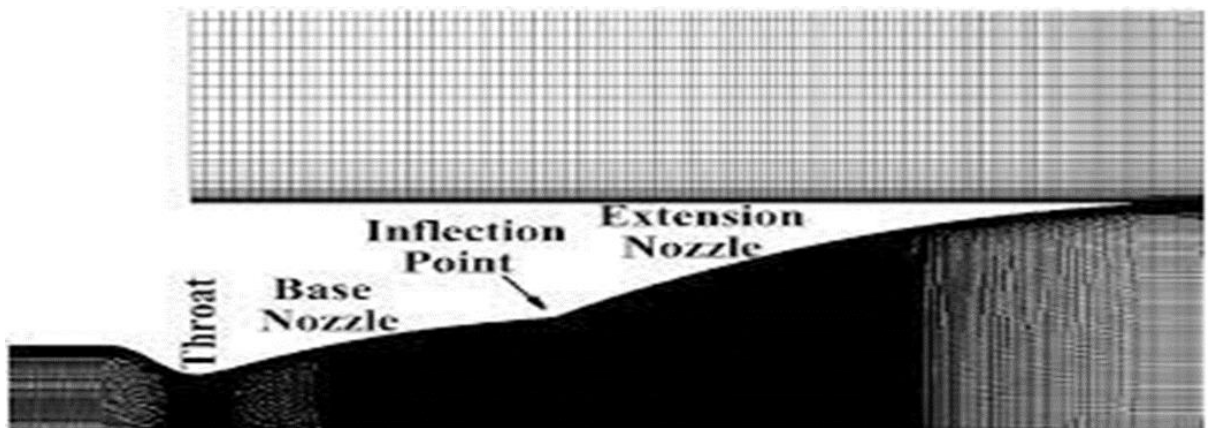
➤ Maillage structuré :

Ce maillage peut être considéré comme le plus habituel pour les problèmes d'écoulement. La connectivité est simple car les cellules adjacentes à une face élémentaire donnée sont identifiées par les indices et les bords des cellules forment des lignes de maillage continues qui commencent et se terminent sur des faces élémentaires opposées.

Le domaine comporte des cellules quadrilatères en 2D ou hexaèdres (en 3D) et les nœuds sont identifiés par une paire en 2D (ou triplé en 3D).

Les mailles structurées offrent simplicité et efficacité. Une grille structurée nécessite moins de mémoire - disons un tiers de moins - qu'une grille non structurée avec le même nombre d'éléments, car le stockage de tableau peut implicitement définir des connexions adjacentes. Une grille structurée permet également de gagner du temps pour accéder aux cellules voisines lors du calcul de modèles de différences finies, le logiciel incrémente ou décrémente simplement les indices du tableau.

En revanche, il peut être difficile voire impossible de calculer un maillage structuré pour un domaine géométrique compliqué. De plus, un maillage structuré peut nécessiter beaucoup plus d'éléments qu'un maillage non structuré pour le même problème. [36] Et il est difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes. Il est beaucoup plus facile à générer en utilisant une géométrie à blocs multiples.

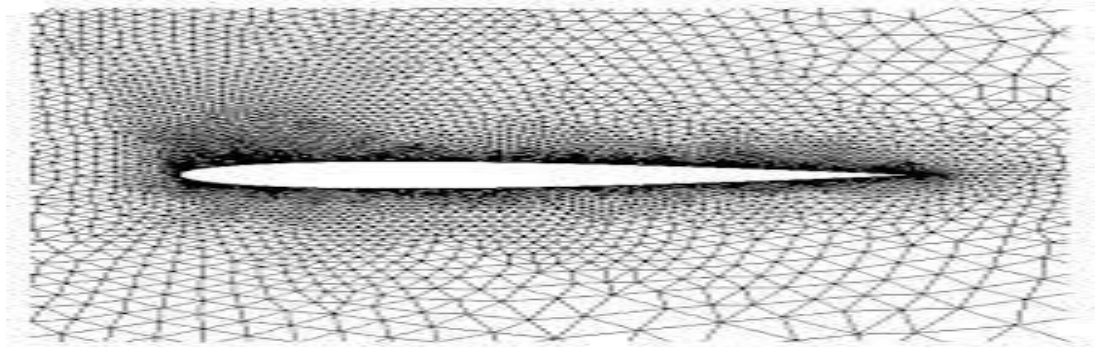


**Figure III.6 : Maillage structuré dans une tuyère double galbe**

➤ Maillage non structuré :

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte par rapport à leur disposition. Les maillages non structurés les plus utilisés sont les maillages triangulaires, car il existe plusieurs manières de relier les mailles de cette

forme, il est aussi facile de remplir aléatoirement n'importe quel domaine, ceci est notamment possible grâce à la flexibilité de la connectivité [37]. Cependant le maillage non structuré est très gourmand en nombre de mailles et peut engendrer des erreurs numériques, qui peuvent être très importantes si l'on compare avec le maillage structuré, ainsi que la structure de données gourmande en capacités de stockage qu'il impose.

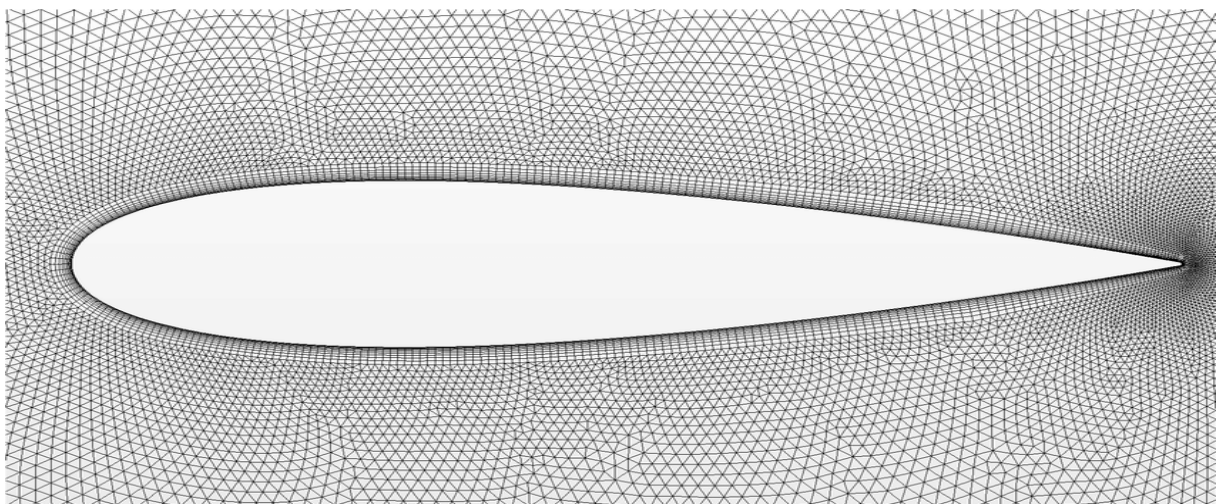


**Figure III.7 : maillage non structuré autour d'un profil**

➤ Maillage Hybride :

Un maillage hybride contient un mélange de parties structurées et non structurées. Il intègre les maillages structurés et les maillages non structurés de manière efficace. Les parties de la géométrie qui sont régulières peuvent avoir des grilles structurées et celles qui sont complexes peuvent avoir des grilles non structurées. Ces grilles peuvent être non conformes, ce qui signifie que les lignes de grille n'ont pas besoin de correspondre aux limites des blocs.

Il combine entre les avantages des maillages structurés et non structurés.



**Figure III.8 : maillage Hybride (structuré et non structuré)**

Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant, il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable. Nous pouvons résumer ces règles ainsi.

- Maintenir une bonne Qualité des éléments.
- Assurer une bonne Résolution dans les régions à fort gradient.
- Assurer un bon Lissage dans les zones de transition, entre les parties à maillage grossier.
- Minimiser le nombre Total des éléments (temps de calcul raisonnable).



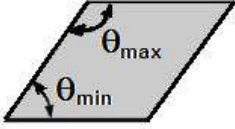
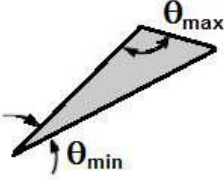
### VI.2.3 Qualité du Maillage :

La qualité du maillage a un impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps du calcul. Une bonne qualité du maillage repose sur la minimisation des éléments présentant des distorsions (skewness) et sur une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient (gap, couche limite, onde de choc...etc.).

Une bonne qualité de maillage est synonyme de grandes distorsions d'éléments.

Le calcul de facteur de distorsion est illustré dans le tableau suivant : [2]

**Tableau III. 1: calcul de facteur de distorsion**

Facteur de distorsion $F_d$	Quad/Hex	Tri/Tet
$F_d = \max\left\{\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e}\right\}$ <p><math>F_d = 0</math> → Élément parfaitement Orthogonale</p> <p><math>F_d = 1</math> → Élément complètement Distordu</p>	$\theta_e = 90^\circ$ 	$\theta_e = 60^\circ$ 
		

Des valeurs élevées du facteur de distorsion peuvent entraîner des erreurs de calcul et ralentir considérablement le processus de convergence. Une certaine distorsion peut être tolérée si elle est située dans des régions à faible gradient.

**Tableau III. 2 : Qualité du maillage**

$F_d$	0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.8	0.8-95	0.95-0.99	0.99-1
Qualité	Excellent	Bon	Acceptable	Pauvre	Très pauvre	Mauvais

➤ Le tableau ci-dessus présente la qualité du maillage en fonction des valeurs de facteur de distorsion.

### **Les conditions initiales :**

Les conditions initiales représentent le comportement de l'écoulement en termes de vitesse et de position de la surface libre au début de la simulation. Les simulations peuvent diverger rapidement si les calculs commencent avec des valeurs aléatoires. Afin de ne pas trop s'écarter des résultats réels et d'optimiser le temps de calcul, les conditions initiales sont étudiées et sélectionnées préalablement à l'étude CFD.

Il existe également les conditions aux limites dans lesquelles le facteur principal est l'espace, mais dans les conditions initiales, le facteur principal est le temps. [31]

### **Les conditions aux limites :**

Les conditions aux limites peuvent être généralisées en tant qu'hypothèses pour la simulation. C'est l'étape la plus déterminante pour la réussite de l'étude, la mise en place des conditions aux limites propres au projet doit être étudiée en détail en début de mission. Donc la détermination de toutes les frontières du volume de contrôle dans lequel l'écoulement sera simulée, les régions en dehors du domaine de calcul ainsi que les propriétés de fluide d'écoulement sont à faire.

Parfois il suffit juste de préciser le type de la paroi (adiabatique, non glissante...etc.), mais dans certains cas des informations complémentaires sont exigées tel que la température de la paroi.

Pour les écoulements qu'on a à étudier (écoulements confinés et limités par la paroi de la tuyère) nous avons à préciser quatre conditions aux limites :

- Condition d'écoulement à l'entrée du domaine.
- Conditions d'écoulement à la sortie du domaine.
- Conditions de symétrie.
- Conditions aux parois solides.

### **Conditions d'entrée :**

➤ L'écoulement à l'entrée est subsonique, trois conditions sont à imposer :

Pression totale ou de stagnation ;  $P_0$ .

Température totale ou de stagnation ;  $T_0$ .

Vitesse transversale nulle ;  $U_2 = 0$ .

➤ L'écoulement à l'entrée est supersonique, le nombre de Mach doit être spécifié et par conséquent, quatre conditions sont nécessaires :

Pression totale ;  $P_0$ .

Température totale ;  $T_0$ .

Vitesse transversale nulle ;  $U_2 = 0$ .

Vitesse axiale  $u_1$  correspondante au nombre de Mach spécifié. [37]

#### **Condition de sortie :**

Pour les écoulements internes une seule condition de sortie est imposée. Cette condition correspond à la pression statique à la sortie.

#### **Condition de symétrie :**

Pour les problèmes qui ont un plan de symétrie, le fait que la solution est une symétrie peut être exploité en modélisant seulement la moitié du problème et en définissant le type de frontière comme Symétrie au niveau du plan de symétrie et la condition symétrique est assurée en imposant une vitesse latérale nulle le long du plan de symétrie.

#### **Condition aux parois solides :**

Ce type de condition aux limites est utilisé pour les parois physiques du domaine de simulation. Il spécifie la vitesse du fluide à la surface de la paroi. Par exemple, pour une paroi stationnaire en écoulement visqueux, une condition aux limites de la paroi imposerait toutes les composantes de la vitesse à zéro.

### VI.3 La Résolution :

La simulation numérique de la dynamique des fluides est un outil majeur développé aujourd'hui en tant qu'outil de recherche et d'analyse industrielle. Nous pouvons décrire les étapes d'une résolution comme ci-dessous :

- Le paramétrage du solveur.
- La modélisation de la turbulence.
- La définition des caractéristiques du fluide.
- Le réglage des "Operating conditions".
- Le paramétrage des conditions aux limites.
- Le choix des critères de convergence.

Conservation de la masse.

Evolution d'une variable pendant les calculs.

- L'initialisation des calculs.
- Le paramétrage des sauvegardes automatiques en cours de simulation.

- Le lancement de la simulation.

Le solveur utilisé pour notre étude est Fluent car il fournit de bons résultats pour les écoulements internes. Ce logiciel dispose de nombreux modèles : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, turbulence (LES, k- $\epsilon$ , k- $\omega$ , S-A, Reynolds Stress...).

La notion de modèle de turbulence est prépondérante en mécanique des fluides. Elle permet de cataloguer les différentes structures dans un écoulement et de leur donner une certaine importance au sein de l'écoulement.

En effet, le choix du modèle de turbulence est important et dimensionne l'efficacité et la précision d'une simulation numérique combiné au maillage.

## VII. La modélisation des écoulements turbulents :

Il existe 3 approches pour la modélisation des turbulents :

- Direct numerical simulation (DNS).
- Large eddy simulation (LES).
- Reynolds averaged Navier-Stokes equations (RANS).

### VII.1 Simulation Direct Numérique (DNS)

Cette méthode permet de résoudre les équations de Navier-Stokes sans aucune modélisation, tous les mouvements doivent être résolus par cette méthode donc ceci nécessite un maillage suffisamment fin pour capturer jusqu'à la plus petite échelle de turbulence, ce qui signifie un temps de calcul extrêmement long, ainsi que le coût augmenté qu'elle demande ce qui la rend inappropriée pour la majorité des problèmes de l'ingénierie, néanmoins cette méthode reste essentielle pour la compréhension des comportements turbulents.

### VII.2 Simulation des grandes échelles (LES)

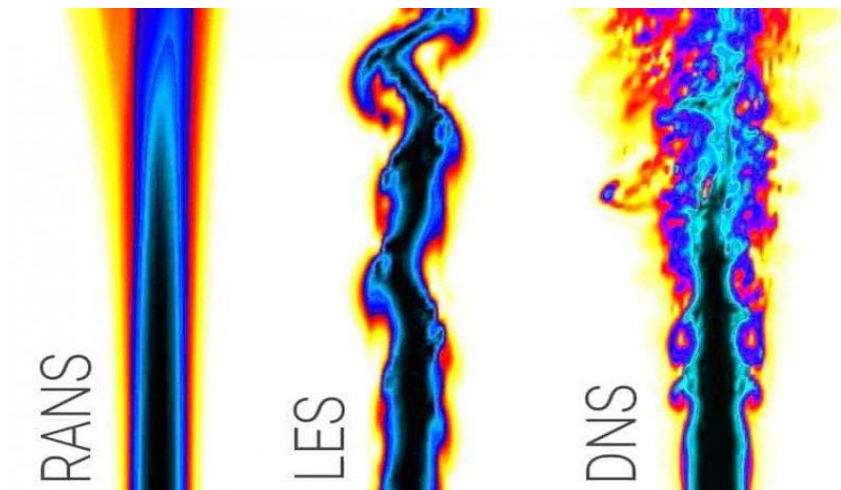
Afin de diminuer la taille des mailles par rapport à la DNS, la simulation des grandes échelles est fortement liée à la résolution numérique des équations de Navier-Stokes en régime turbulent et à la notion de séparation d'échelles par filtrage spatial. Les échelles de turbulence les plus petites sont filtrées et modélisées tandis que les grandes échelles contenant la majeure partie de l'énergie sont simulées. Cette méthode présente

l'avantage de tendre vers une DNS quand la taille de maille diminue. En effet, le maillage doit être suffisamment raffiné pour pouvoir résoudre les structures les plus petites.

➤ La DNS et LES sont des méthodes prometteuses, car la perte d'informations est minimale pour la première, un peu plus importante pour la deuxième. En revanche leur coût qui est considérablement les rend inutilisables dans des configurations industrielles. [39]

### VII.3 Modélisation statistique de la turbulence (RANS)

Pour étudier les mouvements des fluides, l'approche aux équations de Navier-Stokes moyennées (RANS) est la plus courante parmi les logiciels de simulation dans le secteur industriel, car cette méthode présente un temps de calcul plus court que les méthodes LES et DNS, et n'a pas besoin de recourir à des maillages extrêmement fins. Elle consiste à résoudre un écoulement moyen et à modéliser les fluctuations de la turbulence par une viscosité turbulente.



**Figure III.9 : la modélisation d'un jet turbulent par différentes approches**

### VII.4 Les modèles de turbulence utilisés par la méthode de RANS



$k-\varepsilon$  :

Le modèle  $k-\varepsilon$  est un modèle largement répandu basé sur deux équations. Il les résout pour deux variables «  $k$  » l'énergie cinétique turbulente et «  $\varepsilon$  » le taux de dissipation d'énergie cinétique. Le modèle  $k-\varepsilon$  est le plus populaire pour les applications industrielles en raison de sa bonne vitesse de convergence et les exigences de mémoire acceptable. Ce modèle de turbulence est efficace pour les écoulements internes et externes autour des géométries complexes. Cependant le modèle  $k$ -epsilon présente un défaut au voisinage des parois car il ne prédit pas correctement cette zone en raison des faibles intensités turbulentes qui la caractérisent.



## k- $\omega$

Dans la dynamique des fluides numériques, le modèle de turbulence k-oméga (k- $\omega$ ) est un modèle de turbulence à deux équations, qui est utilisé en complément des équations RANS, est qui sert à la modélisation près du mur. Le modèle tente de prédire la turbulence par deux équations différentielles partielles pour deux variables, k qui est l'énergie cinétique de turbulence et  $\omega$  est le taux de dissipation spécifique (de l'énergie cinétique de turbulence k en énergie thermique interne). [40]

		
k- $\varepsilon$	<ul style="list-style-type: none"><li>. Décrit mal la proche paroi.</li><li>. Gère mal les gradients de pression externes, les jets...</li><li>. Fonctions de parois très compliquées.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>. Bonne description des écoulements externes autour des géométries.</li><li>. Converge rapidement.</li></ul>
k- $\omega$	<ul style="list-style-type: none"><li>. Décrit mal les écoulements loin de paroi.</li><li>. Faible taux de convergence.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>. Très bonne description en proche paroi.</li><li>. Condition limites sur paroi très simples.</li></ul>

## k- $\omega$ SST

Ce modèle est représenté par deux équations de viscosité. De plus, SST est la formulation de transport de stress de cisaillement (shear stress transport). Il s'appuie sur une combinaison des modèles k- $\varepsilon$  et k- $\omega$  : près des limites de l'écoulement le modèle k- $\omega$  est utilisé pour plus de précision, et au cœur de l'écoulement c'est le modèle k- $\varepsilon$  qui est utilisé.

## Modèle Spalart-Allmaras

C'est un modèle à une équation, il résout l'équation de transport pour une variable comparable à la viscosité. Ce modèle est adapté pour les écoulements près des parois et pour les couches limites soumises à des gradients de pression défavorables. Ce modèle est efficace pour des faibles nombres de Reynolds. Il est particulièrement

recommandé pour des applications aérodynamiques, donc il est utilisé dans le domaine aéronautique.

#### Le choix de modèle de turbulence

Le choix de modèle de turbulence dépend de plusieurs facteurs tels que le niveau de précision requis, le cout et le temps de calcul, la place de mémoire disponible ainsi que la complexité de l'écoulement étudié. Afin de choisir le modèle qui convient le mieux avec notre étude il faut d'abord comprendre et connaître les limites de chaque modèle, et la comparaison des résultats numériques avec des résultats expérimentaux est toujours utile pour sélectionner le modèle le plus approprié.

**CHAPITRE IV :**  
**RESULTATS ET**  
**INTERPRETATIONS**

## Introduction :

La tuyère choisie pour cette étude est une tuyère double galbe, avec une section de base de type Expansion-Déflexion (E-D), tandis que le deuxième galbe est obtenu en utilisant la méthode des caractéristiques directes. Cette configuration de tuyère présente un intérêt particulier en raison de ses propriétés aérodynamiques spécifiques.

Le chapitre est divisé en trois parties distinctes pour faciliter la compréhension et l'analyse des résultats. La première partie est dédiée à la simulation de l'écoulement dans la tuyère de base E-D, en tenant compte à la fois des écoulements visqueux et non visqueux. Cette analyse permet d'explorer l'influence des effets de la viscosité sur les caractéristiques de l'écoulement.

La deuxième partie du chapitre est consacrée à une comparaison entre la tuyère E-D et une tuyère classique. Cette comparaison permet d'évaluer les avantages et les limites de la configuration à double galbe par rapport à une conception traditionnelle. Les performances aérodynamiques, les pertes de pression et d'autres paramètres pertinents sont pris en compte dans cette analyse comparative.

Enfin, la troisième partie du chapitre se concentre sur la simulation de la tuyère double galbe dans son ensemble. Les résultats obtenus permettent de visualiser et de comprendre les caractéristiques de l'écoulement à travers les courbes et les contours présentés. Cette partie met en évidence les avantages et les performances de la configuration à double galbe dans des conditions supersoniques.

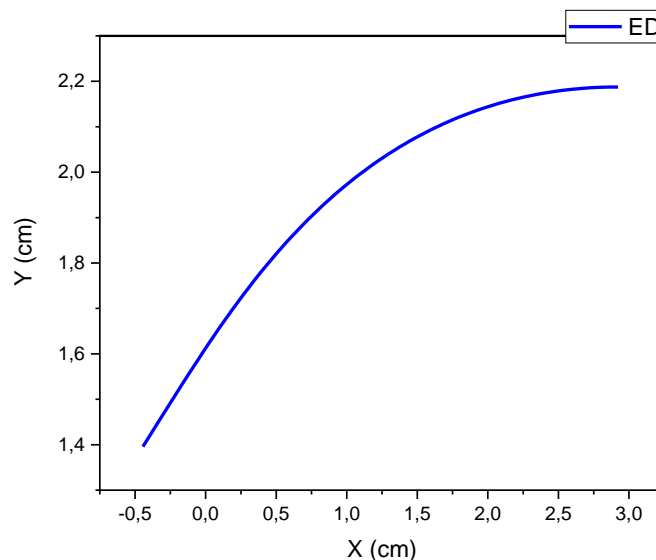
L'ensemble du chapitre vise à fournir une analyse détaillée et approfondie de l'écoulement dans les tuyères double galbe, en mettant en évidence les différences et les avantages par rapport aux conceptions traditionnelles. Les résultats obtenus à partir des simulations servent de base pour discuter des implications pratiques et des applications potentielles de ces tuyères dans des domaines tels que l'aéronautique et la propulsion des fusées.

Il convient de noter que les résultats de simulation présentés dans ce chapitre sont basés sur les hypothèses d'un gaz parfait et d'un écoulement bidimensionnel axisymétrique. Des études ultérieures peuvent être nécessaires pour prendre en compte d'autres effets et conditions réelles, afin de mieux modéliser et prédire le comportement des tuyères double galbe dans des scénarios pratiques.

# I. CAS D'ETUDE : TUYERES EXPANSION-DEFLEXION

## I.1 Description de la tuyère étudiée :

Notre simulation vise à étudier l'écoulement d'air dans une tuyère spécifique, représentée dans la Figure 4. Cette figure illustre le profil de la tuyère de type E-D, avec un rayon de 0,6 cm et une section de sortie de 0,0218 m<sup>2</sup>. La géométrie de la tuyère a été réalisée à l'aide de notre code informatique développé en FORTRAN, et le tracé du profil a été réalisé à l'aide du logiciel Origin.



**Figure IV.1: Géométrie de la tuyère E-D**

La longueur de cette tuyère obtenue est égale à 0,022 m. Cette tuyère a été modélisée avec précision pour reproduire les conditions d'écoulement réelles. Notre simulation permet d'analyser les caractéristiques de l'écoulement d'air à travers cette tuyère et de recueillir des données essentielles pour comprendre son comportement.

Grâce à notre code informatique, nous sommes en mesure de résoudre les équations fondamentales de la dynamique des fluides, telles que les équations de Navier-Stokes, pour obtenir des résultats précis sur les propriétés de l'écoulement d'air, y compris la vitesse, la pression, la température, etc.

L'utilisation du logiciel Origin nous permet de représenter graphiquement les résultats de simulation, ce qui facilite l'analyse visuelle et la compréhension des données obtenues. Les courbes et les graphiques générés nous fournissent des informations détaillées sur l'écoulement d'air à travers la tuyère, ce qui est essentiel pour évaluer ses performances et son efficacité.

Cette simulation constitue une étape importante dans notre étude, car elle nous permet d'explorer et de caractériser l'écoulement d'air à travers la tuyère de type E-D. Les résultats obtenus serviront de base pour une analyse approfondie et une évaluation des performances de cette tuyère dans diverses applications aérodynamiques et de propulsion.

### I.1.1 Calculs non visqueux :

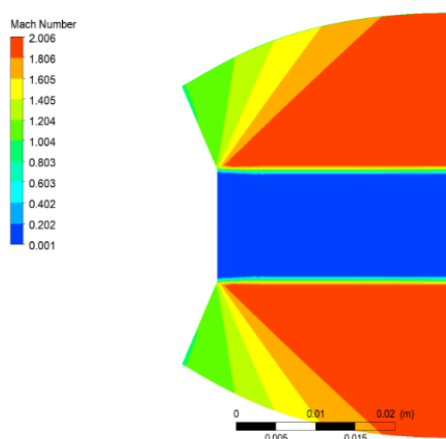
Dans notre étude, nous avons effectué des calculs non visqueux pour analyser l'écoulement d'air à travers la tuyère. Pour cela, nous avons défini des conditions aux limites spécifiques afin de reproduire les conditions réelles de l'écoulement.

Pour l'entrée de la tuyère, nous avons fixé une pression statique ( $P_s$ ) de 105656 Pa. Cette valeur correspond à la pression à l'entrée de la tuyère, généralement déterminée par les conditions d'admission du fluide dans le système. La pression statique représente la pression totale à laquelle le fluide est soumis à l'entrée de la tuyère.

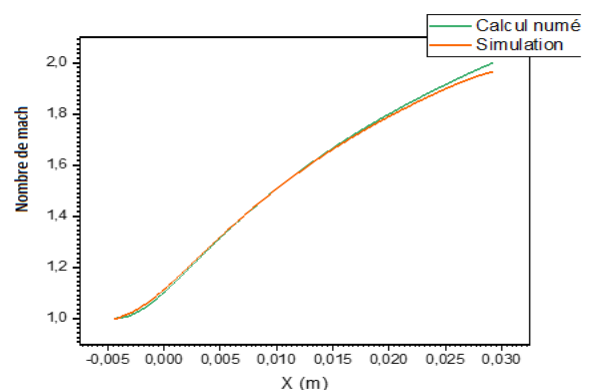
Quant à la sortie de la tuyère, nous avons fixé une pression statique de 25560 Pa. Cette valeur représente la pression à la sortie de la tuyère, où le fluide est expulsé du système. La pression à la sortie est généralement inférieure à la pression à l'entrée en raison de l'expansion et de la conversion de l'énergie cinétique en énergie de propulsion.

En définissant ces conditions aux limites, nous pouvons simuler l'écoulement d'air à travers la tuyère et obtenir des informations précieuses sur les propriétés de l'écoulement telles que la vitesse, la pression, la température, etc. Ces résultats sont essentiels pour évaluer les performances de la tuyère et optimiser sa conception.

#### ➤ Le nombre de Mach :



**Figure IV.2: iso mach de la tuyère E-D (non visqueux)**



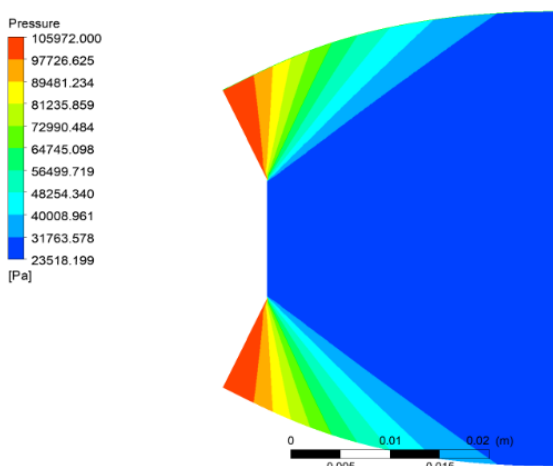
**Figure IV. 3 : iso mach de la tuyère E-D (non visqueux)**

La Figure IV.2 illustre les contours Iso-Mach obtenus à partir de notre simulation. On peut observer que le nombre de Mach à l'intérieur du col est légèrement supersonique, puis il augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur proche de la valeur de Mach de conception au niveau du bord de la tuyère. Cette figure permet de visualiser la distribution des vitesses dans notre système.

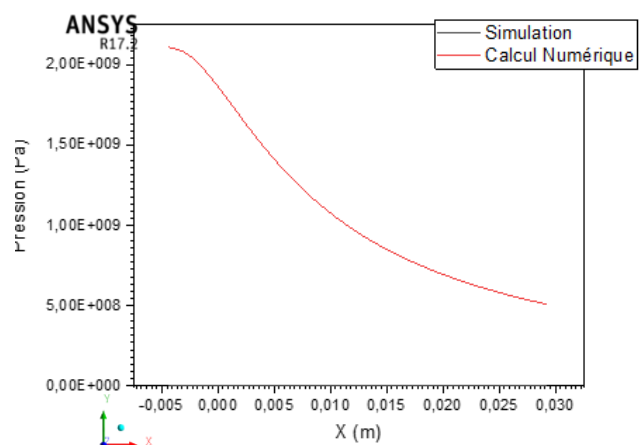
En ce qui concerne la Figure IV.3, elle présente une comparaison entre le nombre de Mach le long de la paroi obtenue à partir de la simulation numérique réalisée avec le logiciel Fluent et celle obtenue à partir de notre programme développé en FORTRAN. D'après cette figure, on peut constater que le nombre de Mach le long de la paroi évolue de manière cohérente et sans discontinuité. Il augmente progressivement, en particulier à proximité de la zone d'expansion, où l'on observe une augmentation plus lente dans la partie divergente du système. Finalement, le nombre de Mach atteint la valeur de Mach de conception, Mach=1.98, au niveau du bord de la tuyère.

Ces résultats obtenus à partir de nos simulations et comparaisons sont essentiels pour comprendre le comportement du flux dans notre système et pour évaluer la performance de notre conception de tuyère. Ils fournissent des informations précieuses sur la distribution des vitesses et confirment que notre tuyère atteint les conditions de conception souhaitées.

➤ **Variation de la pression :**



**Figure IV.4: pression de la tuyère E-D (non visqueux)**



**Figure IV. 5 : graphe de pression**

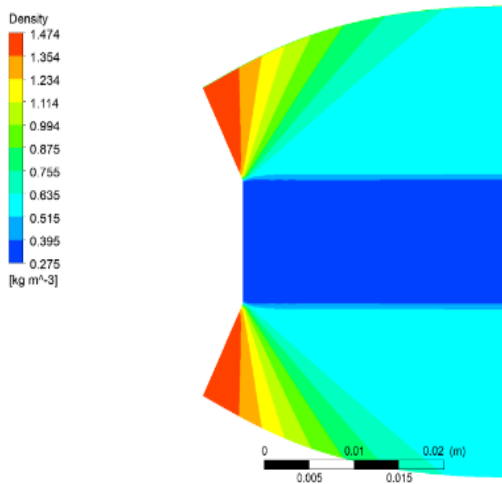
La Figure IV.4 représente les contours Iso-Pression pour une tuyère E-D avec un nombre de Mach de conception. On peut observer la présence de la Détente de Prandtl-Meyer autour de la lèvre de la tuyère. Cette figure met en évidence le caractère isentropique de l'écoulement le long du divergent de la tuyère, car il n'y a pas de perturbation ou de fluctuations de pression significatives.

En ce qui concerne la Figure IV.5, elle présente la variation de la pression le long de la tuyère E-D. On peut remarquer une diminution notable de la pression le long de la courbe, où la valeur de pression diminue. Cette légère baisse de pression peut être attribuée à une méthode utilisée par Kbab et al pour réduire le poids de la tuyère (TIC) sans avoir un impact significatif sur la poussée. Ils ont proposé de tronquer la tuyère à un point où le meilleur compromis entre le poids et les performances est atteint. Selon leurs conclusions, si une tuyère axisymétrique est tronquée à 79% de sa longueur idéale, on obtient une réduction de poids de 20,85% tout en ne perdant que 0,987% de la poussée. Il est également important de noter qu'il y a une concordance complète entre les résultats obtenus par la simulation numérique (Fluent) et ceux calculés par notre programme (FORTRAN) pour les paramètres de pression le long de la paroi.

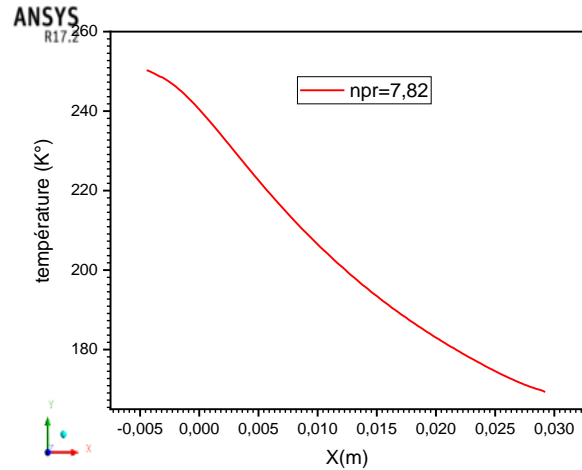
Ces figures et les informations qu'elles fournissent sont essentielles pour comprendre le comportement de la pression dans la tuyère E-D. Elles permettent d'observer la distribution de la pression le long de la tuyère, y compris les variations dues à la Détente de Prandtl-Meyer et à la troncature de la tuyère. Ces résultats sont en accord avec les attentes théoriques et confirment la validité de notre approche de simulation et de calcul pour l'analyse de la performance de la tuyère E-D.



➤ **Variation de la température :**



**Figure IV.6 : température de la tuyère E-D (non visqueux)**



**Figure IV.7 : courbe de température**

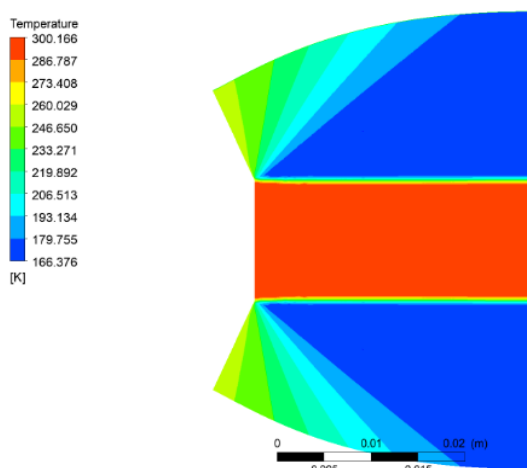
Les Figures IV.6 et IV.7 mettent en évidence la variation de la température dans notre tuyère E-D. La Figure IV.6 représente les contours de température, tandis que la Figure IV.7 présente un graphe montrant la variation de la température le long de la tuyère.

Dans ces figures, on peut observer une diminution de la température de l'entrée de la tuyère jusqu'à sa sortie. Cela est conforme aux principes de base de l'aérodynamique des tuyères, où l'expansion de l'écoulement conduit à une baisse de la température.

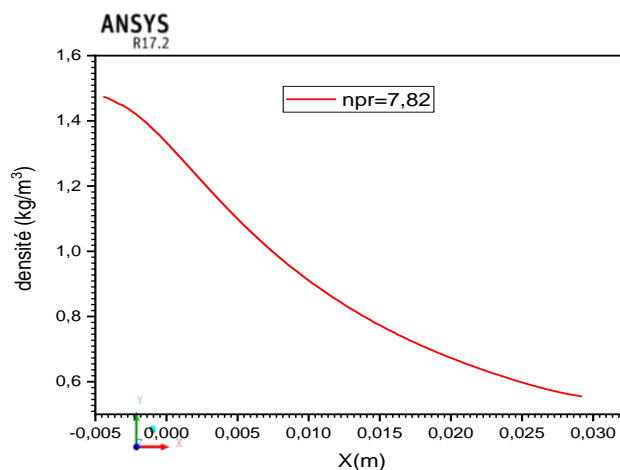
Il est intéressant de noter que la température reste constante derrière le corps central de la tuyère, prenant la même valeur que la température à la sortie de la tuyère. Cette observation suggère que le processus d'expansion dans la tuyère est régi par des phénomènes isentropiques, où l'écoulement conserve une température constante dans cette région spécifique.

Ces résultats sont cohérents avec les attentes théoriques et confirment que notre tuyère E-D fonctionne conformément aux principes de base de l'aérodynamique des tuyères. La diminution de la température le long de la tuyère est un indicateur de l'expansion de l'écoulement, tandis que la constance de la température derrière le corps central souligne l'aspect isentropique de l'écoulement dans cette région.

➤ **Variation de la densité :**



**Figure IV.8: densité de la tuyère E-D (non visqueux)**



**Figure IV. 9 : courbe de densité**

Effectivement, la densité subit également une diminution le long de la tuyère, comme le mettent en évidence les figures IV.8 et IV.9.

La Figure IV.8 présente les contours de densité dans la tuyère E-D, tandis que la Figure IV.9 illustre la variation de la densité le long de la tuyère sous forme de graphe.

Ces figures démontrent que la densité diminue de manière significative de l'entrée jusqu'à la sortie de la tuyère. Cette diminution de densité est liée à l'expansion de l'écoulement qui se produit dans le divergent de la tuyère. En effet, lorsque le fluide s'écoule dans une zone de plus grande section, sa densité diminue en raison de l'augmentation du volume disponible.

Il est important de noter que cette diminution de densité est cohérente avec la diminution de la température observée précédemment, car la densité d'un fluide est généralement inversement proportionnelle à sa température. Ainsi, l'expansion de l'écoulement entraîne à la fois une baisse de la température et de la densité.

Ces résultats enrichissent notre compréhension de l'aérodynamique de la tuyère et de l'évolution des propriétés du fluide le long de celle-ci. Ils confirment également la validité de notre approche de simulation et d'analyse. La diminution de la densité dans la

tuyère est un facteur essentiel à prendre en compte pour évaluer les performances du système et optimiser la conception de la tuyère.

### **1.1.1 Calculs visqueux :**

Dans le cadre des calculs visqueux, les conditions aux limites sont un élément essentiel à prendre en compte. Elles définissent les valeurs des paramètres physiques à l'entrée et à la sortie de la tuyère, ce qui permet de simuler de manière réaliste le comportement de l'écoulement.

Pour l'Inlet (entrée de la tuyère), les conditions aux limites indiquent une pression totale ( $P_t$ ) de 200 000 Pa et une pression statique ( $P_s$ ) de 105656 Pa. Ces valeurs déterminent l'état de l'écoulement à la sortie de la tuyère et sont essentielles pour évaluer les performances de celle-ci.

Quant à l'Outlet (sortie de la tuyère), les conditions aux limites spécifient différentes valeurs de pression statique ( $P_s$ ) à différents points d'entrée. On a  $P_{s1} = 20000$  Pa,  $P_{s2} = 5449.591$  Pa et  $P_{s3} = 4000$  Pa. Ces valeurs déterminent les conditions initiales de l'écoulement à l'entrée de la tuyère, influençant ainsi les caractéristiques de l'écoulement tout au long du système.

En prenant en compte ces conditions aux limites, il est possible de réaliser des calculs visqueux plus précis et réalistes. Elles permettent de capturer les interactions entre l'écoulement et les parois de la tuyère, ainsi que les variations de pression et de vitesse qui se produisent tout au long du système.

➤ Nombre de mach :

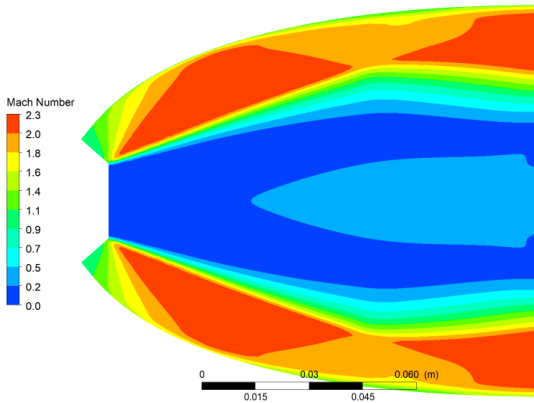


Figure IV.10: Iso-Mach (NPR=10)

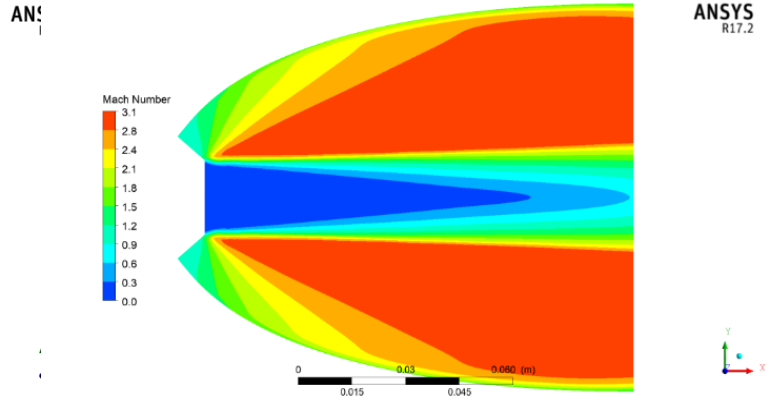


Figure IV.11: Iso-Mach (NPR=36.7)

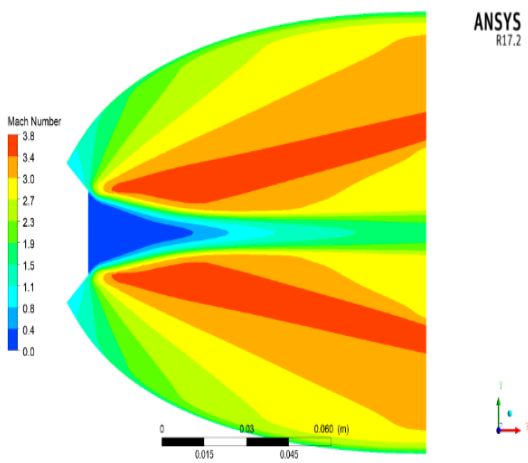


Figure IV.12: Iso-mach (NPR=50)

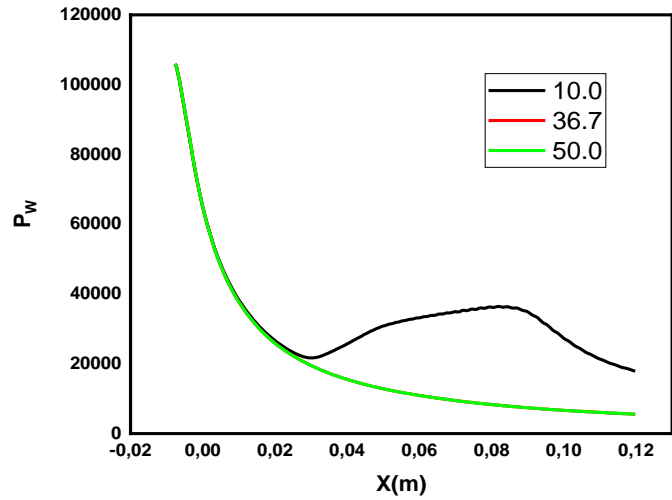


Figure IV.13: Pression calcul visqueux

Les figures présentées ci-dessus fournissent des informations sur les contours de Mach, les courbes de pression et leur variation le long de la paroi de la tuyère pour différents NPR (Nombre de Pression de Refoulement).

Pour le NPR=10, on observe une diminution de la pression le long de la tuyère, passant de 105 656 Pa jusqu'à se rapprocher de la pression atmosphérique. Cependant, il y a également des fluctuations de pression le long de la paroi. Ces fluctuations peuvent être dues à des perturbations locales dans l'écoulement, ce qui peut entraîner des variations temporaires de pression.

En revanche, pour les NPR de 36.7 et 50, les courbes de pression le long de la paroi sont confondues et montrent une diminution régulière le long de la tuyère. Il est intéressant de noter que plus la pression de sortie (Outlet) diminue, plus la pression à la paroi devient indépendante du NPR. Cela peut s'expliquer par le fait que, à mesure que la pression de sortie diminue, l'expansion de l'écoulement dans le divergent devient plus dominante, ce qui entraîne une distribution de pression similaire le long de la paroi, indépendamment du NPR.

Ces observations enrichissent notre compréhension de l'écoulement dans la tuyère pour différents NPR. Elles mettent en évidence l'importance du NPR sur la distribution de pression le long de la paroi, ainsi que son influence sur les fluctuations de pression observées dans le cas du NPR=10. Ces résultats peuvent être utilisés pour optimiser la conception de la tuyère et ajuster les paramètres de sortie pour atteindre les performances souhaitées.

## II. COMPARAISON ENTRE ED 2 ET CN :

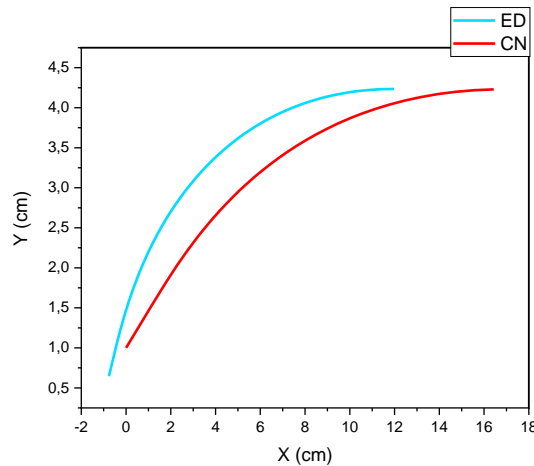
### II.1 Description de la tuyère :

La Figure IV.14 présente le profil de la tuyère E-D (expansion-divergente) et celui de la tuyère classique, tous deux ayant le même rapport de section. Le profil de la tuyère classique est généré à l'aide de la méthode des caractéristiques, telle que décrite dans l'étude de référence de Michael et Goldman (1968).

Les résultats obtenus mettent en évidence une différence significative entre la longueur de la tuyère E-D et celle de la tuyère classique pour une section de sortie équivalente. Dans notre cas, la tuyère E-D présente une longueur inférieure de 0.045 m par rapport à la tuyère classique.

Cette différence de longueur suggère que la tuyère E-D est moins encombrée que la tuyère classique. En d'autres termes, elle nécessite moins d'espace pour atteindre les mêmes performances de sortie. Cette caractéristique de la tuyère E-D peut présenter des avantages significatifs dans les applications où l'espace est limité ou lorsque la compacité du système est un critère important.

En comparant le profil de la tuyère E-D et celui de la tuyère classique, il est également possible d'observer d'autres caractéristiques distinctives telles que la forme et la distribution des sections transversales le long de la tuyère. Ces différences peuvent avoir des implications sur les performances aérodynamiques et le comportement de l'écoulement dans les deux types de tuyères.



**Figure IV.14: le profil de la tuyère E-D et la tuyère classique**

Les conditions aux limites jouent un rôle essentiel dans la modélisation et la simulation des écoulements dans une tuyère. Les conditions aux limites spécifient les valeurs des paramètres physiques à l'entrée (Inlet) et à la sortie (Outlet) de la tuyère, ce qui permet de décrire de manière réaliste les conditions d'écoulement.

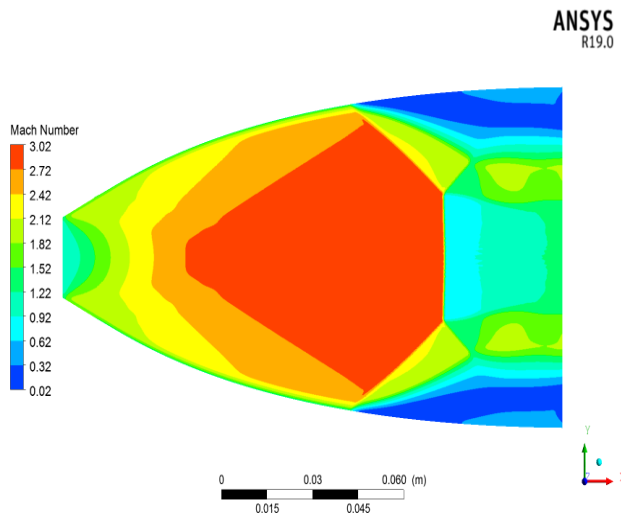
Pour l'Inlet, les conditions aux limites indiquent une pression totale ( $P_t$ ) de 200 000 Pa et une pression statique ( $P_s$ ) de 105656 Pa. Ces valeurs définissent l'état initial de l'écoulement à l'entrée de la tuyère et sont essentielles pour la simulation de l'écoulement dans le système.

Quant à l'Outlet, les conditions aux limites spécifient deux valeurs de NPR (Nombre de Pression de Refoulement). On a  $NPR_1 = 7$  et  $NPR_2 = 40$ . Le NPR est un paramètre qui mesure le rapport entre la pression de sortie et la pression atmosphérique. Ces valeurs de NPR déterminent les conditions de sortie de l'écoulement dans la tuyère et sont importantes pour évaluer les performances de celle-ci.

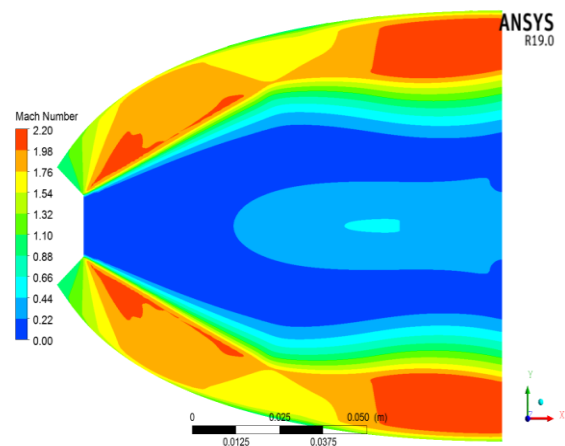
En combinant ces conditions aux limites à l'Inlet et à l'Outlet, il est possible de décrire de manière complète et précise les conditions d'écoulement à travers la tuyère.

Cela permet de réaliser des simulations plus réalistes et d'analyser l'impact des différentes valeurs de pression et de rapport de pression sur les caractéristiques de l'écoulement.

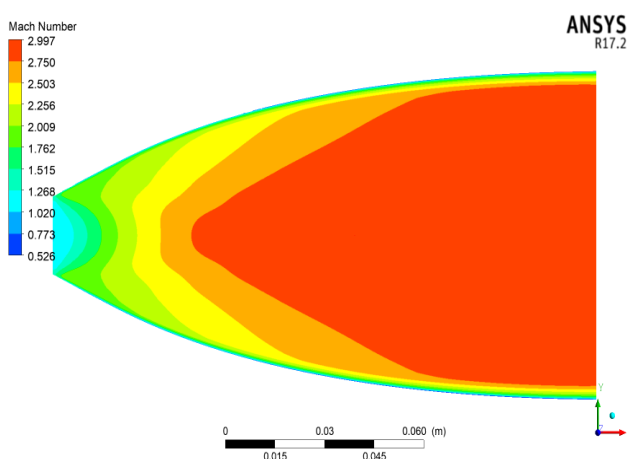
➤ **Contours de mach :**



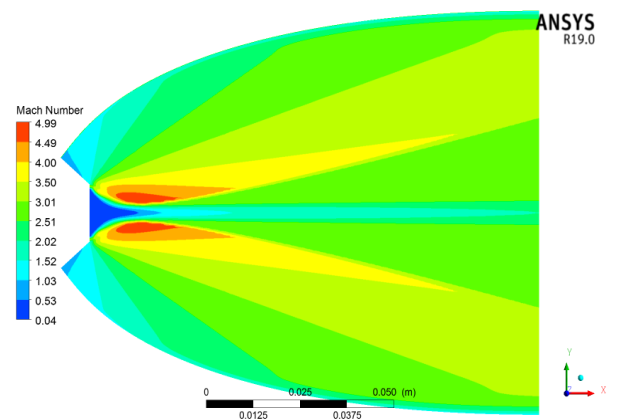
**Figure IV. 15 : iso mach de la tuyère classique (NPR=7)**



**Figure IV. 16 : iso mach de la tuyère E-D (NPR=7)**



**Figure IV.17 : iso mach de la tuyère classique (NPR=40)**



**Figure IV.18 iso mach de la tuyère E-D (NPR=40)**

Les figures IV.15, IV.16, IV.17 et IV.18 présentent les contours iso-Mach de la tuyère E-D et de la tuyère classique pour différents rapports de pression (NPR) : NPR=7

et  $NPR=40$ . Ces contours permettent d'observer les caractéristiques de l'écoulement à travers les deux types de tuyères et de comparer leurs performances.

Pour le cas du  $NPR=7$ , correspondant à une sur-expansion, on remarque des différences significatives entre la tuyère E-D et la tuyère classique. Dans le cas de la tuyère E-D, l'écoulement reste attaché à la paroi, ce qui signifie qu'il n'y a pas de séparation de l'écoulement de la paroi. En revanche, dans le cas de la tuyère classique, on observe une séparation de l'écoulement de la paroi. Cette séparation conduit à l'apparition de charges latérales, qui réduisent l'efficacité de la tuyère. Ainsi, pour un  $NPR=7$ , la tuyère E-D présente une meilleure performance en évitant la séparation de l'écoulement et en minimisant les pertes dues aux charges latérales.

En revanche, pour le  $NPR=40$ , on ne remarque aucune séparation de l'écoulement le long des deux types de tuyères. Les contours iso-Mach montrent un écoulement régulier et bien attaché à la paroi pour les deux tuyères. Cela suggère que les performances des deux tuyères sont similaires pour ce rapport de pression élevé.

En organisant ces informations, on peut conclure que pour un  $NPR=7$ , la tuyère E-D présente un avantage significatif par rapport à la tuyère classique en évitant la séparation de l'écoulement et en minimisant les charges latérales. Cependant, pour un  $NPR=40$ , les performances des deux tuyères sont comparables, avec un écoulement régulier et bien attaché à la paroi.

En étudiant les contours iso-Mach des tuyères E-D et classiques pour différents rapports de pression, les figures IV.15, IV.16, IV.17 et IV.18 enrichissent notre compréhension des caractéristiques d'écoulement et de performance de ces deux types de tuyères.

Les figures IV.19 et IV.20 représentent les courbes d'évolution de la pression pour les deux types de tuyères, à savoir la tuyère E-D et la tuyère classique, pour les mêmes rapports de pression ( $NPR$ ) que ceux mentionnés précédemment.

En examinant ces courbes, on peut observer les variations de pression le long de la tuyère et analyser les différences entre les deux types de tuyères.

Pour le  $NPR=7$ , correspondant à une sur-expansion, la figure IV.19 met en évidence une diminution de la pression le long de la tuyère pour les deux types de tuyères. Cependant, on remarque que la diminution de pression est plus importante dans le cas de la tuyère classique par rapport à la tuyère E-D. Cela est cohérent avec les observations faites précédemment concernant la séparation de l'écoulement dans la tuyère classique, ce qui conduit à des pertes de pression plus importantes. La courbe de pression pour la

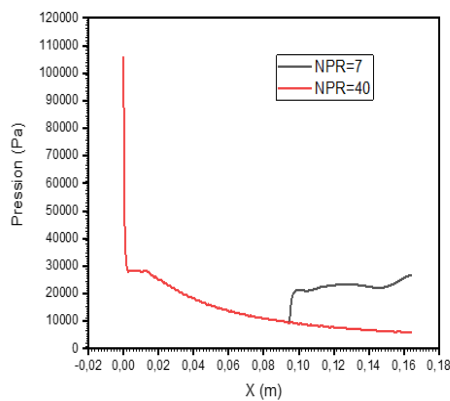


tuyère E-D montre une diminution plus progressive, indiquant une meilleure conservation de la pression le long de la tuyère.

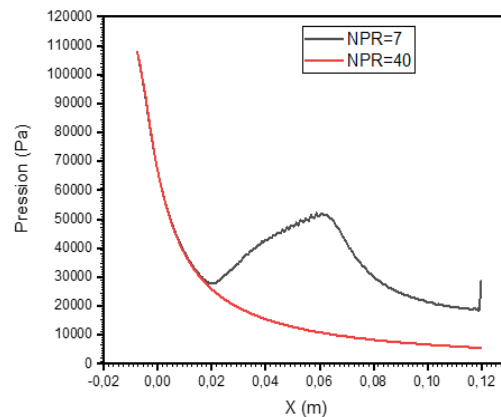
En ce qui concerne le NPR=40, la figure IV.20 montre des courbes d'évolution de la pression similaires pour les deux types de tuyères. La pression diminue de manière régulière le long de la tuyère, mais il n'y a pas de différence significative entre les deux types de tuyères en termes de variation de pression.

En organisant ces informations, on peut conclure que pour un NPR=7, la tuyère E-D présente un avantage en termes de conservation de la pression par rapport à la tuyère classique, ce qui est cohérent avec l'absence de séparation de l'écoulement dans la tuyère E-D. Cependant, pour un NPR=40, les deux types de tuyères présentent des courbes d'évolution de pression similaires, indiquant une performance comparable en termes de conservation de la pression.

En résumé, les figures IV.19 et IV.20 enrichissent notre compréhension des performances des tuyères E-D et classique en termes d'évolution de la pression. Elles confirment les observations précédentes concernant l'effet de la sur-expansion et mettent en évidence l'avantage de la tuyère E-D en termes de conservation de la pression pour un NPR=7.



**Figure IV. 19 : pression pour la tuyère classique**



**Figure IV. 20 : pression pour la tuyère E-D**

## II.2 Comparaison de poussée :

La comparaison de la poussée entre une tuyère classique et une tuyère E-D peut être effectuée en se référant au tableau IV.1. Les données présentées dans le tableau indiquent la poussée correspondante pour différentes valeurs du rapport de pression des gaz (NPR).

Pour un NPR de 7, la tuyère classique produit une poussée de 1779,502 N, tandis que la tuyère E-D génère une poussée légèrement supérieure de 1995,66741 N. Cette différence peut être attribuée aux avantages de conception offerts par la tuyère E-D, tels que l'optimisation de la forme du divergent et l'introduction d'effets électromagnétiques.

Lorsque le NPR est augmenté à 40, la poussée de la tuyère classique atteint 2871,40556 N, tandis que la tuyère E-D dépasse légèrement avec une poussée de 2879,63178 N. Cette comparaison met en évidence les performances supérieures de la tuyère E-D, même à des rapports de pression plus élevés.

Il est clair que la tuyère E-D présente des améliorations significatives en termes de poussée par rapport à la tuyère classique, ce qui en fait un choix prometteur pour les applications nécessitant une propulsion efficace et puissante. Ces résultats soulignent l'importance de l'innovation et du développement de nouvelles technologies pour améliorer les performances des systèmes de propulsion.

**Tableau IV. 1 : la poussée des deux tuyères (classique et E-D)**

<b>NPR</b>	<b>CN</b>	<b>ED</b>
<b>7</b>	1779,502 N	1995,66741N
<b>40</b>	2871,40556 N	2879,63178 N

## III. TUYERE DOUBLE GALBE :

### III.1 TUYERE AVEC $r=0.7$ cm et $\alpha=14$ :

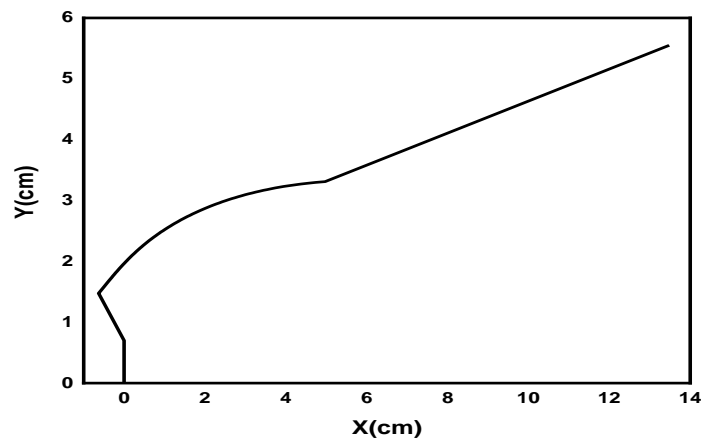
#### III.1.1 Géométrie :

La géométrie de la tuyère double galbe est élaborée à l'aide du logiciel Ansys Workbench, en utilisant un programme informatique écrit en langage FORTRAN. Ce programme est soigneusement conçu pour garantir la précision et la robustesse de la modélisation. Toutes les variables et paramètres sont déclarés en double précision, assurant ainsi une représentation précise des caractéristiques géométriques.

La configuration de la tuyère double galbe est illustrée dans la Figure IV.22 extraite du logiciel Origin. Cette configuration particulière présente un rayon  $r$  de 0.7, un angle  $\alpha$

de  $14^\circ$  et une longueur  $L$  de 13.48 cm. De plus, la section de sortie de la tuyère est de 4.85 cm.

L'utilisation d'Ansys Workbench en conjonction avec le programme écrit en FORTRAN permet d'obtenir une géométrie précise et optimisée pour la tuyère double galbe. Ces outils informatiques avancés permettent aux ingénieurs de modéliser et d'analyser de manière approfondie les caractéristiques de la tuyère, contribuant ainsi à une conception plus efficace et performante des systèmes de propulsion.



**Figure IV. 21 : Géométrie de la tuyère double galbe 0.7**

### III.1.2 Conditions aux limites :

Dans cette section de l'étude, Une pression fixe est imposée à l'entrée de la tuyère, avec des conditions limites définies par  $P_t=200000$  Pa et  $P_s=105656$  Pa du côté gauche du domaine. À la sortie du domaine, nous avons utilisé la condition limite de pression de sortie en fonction de différentes valeurs du rapport de pression des gaz (NPR), telles qu'indiquées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.2 : valeurs des NPR et Pout correspondantes**

<b>NPR</b>	<b>Pout (Pa)</b>	<b>NPR</b>	<b>Pout (Pa)</b>
<b>5</b>	<b>40000</b>	<b>50</b>	<b>4000</b>
<b>7</b>	<b>28751.3</b>	<b>60</b>	<b>3333.3</b>
<b>10</b>	<b>20000</b>	<b>70</b>	<b>2875.3</b>
<b>20</b>	<b>10000</b>	<b>80</b>	<b>2500</b>
<b>30</b>	<b>6666.66</b>	<b>90</b>	<b>2222.2</b>

<b>40</b>	<b>5000</b>	<b>100</b>	<b>2000</b>
-----------	-------------	------------	-------------

### III.2 L'effet du rayon :

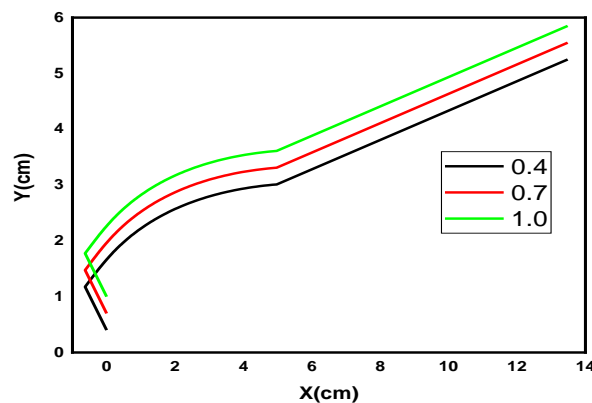
Dans le cadre de notre étude, nous avons entrepris la fabrication de différentes tuyères en modifiant deux paramètres clés : le rayon du corps central ( $r$ ) et l'angle d'inflexion ( $\alpha$ ). Nous avons choisi deux valeurs distinctes pour chaque paramètre afin de comprendre l'impact de ces variations sur l'écoulement à l'intérieur de la tuyère.

Plus précisément, nous avons examiné les effets de deux rayons différents :  $r=0.4$  et  $r=1$ . De même, nous avons étudié les conséquences de deux angles d'inflexion distincts :  $\alpha=7$  et  $\alpha=21$ . En modifiant ces paramètres, nous avons pu observer comment les caractéristiques de l'écoulement dans la tuyère étaient influencées.

Cette approche nous a permis d'explorer et de comparer les résultats obtenus pour chaque combinaison de rayon et d'angle. En analysant les variations observées dans les schémas d'écoulement, la distribution des vitesses et les propriétés de la couche limite, nous avons pu déterminer l'effet relatif de ces deux paramètres sur la performance et le comportement global de la tuyère.

L'organisation de notre étude s'est articulée autour de la conception et de la fabrication de tuyères présentant des variations précises de rayon et d'angle d'inflexion. Les résultats obtenus ont ensuite été analysés de manière systématique pour évaluer l'influence de ces paramètres sur l'écoulement dans la tuyère. Cette approche méthodique nous a permis de mieux comprendre les caractéristiques clés de la tuyère et d'identifier les configurations les plus performantes en termes d'efficacité et de comportement de l'écoulement.

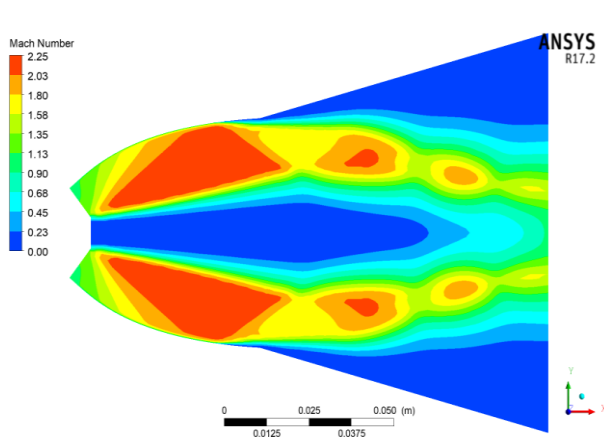
#### III.2.1 : Les géométries :



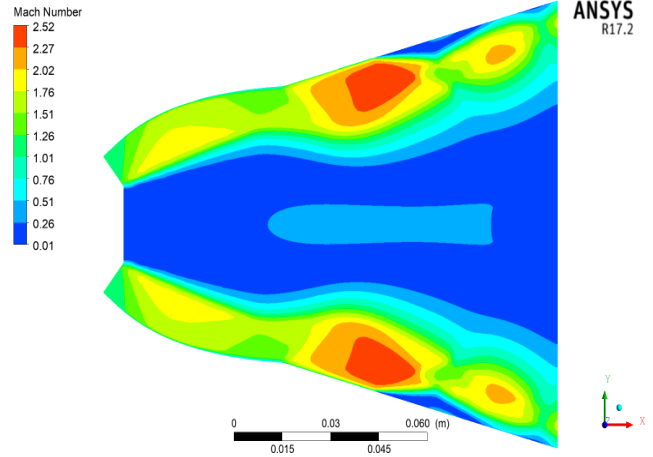
**Figure IV.22: Configuration des 3 tuyères**

➤ Contours de mach :

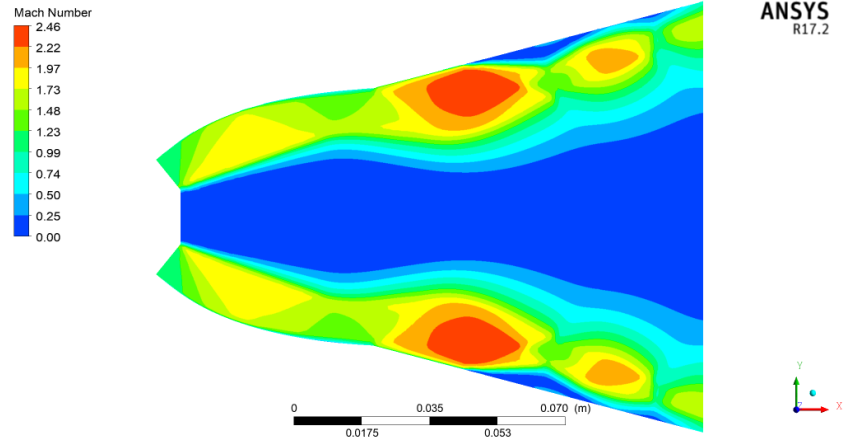
a) NPR=5



**Figure IV.23: iso-Mach (r=0.4)**



**Figure IV.24: iso-Mach (r=1)**



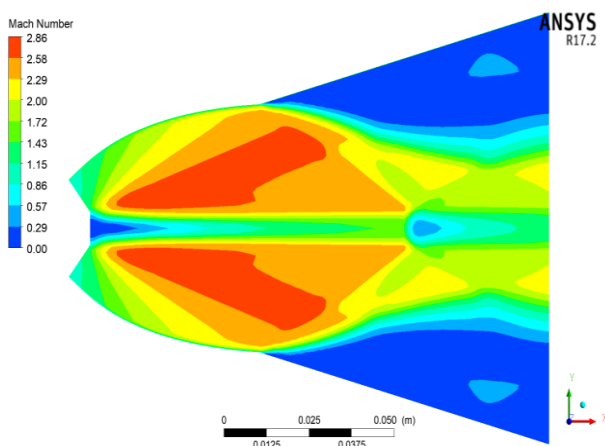
**Figure IV.25: iso-Mach (r=0.7)**

Les figures IV.23, IV.24 et IV.25 fournissent des informations précieuses sur le comportement de l'écoulement dans la tuyère en fonction des différents rayons (0.4, 0.7 et 1 cm) pour un rapport de pression des gaz (NPR) de 5. En analysant les contours du nombre de Mach dans ces figures, nous pouvons observer des variations significatives dans le comportement de l'écoulement en fonction du rayon.

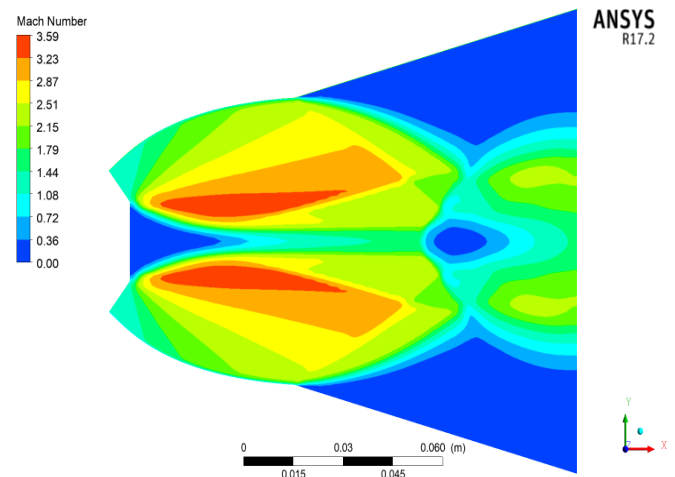
Pour les rayons de 0.7 cm et 1 cm, nous pouvons constater que le comportement de l'écoulement est similaire, avec des perturbations se produisant au niveau du deuxième galbe. Ces perturbations atteignent des valeurs presque égales pour le nombre de Mach, ce qui suggère une symétrie et une régularité dans l'écoulement. Cette observation indique que ces deux rayons génèrent des conditions d'écoulement comparables et prévisibles dans la tuyère.

Cependant, pour le rayon de 0.4 cm, une différence notable est observée. On peut constater une séparation de l'écoulement devant la jonction. Cette séparation indique un changement dans le comportement de l'écoulement, ce qui peut avoir un impact sur les performances globales de la tuyère. Il est essentiel de prendre en compte cette séparation de l'écoulement lors de la conception et de l'optimisation de la tuyère pour garantir un écoulement continu et efficace.

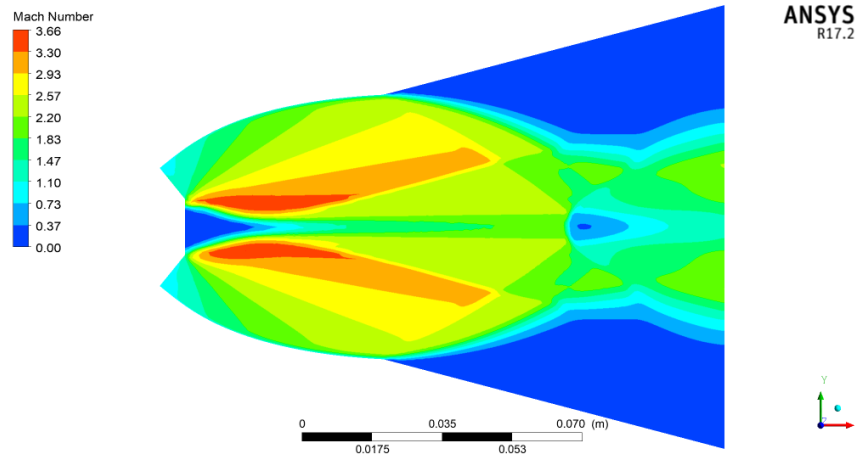
**b) NPR=10:**



**Figure IV. 26: iso-Mach  
(r=0.4)**



**Figure IV.27: iso-Mach  
(r=1)**



**Figure IV.28: iso-Mach (r=0.7)**

Lorsque nous examinons les figures IV.26, IV.27 et IV.28 pour un rapport de pression des gaz (NPR) de 10, nous pouvons observer des phénomènes intéressants dans le comportement de l'écoulement pour les trois tuyères étudiées. Tout d'abord, une séparation de l'écoulement se produit au niveau de la jonction pour chacune des tuyères.

Cette séparation indique une modification significative dans la dynamique de l'écoulement, où une partie de l'écoulement se détache du corps central. La présence de cette séparation peut avoir des implications sur les performances globales de la tuyère, car elle perturbe l'écoulement régulier et peut entraîner des pertes de poussée et une efficacité réduite.

De plus, une autre caractéristique intéressante observée dans les figures est l'apparition d'une onde de choc derrière le corps central, mais dans le deuxième galbe de la tuyère. Cette onde de choc se forme en raison de l'interaction entre l'écoulement supersonique à haute vitesse et la géométrie de la tuyère. L'onde de choc est une discontinuité brusque dans l'écoulement qui entraîne une augmentation soudaine de la pression et une variation significative des caractéristiques de l'écoulement.

Ces observations mettent en évidence l'importance de prendre en compte les effets de la séparation de l'écoulement et des ondes de choc lors de la conception et de l'optimisation des tuyères. Ces phénomènes peuvent avoir des répercussions sur les performances de propulsion, l'efficacité et la stabilité de l'écoulement dans la tuyère.

c) NPR=40 :

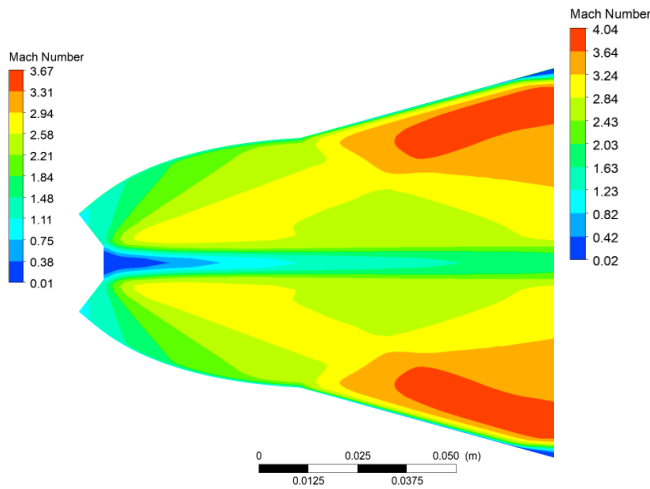


Figure IV.29: iso-Mach (r=0.4)

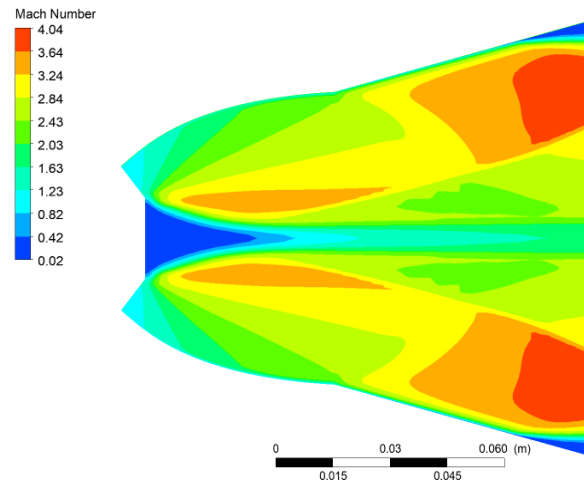


Figure IV.30: iso-Mach (r=1)

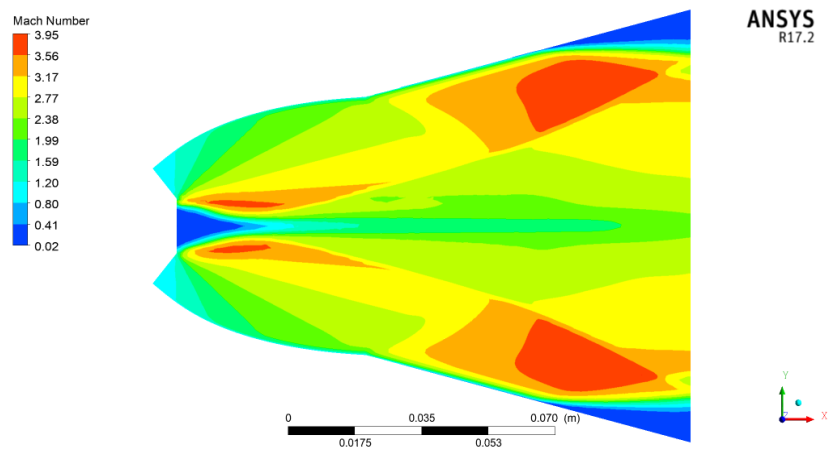


Figure IV.31: iso-Mach (r=0.7)

Lorsque nous augmentons le rapport de pression des gaz (NPR) jusqu'à une valeur de 40, nous observons un déplacement de la séparation de l'écoulement vers le deuxième galbe de la tuyère. Ce phénomène est visible dans les figures IV.29, IV.30 et IV.31, qui illustrent différentes positions de la séparation pour les trois tuyères étudiées.

En augmentant le NPR, l'écoulement devient plus énergétique et supersonique, ce qui affecte la dynamique de l'écoulement à l'intérieur de la tuyère. La séparation de l'écoulement se déplace vers le deuxième galbe, ce qui peut être attribué à des variations dans les forces aérodynamiques qui agissent sur l'écoulement. Les effets de compression,

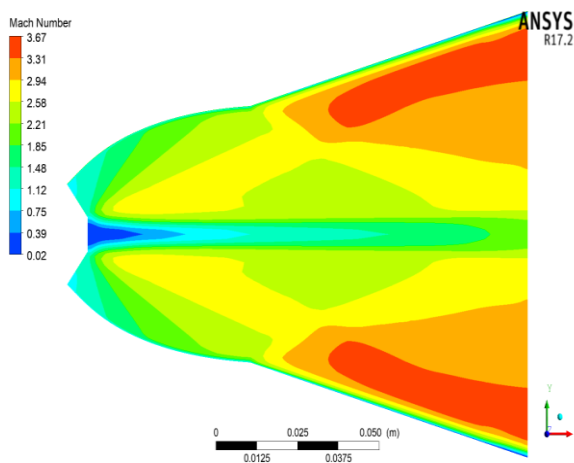


d'expansion et de friction jouent un rôle important dans la génération et le déplacement de la séparation.

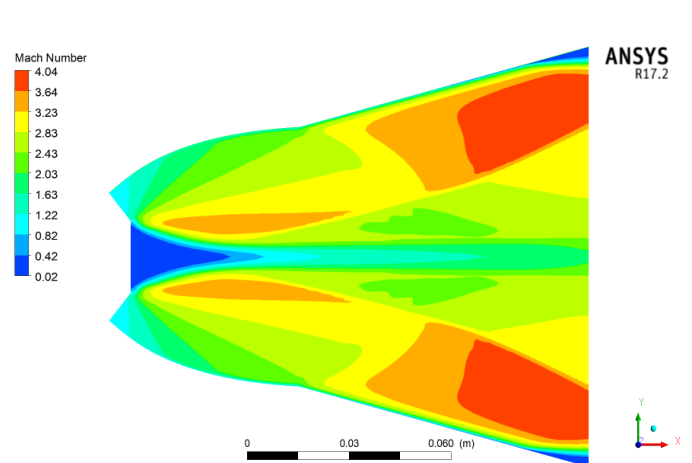
De plus, en continuant l'augmentation du nombre de Mach en fonction du rayon, nous observons une variation significative dans les caractéristiques de l'écoulement. Les figures IV.29, IV.30 et IV.31 nous permettent de visualiser ces variations pour les différentes tuyères. Ces variations peuvent être attribuées à des différences géométriques et à la façon dont l'écoulement interagit avec la tuyère de forme spécifique.

Il est important de noter que les positions spécifiques de la séparation de l'écoulement et les variations du nombre de Mach en fonction du rayon dépendent de la géométrie de chaque tuyère. Les différentes formes de tuyères peuvent influencer les caractéristiques de l'écoulement de manière distincte.

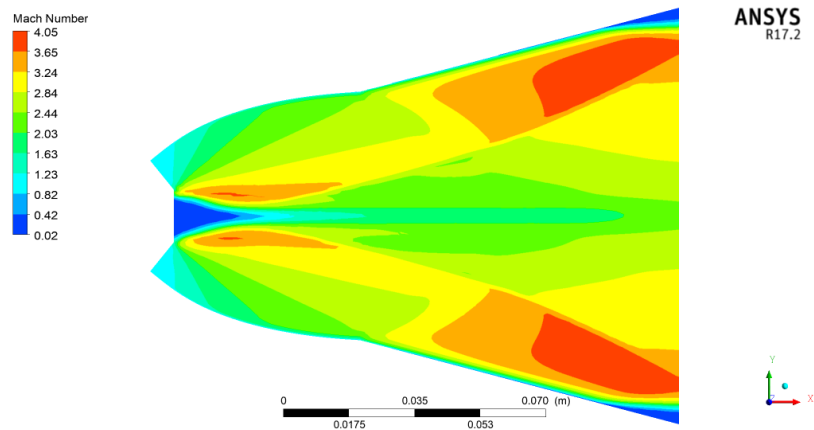
**d) NPR=60 :**



**Figure IV.32: iso-Mach ( $r=0.4$ )**



**Figure IV.33: iso-Mach ( $r=1$ )**



**Figure IV.34: iso-Mach (r=0.7)**

Lorsque nous atteignons un rapport de pression des gaz (NPR) de 60, des observations intéressantes se manifestent dans le comportement de l'écoulement pour les différentes configurations de tuyères étudiées.

Tout d'abord, pour les tuyères ayant des rayons de 0.7 et 1 cm (figure IV.34 et figure IV.34 respectivement), nous constatons que l'écoulement quitte la surface en maintenant la séparation apparue sur la lèvre de la tuyère. Cela signifie que la séparation de l'écoulement persiste et ne se résorbe pas. La présence de cette séparation peut entraîner des pertes de poussée et une inefficacité du système de propulsion, car elle perturbe l'écoulement régulier et peut générer des traînées.

Cependant, pour la configuration de tuyère avec un rayon de 0.4 cm (figure IV.32), nous constatons que la séparation de l'écoulement ne se manifeste plus. Cela suggère que cette configuration particulière de tuyère est plus efficace pour éviter la séparation de l'écoulement à des NPR élevés. Cette absence de séparation peut être attribuée à la géométrie spécifique de la tuyère, qui favorise un écoulement plus stable et régulier.

En outre, il est intéressant de noter que le nombre de Mach reste constant à partir de cette valeur de NPR. Cela signifie que l'écoulement atteint une vitesse critique et ne continue pas à s'accélérer au-delà de ce point. Cette observation est importante car elle indique que l'écoulement dans la tuyère atteint une vitesse maximale et ne subit pas de variations significatives au-delà de cette valeur de NPR.

e) NPR=100 :

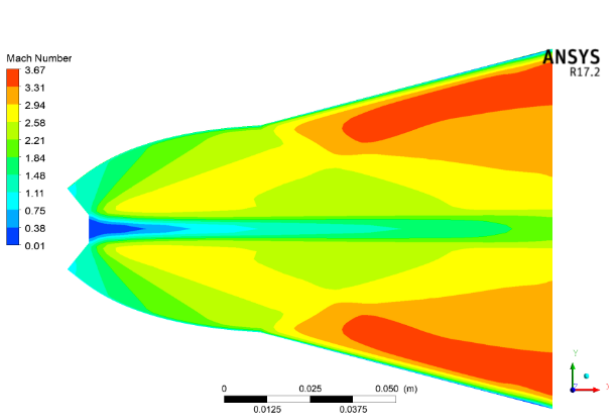


Figure IV.35: iso-Mach (r=0.4)

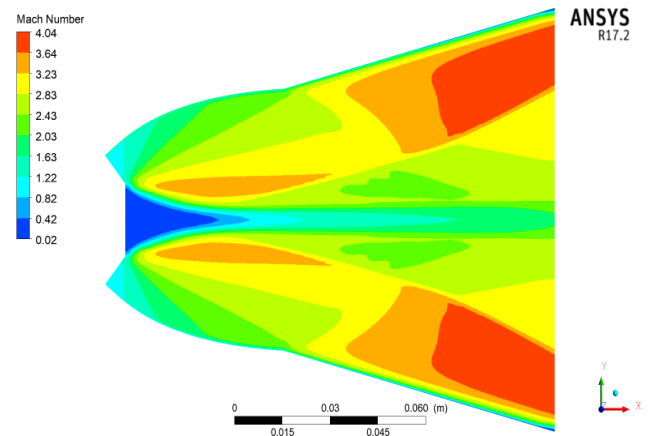


Figure IV.36: iso-Mach (r=1)

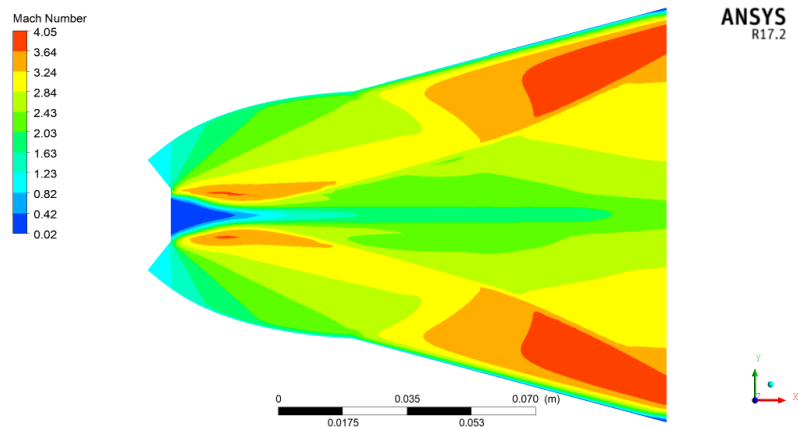


Figure IV.37: iso-Mach (r=0.7)

Dans notre étude, nous avons examiné différentes configurations de tuyères avec des rayons de 0.4 cm, 0.7 cm et 1 cm. Une observation intéressante que nous avons faite est que pour les NPR 80, 90 et 100, nous ne remarquons plus la présence de la séparation de l'écoulement dans toutes les tuyères étudiées.

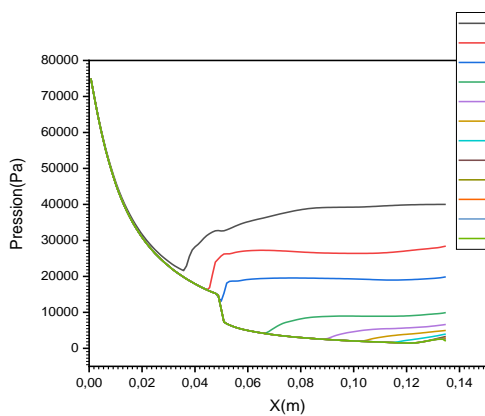
Cela signifie que, pour ces valeurs élevées de NPR, l'écoulement dans les tuyères devient suffisamment énergétique pour surmonter les forces aérodynamiques qui peuvent causer la séparation de l'écoulement. L'écoulement reste attaché à la surface de la tuyère tout au long de son trajet, ce qui est bénéfique pour les performances de propulsion, car cela réduit les pertes de poussée et favorise un écoulement plus efficace.

Les figures IV.35, IV.36 et IV.37 illustrent les résultats obtenus pour NPR=100, montrant la configuration de l'écoulement dans les différentes tuyères. Dans ces figures,

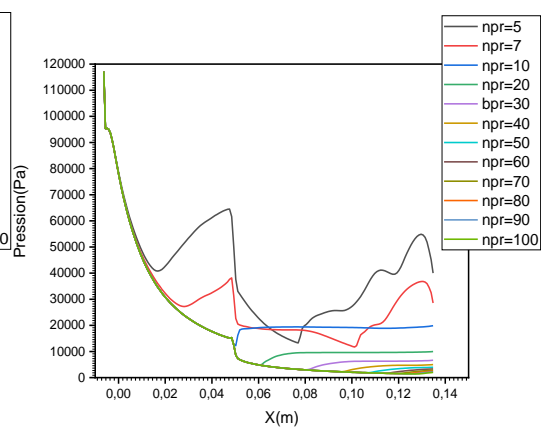
nous pouvons observer que l'écoulement reste régulier et attaché à la surface de la tuyère, sans présence de séparation.

Cela suggère que pour les NPR 80, 90 et 100, les performances des tuyères avec des rayons de 0.4 cm, 0.7 cm et 1 cm sont similaires en termes d'écoulement et de comportement. Ces résultats sont encourageants car ils indiquent que les tuyères peuvent fonctionner de manière optimale à des NPR élevés, ce qui est essentiel pour les applications de propulsion.

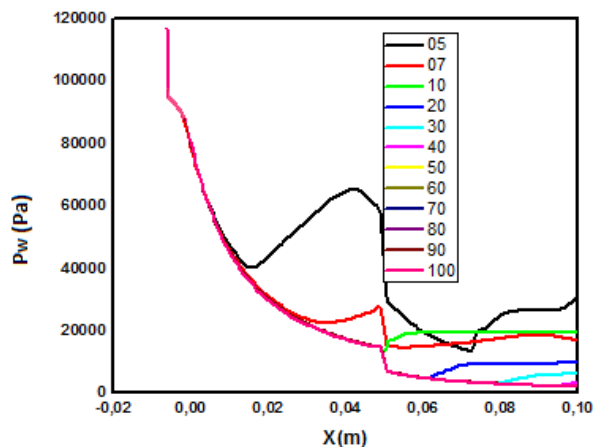
➤ **Courbes de pression :**



**Figure IV. 38 : Courbes de Pression pour le rayon =0.4**



**Figure IV.39: Courbes de Pression pour le rayon =1**



**Figure IV.40: les courbes de pression pour différents NPR (r=0.7)**

Les figures IV.38, IV.39 et IV.40 nous présentent les courbes de pression à la paroi (PW) pour différentes valeurs de NPR en fonction de la position le long de la tuyère. Une

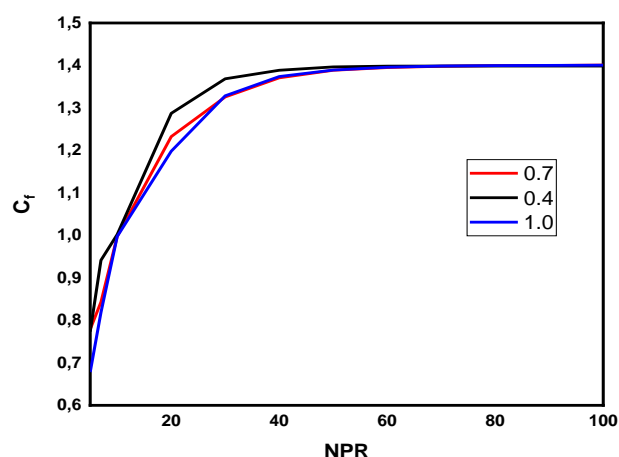
observation importante que nous pouvons faire est que ces courbes sont presque confondues et se superposent lorsque le NPR diminue jusqu'à ce que la séparation de l'écoulement apparaisse dans plusieurs positions le long de la tuyère.

Cela suggère que, dans les premières sections de la tuyère où l'écoulement est régulier et attaché à la paroi, la pression à la paroi est relativement constante et ne varie pas significativement avec le NPR. Les variations de pression sont principalement dues à des effets géométriques et à la forme de la tuyère, plutôt qu'au rapport de pression des gaz lui-même.

Cependant, lorsque la séparation de l'écoulement commence à se produire à certaines positions le long de la tuyère, les courbes de pression commencent à diverger. La séparation de l'écoulement crée des zones de basse pression, ce qui entraîne une diminution de la pression à la paroi à ces emplacements spécifiques. Cette observation est cohérente avec ce que nous avons précédemment discuté concernant l'effet de la séparation de l'écoulement sur les performances de la tuyère.

D'autre part, nous notons également que l'augmentation du NPR à de grandes valeurs n'a pas d'effet significatif sur la pression à la paroi. Cela indique que, une fois que la séparation de l'écoulement se produit, la pression à la paroi ne subit pas de variations importantes même avec une augmentation significative du NPR. Cela peut être attribué aux caractéristiques spécifiques de la géométrie de la tuyère et aux interactions complexes entre l'écoulement et la paroi.

➤ **Coefficient de poussée :**



**Figure IV.41: courbes de coefficient de poussée**

La figure IV.41 représente l'évolution du coefficient de poussée en fonction du rapport de pression des gaz (NPR) pour différents rayons du corps central de la tuyère.

Une observation intéressante que nous pouvons faire est que plus le rayon du corps central est minimisé, généralement meilleure est la poussée obtenue.

Cela s'explique par les caractéristiques de l'écoulement dans les tuyères avec différents rayons. Lorsque le rayon du corps central est réduit, cela conduit à une augmentation de la vitesse de l'écoulement. Cette augmentation de la vitesse de l'écoulement favorise une plus grande poussée, car elle augmente la quantité de mouvement des gaz expulsés par la tuyère.

De plus, la réduction du rayon du corps central peut également entraîner une meilleure efficacité de conversion de l'énergie thermique en poussée. Lorsque le rayon est minimisé, les gaz éjectés par la tuyère subissent une expansion plus importante, ce qui permet une meilleure extraction d'énergie de ces gaz et une conversion plus efficace en poussée.

Cependant, il convient de noter que l'optimisation du rayon du corps central doit être équilibrée avec d'autres considérations de conception et de performance. Des contraintes telles que la résistance structurale de la tuyère et les contraintes thermiques doivent également être prises en compte. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre le rayon du corps central et d'autres paramètres de conception pour obtenir les meilleures performances globales de la tuyère.

### III.3 L'effet de l'angle :

#### III.3.1 Les Géométries :

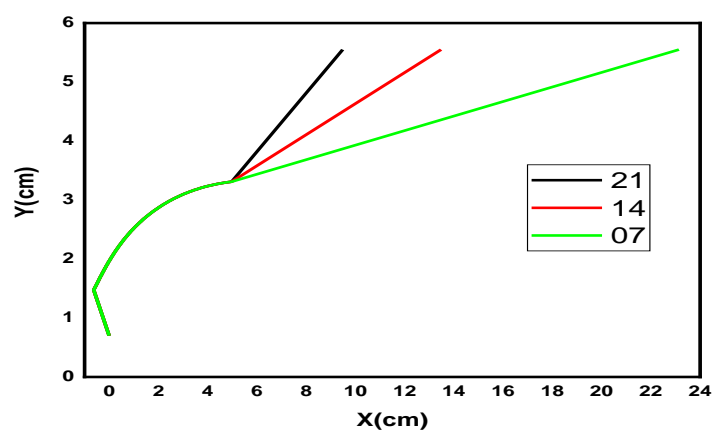


Figure IV.42: Configuration des 3 tuyères

➤ Contours de mach :

a) Pour NPR=5

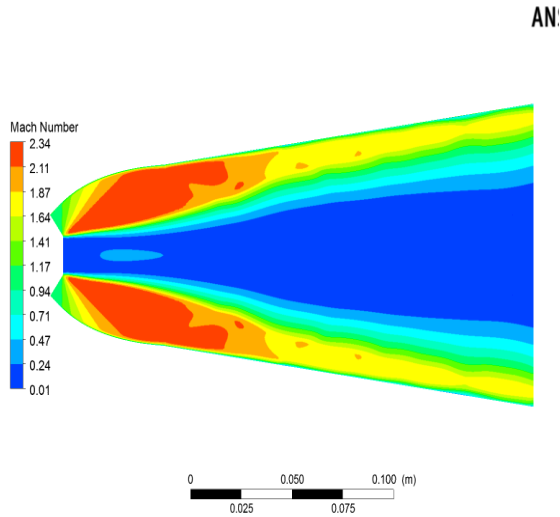


Figure IV.43: iso-mach ( $\alpha=7$ )

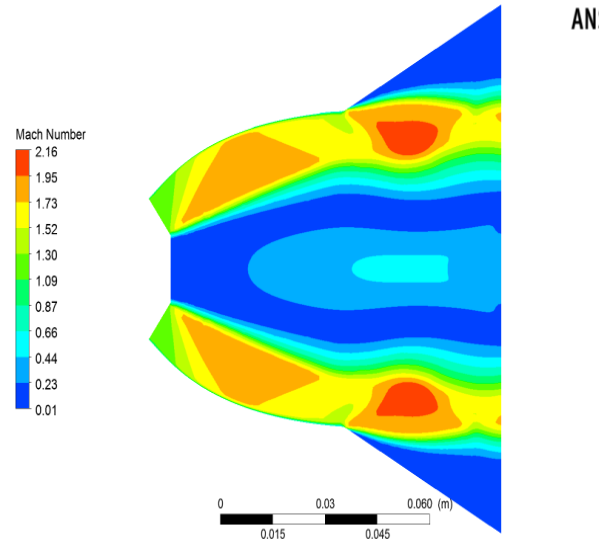


Figure IV.44: iso-mach ( $\alpha=21$ )

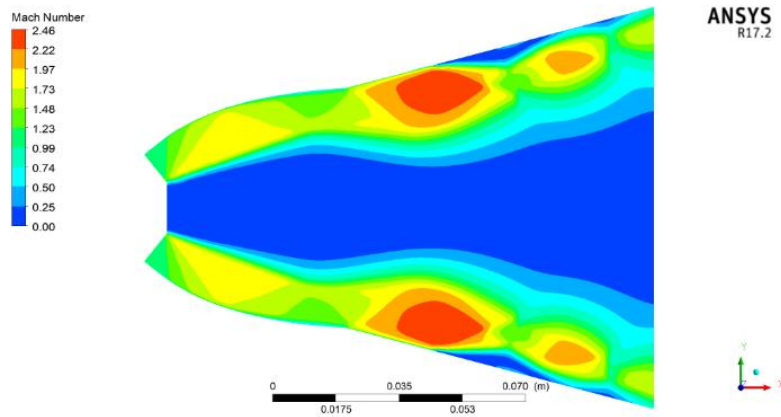


Figure IV.45: iso-Mach ( $\alpha=14$ )

Lorsque nous examinons les tuyères avec un NPR de 5, nous constatons un comportement intéressant. La tuyère d'angle 14, représentée dans la figure IV.46, présente une perturbation dans l'écoulement, tandis que les deux autres tuyères avec des angles de 7 (figure IV.43) et 21 (figure IV.44) ne présentent pas cette perturbation.

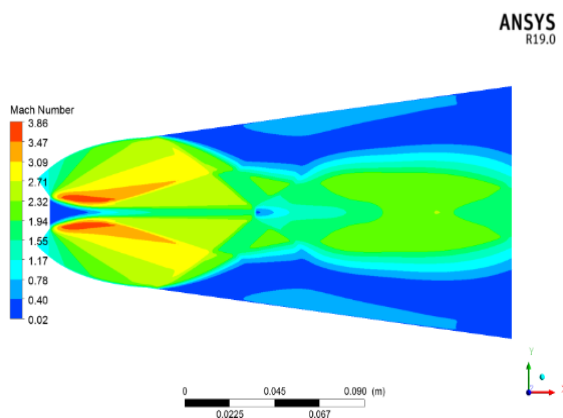
Cette observation suggère que l'angle de la tuyère a un impact significatif sur le comportement de l'écoulement. Dans le cas de l'angle 14, la géométrie de la tuyère entraîne une perturbation de l'écoulement, probablement en raison d'une interaction complexe entre l'écoulement et les contours de la tuyère à cet angle spécifique. Cette perturbation peut entraîner des variations dans la distribution de la pression et de la vitesse de l'écoulement le long de la tuyère, ce qui peut affecter les performances de propulsion.

En revanche, les tuyères d'angle 7 et 21 ne présentent pas cette perturbation d'écoulement. Dans le cas de l'angle 7 (figure IV.43), nous observons l'absence de séparation de l'écoulement, ce qui indique que l'écoulement reste attaché à la surface de la tuyère tout au long de son trajet. Cela peut être attribué à une géométrie plus favorable qui favorise un écoulement régulier.

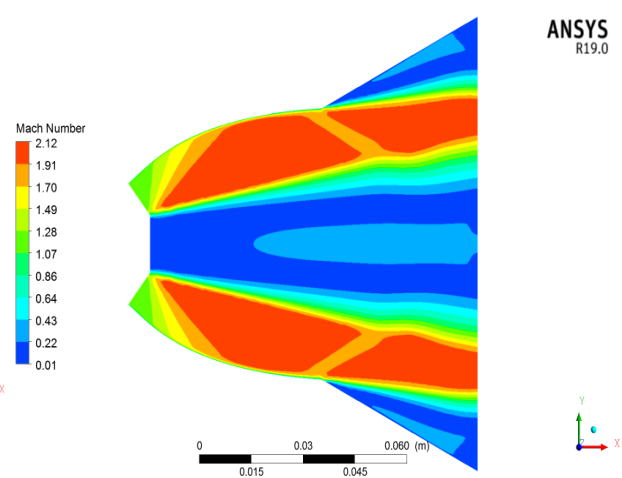
D'autre part, la tuyère d'angle 21 (figure IV.44) montre la manifestation de la séparation de l'écoulement. Cela indique que, pour cet angle plus grand, l'écoulement se sépare de la surface de la tuyère à certains endroits, créant des zones de basse pression et des perturbations dans l'écoulement. Cette séparation peut entraîner des pertes de poussée et une efficacité réduite de la tuyère.

Il est important de noter que ces observations spécifiques aux angles de tuyère peuvent être influencées par d'autres facteurs tels que la géométrie générale de la tuyère, les conditions aux limites, etc. L'interaction complexe entre la géométrie de la tuyère, l'angle et les autres paramètres de conception peut entraîner des variations significatives dans le comportement de l'écoulement.

**b) Pour NPR=7**

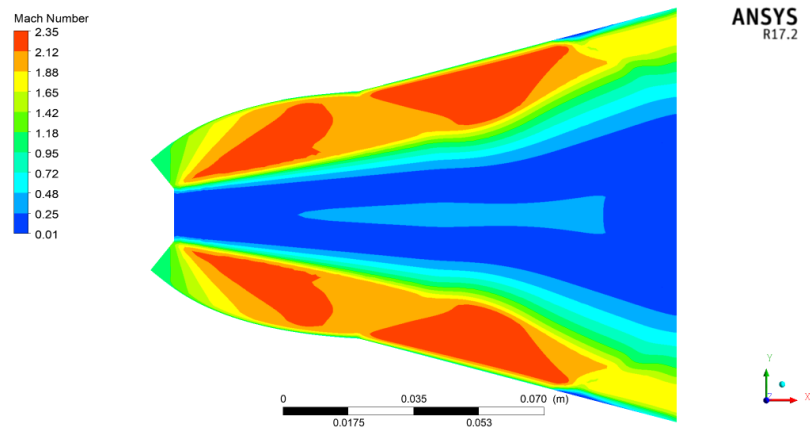


**Figure IV.46: iso-mach ( $\alpha = 7$ )**



**Figure IV.47: iso-mach ( $\alpha = 21$ )**





**Figure IV.48 : iso-mach ( $\alpha=14$ )**

Dans les tuyères d'angle 7 et 21, nous constatons une séparation de l'écoulement au niveau du point d'inflexion, comme le montrent les figures IV.46 et IV.47. La séparation de l'écoulement se produit lorsque l'écoulement se détache de la surface de la tuyère, créant des zones de basse pression et des perturbations dans l'écoulement.

Cependant, une observation intéressante est que la tuyère d'angle 7 présente un nombre de Mach plus élevé par rapport à la tuyère d'angle 21. Le nombre de Mach est une mesure de la vitesse de l'écoulement par rapport à la vitesse du son, et un nombre de Mach plus élevé indique une vitesse plus élevée de l'écoulement.

La présence d'un nombre de Mach plus élevé dans la tuyère d'angle 7 peut être expliquée par plusieurs facteurs. Tout d'abord, la géométrie de la tuyère d'angle 7 peut favoriser un écoulement plus rapide et moins sujet à la séparation. La forme de la tuyère et son angle spécifique peuvent créer des conditions plus favorables à un écoulement régulier et attaché à la surface.

D'autre part, la tuyère d'angle 21 présente une séparation de l'écoulement plus prononcée, ce qui peut entraîner une diminution de la vitesse de l'écoulement et donc un nombre de Mach plus faible. La séparation de l'écoulement crée des zones de basse pression, ce qui peut ralentir l'écoulement et réduire sa vitesse.

Dans la figure IV.49 qui représente le contour de mach pour un angle de 14. Malgré l'absence de la séparation de l'écoulement de la paroi, on remarque une petite perturbation dans le deuxième galbe de la tuyère.

c) Pour NPR=20

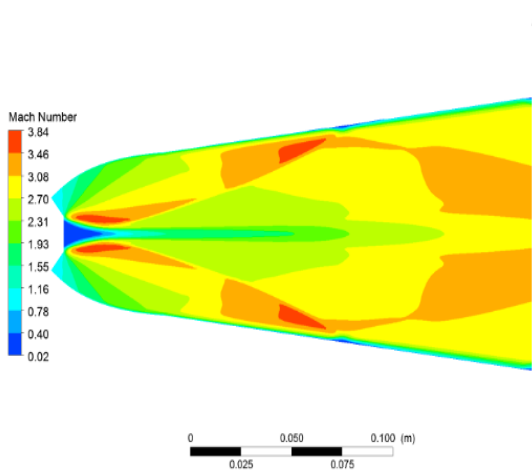


Figure IV.49: iso-mach ( $\alpha = 7$ )

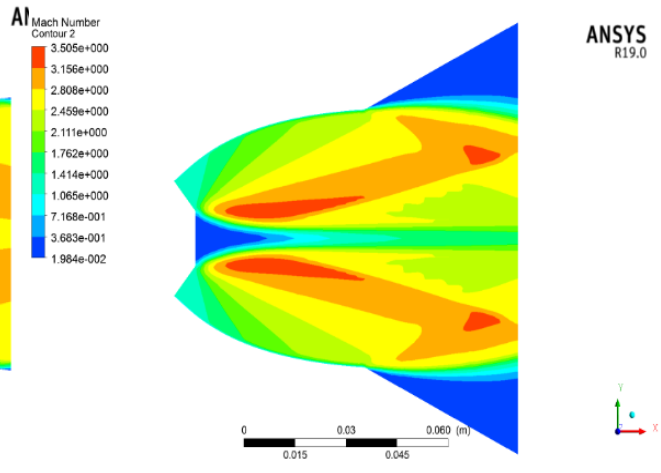


Figure IV.50: iso-mach ( $\alpha = 21$ )

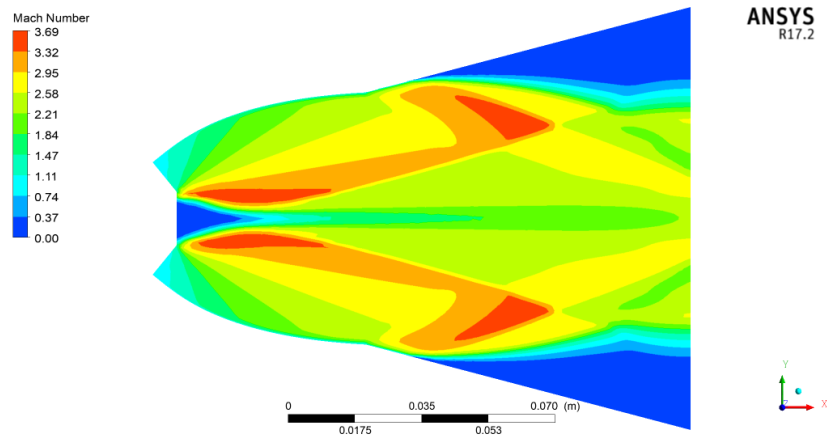
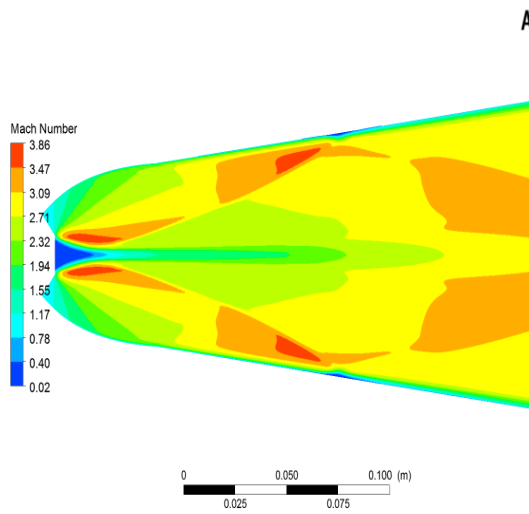


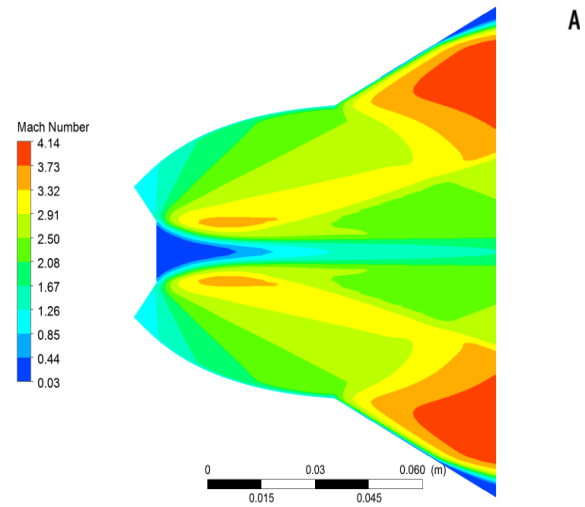
Figure IV.51: iso-Mach ( $\alpha=14$ )

On observe un grand avancement de la séparation de l'écoulement dans la tuyère d'angle 7 (figure IV. 49). Pendant que pour l'angle 21 elle reste à sa même position que celle de NPR précédé (figure IV. 50). Pour cette valeur de NPR on remarque que la séparation de l'écoulement commence à apparaître après le point de jonction pour le cas de l'angle 14 (figure IV.51).

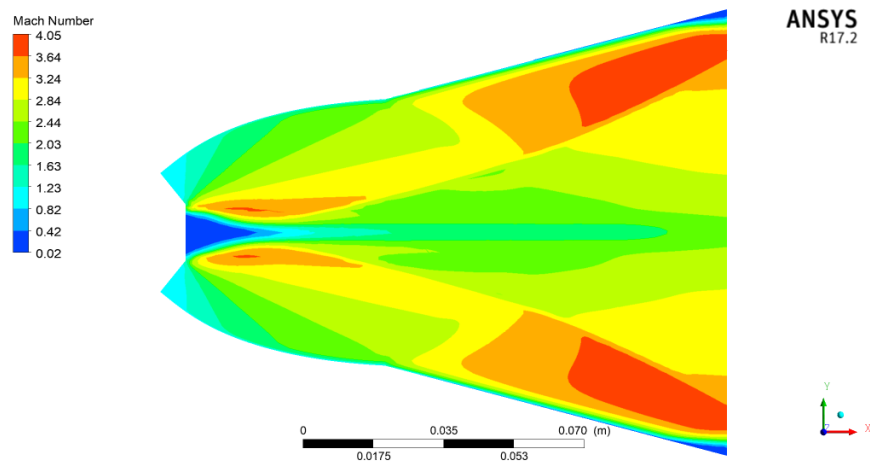
d) Pour NPR=70



**Figure IV.52: iso-mach**  
**( $\alpha=7$ )**



**Figure IV.53: iso-mach ( $\alpha=21$ )**



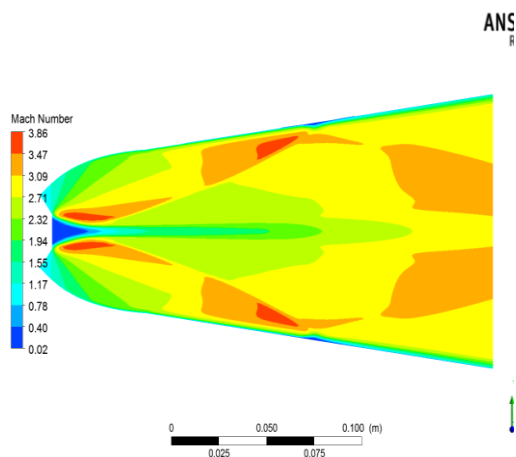
**Figure IV.54: iso-Mach ( $\alpha=14$ )**

Les figures IV.52, IV.53 et IV.54 nous fournissent des informations importantes sur le comportement de l'écoulement pour une valeur spécifique de NPR. Dans ces figures, nous pouvons observer que la séparation de l'écoulement se déplace en aval de la tuyère pour les angles 21 et 14, tandis que la tuyère d'angle 7 présente un résultat similaire.

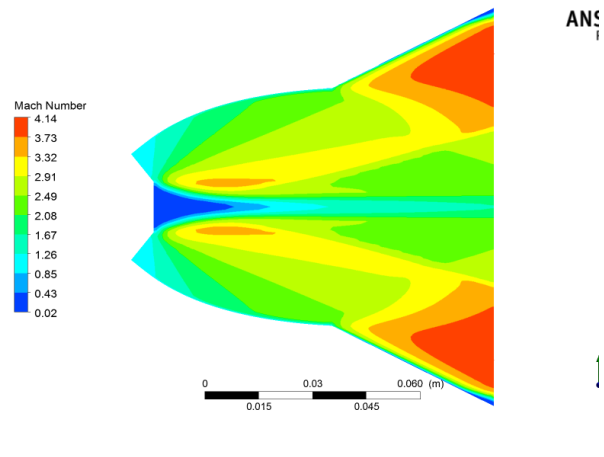
Cette observation indique que, pour cette valeur particulière de NPR, les deux tuyères (angle 7 et angle 21) montrent une séparation de l'écoulement qui se produit plus en aval de la tuyère. Cela signifie que la zone où l'écoulement se détache de la surface de la tuyère se déplace vers l'arrière dans la tuyère.

Il est important de noter que cette observation est spécifique à cette valeur de NPR et aux angles de tuyère examinés. Pour d'autres valeurs de NPR ou pour des angles de tuyère différents, le comportement de l'écoulement peut varier. Il est donc essentiel de mener une analyse approfondie en considérant différentes configurations pour obtenir une compréhension complète du comportement de l'écoulement.

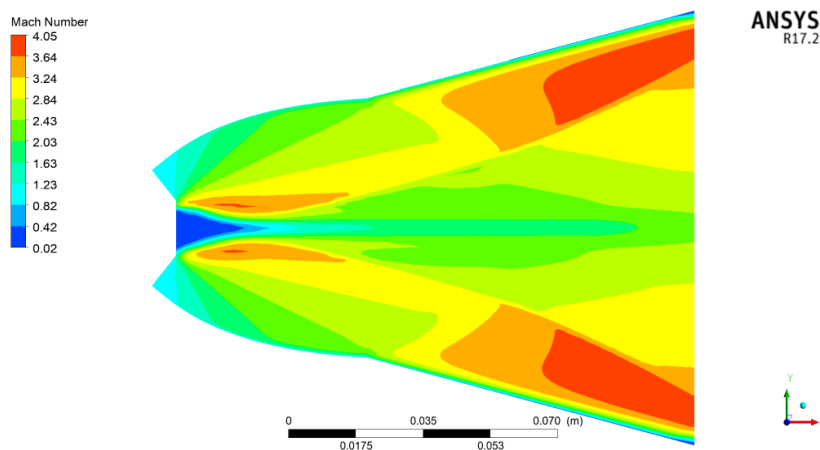
**e) Pour NPR=100**



**Figure IV.55: iso-mach ( $\alpha = 7$ )**



**Figure IV.56: iso-mach ( $\alpha = 21$ )**



**Figure IV.57: iso-Mach ( $\alpha=14$ )**

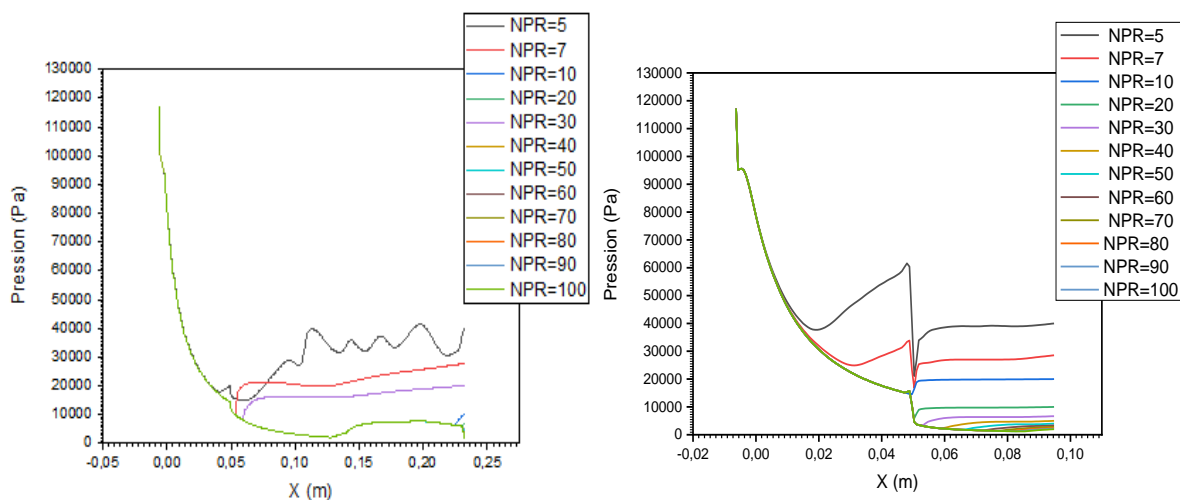
Les figures IV.55, IV.56 et IV.57 fournissent des informations intéressantes sur l'écoulement dans les tuyères à différents angles lorsque le NPR (rapport de pression d'entrée) est augmenté. Dans les trois cas, nous observons que l'écoulement dépasse le niveau de la lèvre de la tuyère à mesure que le NPR augmente, ce qui se traduit par une augmentation du nombre de Mach.

Cela indique que, à des valeurs plus élevées de NPR, la vitesse de l'écoulement augmente, dépassant la vitesse du son et conduisant à un nombre de Mach plus élevé. L'augmentation du nombre de Mach peut avoir des conséquences significatives sur les performances de la tuyère, telles que l'efficacité de la conversion de l'énergie et la génération de poussée.

Il est intéressant de noter que cette observation est valable pour les trois angles de tuyère étudiés. Qu'il s'agisse de l'angle 7 (figure IV.55), de l'angle 14 (figure IV.57) de l'angle 21 (figure IV.56) ou de tout autre angle, l'augmentation du NPR entraîne une augmentation du nombre de Mach et un dépassement de la lèvre de la tuyère par l'écoulement.

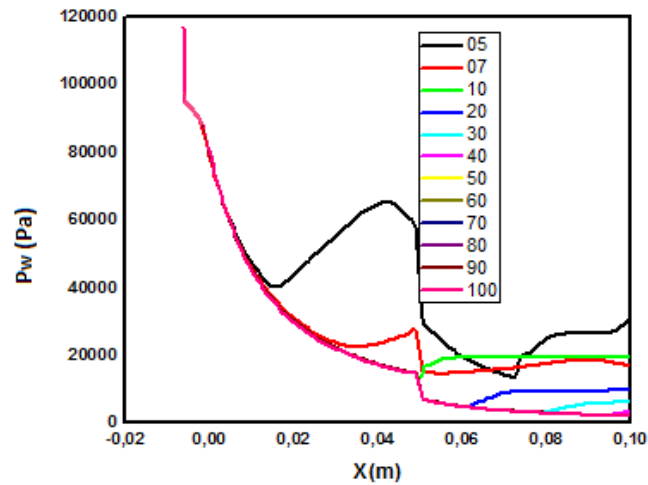
Cela souligne l'importance de prendre en compte le NPR dans la conception et l'analyse des tuyères. L'optimisation du NPR permet de contrôler la vitesse de l'écoulement et de s'assurer qu'elle reste compatible avec les caractéristiques de la tuyère et les performances recherchées.

### ➤ Courbes de pression :



**Figure IV.58: Courbes de Pression Pour  $\alpha=7^\circ$**

**Figure IV.59: Courbes de pression Pour  $\alpha=21^\circ$**



**Figure IV.60: les courbes de pression pour  $\alpha=14^\circ$**

La figure présentée ci-dessus illustre la variation de la pression le long de la paroi de la tuyère pour différentes valeurs de NPR. Une observation importante est que la pression diminue progressivement le long de la tuyère, ce qui est généralement attendu dans un écoulement convergent-divergent.

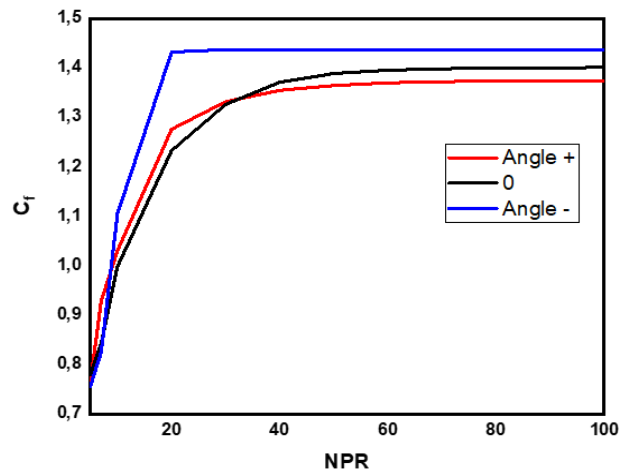
Cependant, on remarque également la présence de perturbations dans les NPR les plus petits. Ces perturbations peuvent être dues à des effets de séparation de l'écoulement ou à d'autres phénomènes complexes liés à la géométrie de la tuyère et aux conditions d'écoulement.

À mesure que le NPR est augmenté (et que la valeur de  $P_{out}$  diminue), on observe que la pression devient plus stable. Cela suggère que des valeurs plus élevées de NPR favorisent un écoulement plus régulier et moins sujet aux perturbations.

Il est important de noter que la stabilité de la pression le long de la paroi dépend également de la conception et de la géométrie spécifiques de la tuyère. Différentes configurations peuvent avoir des comportements différents en termes de variation de la pression.

L'observation de la stabilisation de la pression avec l'augmentation du NPR peut être attribuée à des facteurs tels que l'effet de compression de l'écoulement, la modification des conditions d'écoulement ou des interactions complexes entre les ondes de choc et les régions de basse pression.

➤ **Coefficients de poussée :**



**Figure IV. 61 : courbes de coefficient de poussée**

La figure IV.61 présente la variation du coefficient de poussée pour différents angles de tuyère et différentes valeurs de NPR. Cette représentation graphique nous permet d'analyser l'impact de ces paramètres sur la poussée générée par la tuyère.

Nous pouvons observer qu'à de petites valeurs de NPR, l'augmentation de l'angle de deuxième galbe conduit à une augmentation de la poussée. Cela indique que, pour ces conditions, une configuration de tuyère avec un angle plus grand favorise une meilleure performance en termes de génération de poussée.

Cependant, lorsque l'angle de deuxième galbe diminue, nous constatons que la poussée devient plus importante pour les valeurs les plus élevées de NPR. Cela suggère qu'à mesure que le NPR augmente, il est possible d'obtenir une meilleure poussée même avec des angles de deuxième galbe plus petits.

Il convient de noter que, pour certaines valeurs de NPR, la poussée reste constante indépendamment de l'angle de deuxième galbe. Cela peut être dû à un équilibre entre les effets de la géométrie de la tuyère et les conditions d'écoulement associées à ces valeurs particulières de NPR.

# CONCLUSION

Au commencement de notre étude, nous avons entrepris une étude approfondie du domaine de la conception des tuyères propulsives afin d'explorer les divers comportements des écoulements à travers ces dispositifs. Notre attention s'est concentrée particulièrement sur l'examen de deux types de tuyères supersoniques : la tuyère expansion-déflexion (E-D) et la tuyère double galbe (DBN), car ces configurations sont encore en phase d'étude.

L'évolution des paramètres d'écoulement tels que le nombre de Mach, la pression, la température et la densité a été étudiée et analysée à l'aide du logiciel de simulation Ansys Fluent, qui a été divisé en quatre étapes distinctes : la création de la géométrie surfacique, la génération du maillage, la résolution du système et la visualisation des résultats. Les données obtenues sous forme de contours ont ensuite été exportées vers le logiciel Origin Lab pour être présentées graphiquement.

Pour mener à bien notre étude, nous avons utilisé une approche de simulation numérique en utilisant un modèle bidimensionnel pour représenter les tuyères propulsives. Nous avons supposé un gaz parfait dans nos calculs, ce qui nous a permis de prendre en compte les principales caractéristiques de l'écoulement.

Notre étude s'est articulée autour de trois parties distinctes, chacune visant à examiner différents aspects des tuyères propulsives en fonction de variations du rapport de pression à l'entrée (NPR). Voici une description détaillée de chacune de ces parties :

➤ Simulation de la tuyère expansion-déflexion (E-D) : Dans cette partie, nous avons effectué des simulations pour les cas visqueux et non visqueux de la tuyère E-D. L'objectif était d'analyser les caractéristiques de l'écoulement à travers cette tuyère dans ces deux régimes. En utilisant le code de simulation Ansys Fluent, nous avons pu étudier et comparer les comportements de l'écoulement, en particulier en termes de nombre de Mach, de pression et de poussée générée.

➤ Comparaison entre les tuyères E-D et CN : Dans cette partie, nous avons procédé à une comparaison détaillée entre les tuyères E-D et les tuyères à convergent-divergent (CN), en examinant les paramètres tels que le nombre de Mach, la pression et la poussée.



Cette comparaison nous a permis de mieux comprendre les différences et les avantages relatifs de ces deux types de tuyères supersoniques.

➤ Simulation de tuyère double galbe (DBN) : Nous nous sommes également intéressés à la tuyère double galbe (DBN) et avons réalisé des simulations pour un écoulement visqueux en faisant varier le rayon et l'angle de la tuyère. L'objectif était d'évaluer l'impact de ces paramètres géométriques sur les performances de la tuyère DBN et de comparer les résultats obtenus.

En menant ces simulations numériques et en analysant les résultats, nous avons pu obtenir une meilleure compréhension des caractéristiques de l'écoulement dans les tuyères propulsives étudiées. Ces informations sont essentielles pour le développement et l'amélioration des performances des systèmes propulsifs dans le domaine de l'aéronautique et de l'astronautique.

les interprétations des résultats obtenus dans notre étude confirment que notre approche de simulation est efficace pour analyser les performances des tuyères propulsives en respectant les principes fondamentaux de l'aérodynamique des tuyères. Ces résultats nous ont permis d'obtenir des informations précieuses sur les comportements de l'écoulement et de formuler des recommandations pour optimiser la conception des tuyères et améliorer leurs performances.

L'une des conclusions majeures de notre étude est que l'augmentation des dimensions de la tuyère permet d'augmenter le nombre de Mach à la sortie. Cela signifie que, en adaptant correctement la géométrie de la tuyère, il est possible d'atteindre des vitesses de sortie supersoniques plus élevées. Cette information est d'une grande importance pour les applications nécessitant des performances propulsives accrues, comme les avions supersoniques ou les lanceurs spatiaux.

Par ailleurs, nous avons observé que plus la pression à la sortie de la tuyère diminue, plus la pression à la paroi de la tuyère devient indépendante du NPR. Cela est dû à l'expansion de l'écoulement dans la section divergente de la tuyère, qui devient prédominante. Cette caractéristique élimine les fluctuations de pression et facilite l'optimisation de la conception de la tuyère. En maximisant l'effet d'expansion, il est possible d'améliorer les paramètres de sortie tels que le nombre de Mach et la poussée, conduisant ainsi à de meilleures performances globales.

Ces conclusions nous donnent des pistes pour optimiser la conception des tuyères propulsives, en mettant l'accent sur l'expansion de l'écoulement dans la section divergente. En ajustant les dimensions et la géométrie de la tuyère, il est possible d'optimiser les performances et d'atteindre des résultats supérieurs en termes de vitesse, de pression et de poussée.

L'efficacité d'une tuyère dépend en grande partie de la capacité à minimiser la séparation de l'écoulement et les charges latérales, ce qui permet d'augmenter la poussée générée. Les chercheurs et les constructeurs se sont donc intéressés au développement de la tuyère expansion-déflexion (E-D), qui présente des avantages par rapport aux tuyères classiques, notamment dans des conditions de basses altitudes. En revanche, pour des altitudes élevées, les performances des deux types de tuyères peuvent être similaires. Ces constatations nous donnent une idée de la plage d'application appropriée pour chaque type de tuyère.

En comparant nos résultats avec ceux obtenus par d'autres simulations numériques, nous avons constaté une concordance et une compatibilité, ce qui renforce la crédibilité de notre travail. Cette cohérence entre les différentes études souligne la robustesse de nos résultats et confirme la pertinence de notre approche de simulation.

Il est important de noter que bien que les simulations numériques fournissent des informations précieuses, il est également essentiel de réaliser des tests expérimentaux pour valider ces résultats. Les essais en soufflerie et les expérimentations sur des prototypes réels permettront de vérifier les performances des tuyères dans des conditions réelles et de s'assurer de leur conformité aux prédictions numériques.

Notre étude met en évidence l'importance de minimiser la séparation de l'écoulement et les charges latérales pour optimiser les performances des tuyères. Les résultats obtenus confirment l'avantage de la tuyère E-D dans des conditions de basse altitude, tandis que les performances des tuyères classiques et E-D peuvent être comparables à des altitudes plus élevées. La concordance de nos résultats avec d'autres simulations numériques renforce la crédibilité de notre travail, soulignant ainsi l'utilité de notre approche dans l'analyse des performances des tuyères propulsives.

Dans cette étude, nous avons réalisé une analyse approfondie des caractéristiques d'écoulement associées à la tuyère à double galbe. Nous avons choisi d'étudier le comportement de l'écoulement dans cette tuyère en faisant varier deux paramètres : le

rayon du corps central et l'angle d'inflexion. À travers notre simulation et l'analyse des résultats obtenus, nous avons observé des comportements distincts de l'écoulement pour différentes valeurs de ces paramètres, aussi bien à haute altitude qu'à basse altitude (pour différents NPR).

Nous avons constaté que le choix du rayon du corps central et de l'angle d'inflexion influence le comportement de l'écoulement, et donc les performances de chaque tuyère, notamment en ce qui concerne la poussée et l'efficacité. À certains NPR, une séparation de l'écoulement se produit dans les tuyères, ce qui entraîne des perturbations. En augmentant le NPR, nous avons observé que la séparation de l'écoulement se déplace vers l'aval de la tuyère jusqu'à disparaître complètement pour des valeurs élevées de NPR (haute altitude). De plus, nous avons constaté que la disparition de la séparation se produit à des valeurs de NPR plus élevées pour certaines configurations de tuyères (avec différents rayons et angles), ce qui indique que ces configurations particulières sont plus efficaces pour éviter la séparation de l'écoulement à des valeurs élevées de NPR.

En ce qui concerne les performances des tuyères, nous avons observé des différences au niveau de la poussée pour chaque configuration. En diminuant le rayon du corps central, nous obtenons une poussée plus importante. Quant aux différents angles d'inflexion, l'augmentation de l'angle conduit à une augmentation de la poussée pour les valeurs de NPR les plus petites, mais pour des valeurs plus élevées de NPR, la poussée devient plus importante pour l'angle le plus petit.

Ainsi, lors de la conception d'une tuyère, il est essentiel de prendre en compte l'influence du rayon du corps central et de l'angle d'inflexion sur le comportement de l'écoulement à l'intérieur de la tuyère. Cela permettra de concevoir une tuyère qui répondra au mieux à nos besoins spécifiques en termes de performances.

## **PERSPECTIVES**

À la lumière de cette étude, plusieurs perspectives de recherche et d'amélioration se dessinent :

**Approfondissement de la couche limite** : L'étude de la couche limite dans la tuyère à double galbe à des régimes élevés présente un intérêt particulier. Une analyse

approfondie de la dynamique de la couche limite permettrait de mieux comprendre son comportement et son impact sur les performances de la tuyère. Des investigations plus détaillées sur les interactions entre la couche limite et l'écoulement interne de la tuyère pourraient être entreprises.

**Modèle tridimensionnel et aspects thermiques** : Une extension du modèle bidimensionnel utilisé dans cette étude vers un modèle tridimensionnel permettrait de capturer davantage de détails et de réalisme dans la simulation. En outre, il serait intéressant de prendre en compte les aspects thermiques de l'écoulement, tels que les transferts de chaleur et les variations de température, qui ont une influence significative sur les performances des tuyères propulsives.

**Modèles de turbulence avancés** : Pour obtenir une analyse plus précise du comportement des écoulements dans la tuyère supersonique, l'utilisation de modèles de turbulence plus sophistiqués pourrait être explorée. Les modèles de turbulence, tels que les modèles à deux équations (k-epsilon, k-omega), permettent de prendre en compte les effets turbulents et de mieux prédire les caractéristiques de l'écoulement. Leur incorporation dans les simulations numériques apporterait une meilleure compréhension des phénomènes turbulents et de leur impact sur les performances de la tuyère.

**Validation expérimentale** : Bien que les simulations numériques soient utiles pour étudier et prédire le comportement des tuyères, il est essentiel de réaliser des tests expérimentaux pour valider de manière décisive les résultats obtenus. Des essais en soufflerie et des expérimentations sur des prototypes réels de tuyères permettraient de confronter les prédictions numériques avec des données réelles, renforçant ainsi la confiance dans l'approche de simulation et permettant d'ajuster et d'affiner les modèles utilisés.

Ces perspectives d'amélioration comprennent une analyse plus approfondie de la couche limite, le développement d'un modèle tridimensionnel prenant en compte les aspects thermiques, l'utilisation de modèles de turbulence avancés et la réalisation de tests expérimentaux pour valider les résultats obtenus. Ces approches contribueront à une meilleure compréhension des tuyères propulsives et à l'amélioration de leurs performances.

# Références

1. Omar, Abada, "Conception Des Tuyères Supersoniques A Haute Température-Type Détente Centrée- Par La Méthode Des Caractéristique", Blida Mars 2006
2. G.V.R. Rao. « contoured rocket nozzles», Proc. 9<sup>th</sup> Int.Astro-Fed.Congress, Amsterdam, (1958)
3. Guderley, K.G. et al., "Continuous and discontinuous solutions for optimum thrust nozzles of given length," Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 12, No. 6, pp. 588-628, 1973.
4. Genin, C., et al., "Experimental and numerical study of dual-bell nozzle flow," Progress in Flight Physics Vol. 5, pp. 363-376, 2013.
5. SJ. Beresh, NT. Clemens, and DS. Dolling. Relationship between upstream turbulent boundary-layer velocity fluctuations and separation shock unsteadiness. AIAA Journal, 40(12) :2412–2422, 2002.
6. Östlund, J., and Muhammad-Klingmann, B., "Supersonic flow separation with application to rocket engine nozzles," Transactions of the ASME, AMR, Vol. 58, pp. 143-177, 2005.
7. Rao, G.V.R., "Exhaust nozzle contour for optimum thrust," Jet Propulsion, Vol. 28, No. 6, pp. 377-382, 1958.
8. Rizk, M.A. Serag-Eldin, A. Mobarak. (1983) Semi-elliptic computation of an axi-symmetric transonic nozzle flow. Applied Mathematical Modelling 7:2, 123-127 online publication date: 1-Apr-1983.
9. Rao, G.V.R., "Recent developments in rocket nozzle configurations," ARS Journal, Vol. 31, No. 11, pp. 1488-1494, 1961.
10. Wade, M., Encyclopedia Astronautica, 25687 pages-9423 images, <http://www.astronautix.com/>, 2011
11. Horn, M. and Fisher S., "Altitude compensating nozzles," Rocket dyne Division. NASA-CR-194719, 1994.
12. Sreenath, K. R., & Mubarak, A. K. (2016). Design and analysis of contour bell nozzle and comparison with dual bell nozzle. *International Journal of Research and Engineering*, 3(6), 52-56.
13. Sutton, G. P., & Biblarz, O. (2016). Rocket propulsion elements. John Wiley & Sons.

14. Lash, E. L. (2015). Trajectory analysis and comparison of a linear aerospike nozzle to a conventional bell nozzle for SSTO flight.
15. Tomita, T., Takahashi, M., and Sasaki, M., Control of Transition Between Two Working Modes of a Dual-Bell Nozzle by Gas Injection, AIAA Paper 2009-4952, 2009, <https://doi.org/10.2514/6.2009-4952>.
16. Tomita, T., Takahashi, M., and Sasaki, M., Investigation on Characteristics of Conventional-Nozzle-Based Altitude Compensating Nozzles by Cold-Flow Tests (II). Side-Load Characteristics During Transition, AIAA Paper 2007-5472, July 2007, <https://doi.org/10.2514/6.2007-5472>
17. Nasuti, F., Onofri, M., and Martelli, E., Role of Wall Shape on the Transition in Axisymmetric Dual-Bell Nozzles, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 21, No. 2, 2005, pp. 243-250, <https://doi.org/10.2514/1.6524>.
18. Ferri, A., Elements of Aerodynamics of Supersonic Flows (The MacMillan Co., New York, 1949), p. 27
19. Connors, J. F., Cubbison, R. W., and Mitchell, G. A., "Annular internal-external-expansion rocket nozzles for large booster applications," NASA TN D-1049 (1961)
20. Greer, H., "Rapid method for plug nozzles design," ARS J.31, 560-561 (1961)
21. John D. Anderson, Jr., *Fundamentals of Aerodynamics*, 2<sup>nd</sup> ed., Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1988.
22. John D. Anderson, Jr., *Modern Compressible Flow. With Historical Perspective*, 2nd ed., Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1982
23. Hill. P. G. and Peterson C.R., *Mechanical and Thermodynamics of Propulsion*, Addition-Wesley Publishing Company Inc., New York, 1965.
24. Shapiro, A. H., *Compressible Fluid Flow*, Vol. 1, New York, the Ronald Press, 1953
25. Zucrow, M.J. and J.D. Hoffman, *Gas dynamics. Volume 2- multidimensional flow*. New York, 1977.
26. Carnahan, B., *Applied numerical methods*. 1969.
27. Conte, S.D. and C. De Boor, *Elementary numerical analysis: an algorithmic approach* 2017: SIAM.

- 28.** Hoffman, J.D., Accuracy studies of the numerical method of characteristics for axisymmetric, steady supersonic flows. *Journal of Computational Physics*, 1973. 11(2): p. 210-239.
- 29.** Dr GHOLAMRZA KEFAYTI, Dr HESSAN SEJJADI. *Computational Fluid dynamics Applications*, August 2023.
- 30.** ALLOUI ZINDDINE. *Utilisation Des logiciels en CFD*.
- 31.** THABIT HASSAN THABIT, SENAN THABET. *International Journal of Research and Engineering: Vol.5 No.6 June 2018*.
- 32.** ABOUROUB SANAA, MIDOUNE ZAHIRA. *Simulation des Ecoulement dans la Tuyère Double Galbe à base d'une tuyère MLN. Mémoire de Master. Institut d'aéronautique et des Etudes Spatiales. Université SAAD DAHKEB Blida 2021*
- 33.** NESSER ASHGRIZ and JAVAD MOSTAGHANMI. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics Chapter 20 in Fluid Flow. Department of Mechanical and Industrial Engineering. University of Toronto*
- 34.** NICOLAS BERTIER. *Introduction aux Différences Finis. UF« Modélisation et Calcul Scientifique » Formation ModIA « Modélisation Et Intelligence Artificielle » Institut National des Sciences Appliquées*
- 35.** Cours CFD, 2020/2021 [Semestre 1] *Faculté des sciences et de la Technologie, Département de Génie Mécanique, Master 2, Energétique Université MOHAMED KHIDER, Biskra*
- 36.** MARSHALL BERN, PAUL PLASSMAN. *Handbook of Computational Geometry .2000*.
- 37.** KBAB HAKIM. *Conception et Evolution Des Paramètres d'Écoulement dans les Tuyères Doubles Galbes. These de Doctorat 2017*.
- 38.** BENSSAAD MALIKA, FOUCHANE, BOUAROUR HAKIM, BOUDJEMA KAISSA. *Etude et simulation d'un écoulement compressible dans une tuyère de Laval Mémoire Master université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU. 2021*
- 39.** YANN MARCHESSE. *Modélisation de la Turbulence 17Février 2023*
- 40.** MOSTAFA SAFADARI SHADLOO. *Numerical Simulation of Turbulent Flow .2020. Institut National des Sciences Appliqués. ROUEN NORMANDI*.

**41.** CHARLES HIRSCH, Numerical Computation of Eternal and External Flows, John Wiley and sons 1994.



