

MINISTERE AUX UNIVERSITES

Ecole Nationale Polytechnique
d'ALGER

Département de Génie
Mécanique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

وزارة للجامعات
مدرسة متعددة التقنيات بالجزائر
دائرة الهندسة الميكانيكية

THESE

de Magister

en Energétique

THEME

Conception technique d'une soufflerie à choc
et étude de l'écoulement visqueux à hautes
températures dans les tuyères supersoniques

Présentée par : A. LABASSI

Soutenue devant le Jury :

Président : Mr S. RECHAK , Professeur (ENP)
Examineurs : Mr B. BENKOUSSAS , C.C. (ENP)
Mr S. LARBI , Docteur (ENP)
Mr L. BAHI , Professeur (U. de Constantine)
Rapporteur : Mr A. GAHMOUSSE , Professeur (ENP)

MINISTERE AUX UNIVERSITES

Ecole Nationale Polytechnique
d'ALGER

Département de Génie
Mécanique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

وزارة للجامعات
مدرسة متعددة التقنيات بالجزائر
دائرة الهندسة الميكانيكية

THESE

de Magister

en Energétique

THEME

Conception technique d'une soufflerie à choc
et étude de l'écoulement visqueux à hautes
températures dans les tuyères supersoniques

Présentée par : A. LABASSI

Soutenue devant le Jury :

Président : Mr S. RECHAK , Professeur (ENP)
Examineurs : Mr B. BENKOUSSAS , C.C. (ENP)
Mr S. LARBI , Docteur (ENP)
Mr L. BAHI , Professeur (U. de Constantine)
Rapporteur : Mr A. GAHMUSSE , Professeur (ENP)

ECOLE NATIONNALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie-Mécanique

Thèse de Magister en Energétique

Présentée par : Mr. A. LABASSI

Directeur de thèse : Pr...A. GAHMOUSSE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

ملخص:

تتناول هذه الأطروحة إنجاز تصميم تقني لكل عناصر أنبوب صدمات فوق صوتي قصد تصنيعه مستقبلا، وإعداد قائمة وافية لكل الأجهزة والمعدات الضرورية. بعد ذلك أسهمنا في تصميم دراسة الإنسياب داخل الناشر الفوق صوتي المكون لأنبوب الصدمات عند درجات الحرارة العالية مع إهتمام خاص لتأثير اللزوجة ومقارنة مع النتائج التجريبية.

RESUME :

Dans cette présente thèse, on a fait une conception technique complète de la soufflerie à choc en vue de sa réalisation, ainsi que le choix et la spécification de tout l'appareillage et l'instrumentation nécessaires. Et dans un deuxième temps, on a contribué à généraliser l'étude de l'écoulement dans les tuyères supersoniques à hautes températures afin de dimensionner celles des souffleries à choc, avec un intérêt particulier concernant les effets de la viscosité à hautes températures appuyé par des résultats expérimentaux à titre comparatif.

ABSTRACT :

The objects of this work consists on a technical conception of a wind tunnel in order to carry it out with specification of its entire necessary devices. A second part is a contribution to generalize a flow studie in supersonic nozzels with particular bent of viscosity effects at high tempertures and a comparaison with experimental works.

Chapitre 5

RESULTATS RELATIFS AU QUATRIEME CHAPITRE

5-1. Caractéristiques géométriques	58
5-2. Caractéristiques themodynamiques	59
5-3. Conclusion	60

Chapitre 6

**ETUDE DE L'ECOULEMENT REEL DANS UNE TUYERE
SUPERSONIQUE A HAUTES TEMPERATURES**

6-1. Introduction	74
6-2. Hypothèses	74
6-3. Equations de bases de la couche limite laminaire	77
6-4. Modification des équations de quantité de mouvement et d'énergie	77
6-5. Méthode de calcul de la couche limite dans le divergent d'une tuyère supersonique avec effet de la haute température	79
6-6. Conditions aux limites	84
6-7. Résolution	85
6-8. Considérations sur l'axisymétrie de l'écoulement	87
6-9. Conclusion	89

Chapitre 7

RESULTATS RELATIFS AU SIXIEME CHAPITRE

7-1. Variations des épaisseurs caractéristiques δ' et δ_1 de la couche limite laminaire	90
7-2. Variations du rapports T_p/T_e avec la température	91
7-3. Comparaison avec des résultats expérimentaux	91

Chapitre 8

PROGRAMMATION

8-1. Intéret du programme	97
8-2. Présentation du programme	97

8-3. Liste des sous-programmes	98
8-4. Organigramme	99
8-5. Notations du programme	104
8-6. Utilisation du programme	105
Conclusion	108
Références	110
Annexe A : Calcul de résistance et dimensionnement des principaux éléments de la soufflerie à choc ...	112
Annexe B : Résultats relatifs à l'étude de l'écoulement parfait et de l'écoulement réel de l'air dans les divergents des tuyères supersoniques pour différents nombres de Mach (de 1,5 à 6) et pour différentes températures (1000, 2000 et 3000 °K)	123

LISTE DES PLANCHES

- 1- Schéma de l'installation de la soufflerie à choc
- 2- Bloc-support en vé du tube à choc
- 3- Palier de la vis de réglage
- 4- Vis de réglage
- 5- Poutre-support glissière du bloc en vé
- 6- Partie du bloc en vé
- 7- Système de translation du tube moteur
- 8- Butée
- 9- Arbre de guidage
- 10- Porte douille à billes
- 11- Support réglable
- 12- Plaquette de fixation
- 13- Support non réglable
- 14- Bride du tube moteur
- 15- Section du double diaphragme
- 16- Système anti-choc
- 17- Bride du tube de travail
- 18- Partie du bloc en vé réduit
- 19- Section des tests
- 20- Couvercle de la section des tests
- 21- Système convergent-divergent
- 22- Couvercle
- 23- Manette de serrage
- 24- Cône intermédiaire
- 25- Bride côté convergent-divergent
- 26- Convergent-divergent
- 27- Bride du convergent-divergent
- 28- Extrémité du tube de la section des tests
- 29- Vérin
- 30- Plaque de fixation à la poutre en I
- 31- Manette
- 32- Vis
- 33- Ecrou
- 34- Socle
- 35- Plaquette de fixation au sol
- 36- Divergent
- 37- Section des tests finale
- 38- Réservoir
- 39- Système de rupture des diaphragmes à basse pression

LISTE DES SYMBOLES

a_1, b_1, c_1	: coefficients de $C_p(T)$
a_2, b_2, c_2	: coefficients de $\gamma(T)$
a_3, b_3, c_3	: coefficients de $Pr(T)$
a (m/s)	: vitesse du son
C_p (J/kg.°K)	: chaleur spécifique à pression constante
C_v (J/kg.°K)	: chaleur spécifique à volume constant
C_s (N.m)	: couple de serrage
d, D (mm)	: diamètres
e (mm)	: épaisseur
E (N/mm ²)	: module de Young
$F_1, F_2, F_3, F_4, F(T)$: fonctions
f (mm)	: flèche
h (J/kg)	: enthalpie
I (mm ⁴)	: moment quadratique
I_1	: nombre total de réflexions du col au point de déviation maximale
I_2	: nombre total de réflexion
i	: ligne d'une matrice
j	: colonne d'une matrice
k (adimensionnel)	: exposant polytropique
K (adimensionnel)	: facteur de forme
l, L (mm)	: longueurs
M (adimensionnel)	: nombre de Mach
N_r	: nombre de réflexions d'une ligne caractéristique
N	: nombre de lignes caractéristiques issues du col
P (Pa)	: pression statique
P_o (Pa)	: pression génératrice
P_m (Pa)	: pression dans le tube moteur
P_i (Pa)	: pression dans la section du double diaphragme
Pr	: nombre de Prandtl
Q (N)	: charge concentrée
q (N/mm)	: charge uniformément répartie
r, R (mm)	: rayons
Re (adimensionnel)	: nombre de Reynolds

r (J/kg.°K)	: constante du gaz
S (mm ²)	: section
s	: coefficient de sécurité
T (°K)	: température statique
T_0 (°K)	: température génératrice
T_e (°K)	: température d'entrée (au col)
T_s (°K)	: température à la section de sortie
T_p (°K)	: température à la paroi
u (m/s)	: vitesse axiale
U_e (m/s)	: vitesse de l'écoulement libre
U_∞ (m/s)	: vitesse à la section de sortie
v (m/s)	: vitesse radiale
V (m/s)	: vitesse
x (mm)	: abscisse
y (mm)	: ordonnée
α (s/m ²)	: diffusivité thermique
$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6$: constantes
β (rad)	: angle de Mach
$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_6$: constantes
δ (mm)	: épaisseur de la couche limite
δ_1 (mm)	: épaisseur de décalcement
δ_2 (mm)	: épaisseur de quantité de mouvement
δ_3 (mm)	: épaisseur de l'énergie
δ_H (mm)	: épaisseur d'enthalpie
δ_u (mm)	: épaisseur de vitesse
γ (adimensionnel)	: rapport des chaleurs spécifiques
η, ξ	: lignes caractéristiques
λ (adimensionnel)	: facteur de forme
μ (Kg/m.s)	: viscosité dynamique
ν (M)	: fonction de Prandtl-Meyer
ν_e (m ² /s)	: viscosité cinématique
θ (rad)	: angle de déviation du vecteur vitesse par rapport à l'axe de la tuyère
ρ (kg/m ³)	: masse volumique
σ (N/mm ²)	: contrainte normale
σ_e (N/mm ²)	: limite élastique
σ_p (N/mm ²)	: contrainte pratique
τ (N/mm ²)	: contrainte de cisaillement
τ_p (N/mm ²)	: contrainte de cisaillement à la paroi
τ_{pd} (N/mm ²)	: contrainte pratique au glissement

indices

- c : état critique
- e : à l'entrée, écoulement libre, extérieur
- ef : effectif
- i : intérieur
- max,m: valeurs maximales
- o : état générateur
- p : à la paroi , pratique
- s : à la section de sortie
- ∞ : à l'infini

Le développement de la recherche scientifique dans le domaine de l'aérodynamique expérimentale, a suscité depuis longtemps l'utilisation de moyens expérimentaux de plus en plus performants pour répondre aux besoins des industries spatiales, aéronautique et ballistique, en matière d'informations scientifiques, que seules les souffleries à choc permettent de satisfaire à l'instar des souffleries conventionnelles classiques.

Les souffleries à choc se composent essentiellement de tubes à choc qui sont des dispositifs expérimentaux permettant la génération d'ondes de choc planes induisant des écoulements de très courtes durées, nécessaires à l'étude d'aspects très variés de l'état des gaz telle que la dynamique, la physique et la chimie des gaz. Pour se faire, on dispose de nombreuses variantes de tubes à choc tel que le tube à choc à un seul ou plusieurs diaphragmes à section constante ou variable, de configuration cylindrique ou carrée, le tube à choc avec piston mobile ou le tube à choc par détonation. Il existe encore plusieurs autres variantes qui sont adaptées aux applications spécifiques et parfois très spéciales tel que le tambour de tubes à choc utilisé pour l'alimentation d'une soufflerie hypersonique, ou encore celui utilisé pour la simulation de l'onde de choc de la bombe atomique [2]. Il est à noter aussi, que l'intensité de l'onde de choc peut varier entre celle du bang engendré au sol par un avion supersonique, et celle résultant d'une explosion nucléaire dans une galerie souterraine.

Cette présente thèse s'insère dans une série de projets et thèses réalisés à l'école nationale polytechnique en vue de la réalisation d'une soufflerie supersonique à choc moderne et performante, répondant à la prérogative de promouvoir la recherche appliquée dans de nombreux domaines de la science.

Après le dimensionnement des principaux éléments de la soufflerie, en l'occurrence le tube à choc [6] et la tuyère

supersoniques [7], il ne restait plus que sa conception technique avant sa réalisation définitive, qui sera l'objectif principal de cette présente thèse, celle-ci se compose essentiellement des deux grands axes suivants : la conception technique de la soufflerie à choc et l'étude de l'écoulement dans une tuyère supersonique en tenant compte de l'effet de la température en vue de l'amélioration d'un logiciel de conception de tuyères supersoniques [7]. Ces deux sujets d'étude seront répartis selon huit chapitres :

- Le premier chapitre est un exposé général sur les tubes à choc des points de vue principe, évolution et applications.
- Le deuxième chapitre est une description technique, plus ou moins détaillée des différents composants de la soufflerie à choc appuyée par des plans.
- Dans le troisième chapitre on relatera brièvement la nomenclature de l'appareillage et de l'instrumentation nécessaire .
- Le quatrième chapitre a pour objet l'étude de l'écoulement parfait dans une tuyère supersonique, avec effet de température sur les constantes calorifiques du gaz considéré, qui aboutira par la suite à l'élaboration d'un nouveau programme de conception .
- Dans le cinquième chapitre on présentera les principaux résultats relatifs au quatrième chapitre.
- Quant au sixième chapitre, il traitera de l'effet de la viscosité de la paroi de la tuyère sur l'écoulement (étude de la couche limite), en tenant compte toujours de l'effet de la température sur les constantes thermophysiques du gaz, et aussi en introduisant ici l'effet de l'axisymétrie de l'écoulement .
- Dans le septième chapitre on présentera les principaux résultats relatifs au sixième chapitre.
- Dans le huitième chapitre, on exposera en détail la structure du programme de conception des tuyères supersoniques, avec effet de température et de viscosité, ainsi que la manière de son exploitation .

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES SOUFFLERIES ET TUBES A CHOC

1-1. Principe du tube à choc

Dans sa conception la plus simplifiée, le tube à choc est constitué de deux tubes, l'un court dit "tube moteur" contenant un gaz à haute pression et l'autre relativement long dit "tube de travail" contenant un gaz à très basse pression. Ces tubes sont initialement séparés par une membrane dite "diaphragme" et fermés à leurs extrémités respectives (figure 1). Dans le cas d'une soufflerie, on munit le tube de travail d'une tuyère convergente-divergente.

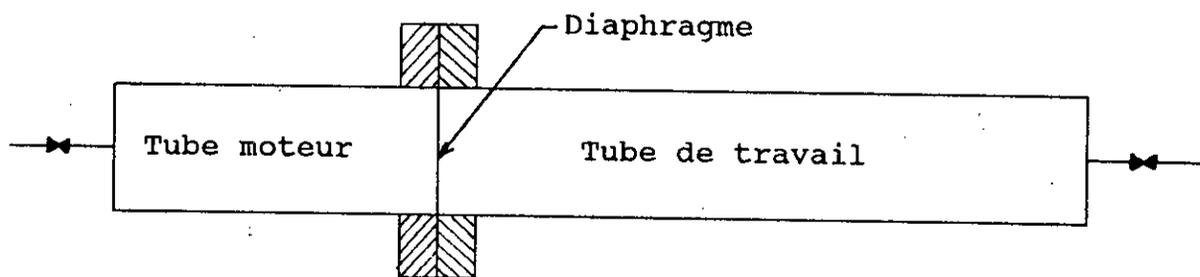


Fig. 1-1 : Principe du tube à choc .

L'éclatement brusque de la membrane génère un écoulement de très courte durée de l'ordre de quelques millisecondes contenant des ondes d'amplitudes finies séparées par des régions quasi-stationnaires. celles-ci se raidissent et coalèscnt pour ne former qu'un seul front d'ondes communément appelé "onde de choc" à travers laquelle existent de larges

gradients de pressions, de masses volumiques et de températures. cette onde de choc traverse le gaz de travail (gaz à basse pression contenu dans le tube de travail), tandis que et simultanément une onde de détente traverse le gaz moteur (gaz à haute pression contenu dans le tube moteur) sous forme d'éventail d'expansion qui est caractérisé par la chute de pression, de masse volumique et de température bien au-dessous des conditions initiales. Les régions d'écoulements quasi-stationnaires induites derrière ces ondes sont séparées par des surfaces de contacts qui à travers lesquelles la pression et la vitesse restent constantes, par contre la masse volumique et la température varient généralement. Le réchauffement causé par la compression du gaz de travail et le refroidissement causé par la détente du gaz moteur permet de produire une large gamme d'écoulements à différentes températures, d'où découlent les importantes applications du tube à choc couvrant l'étude des gaz sous des conditions extrêmes de températures [1],[2],[3],[4].

1-2. Evolution et applications des souffleries et tubes à choc

Depuis qu'on a reconnu au tube à choc son importance capitale dans différents domaines de la recherche scientifique, on n'a cessé de le développer et de le rendre de plus en plus performant surtout dans certains domaines bien spécifiques relevant de l'étude et de la vérification des lois de l'aérodynamique, se rapportant à l'étude des écoulements des gaz, notamment l'air chaud, autour des corps solides tels que les avions, les fusées et les missiles, ainsi que les profils d'ailes et d'aubages, et ce en vue de l'amélioration de leurs performances.

Au début de l'utilisation des tubes à choc, et ce vers le début des années quarante, sont apparues plusieurs publications qui se limitèrent essentiellement à l'étude et la mesure des phénomènes apparaissant dans les tubes à choc telles que la

réflexion, la diffraction et la réfraction des ondes de choc, et à quelques applications tel que l'étalonnage des capteurs de pression. Puis dès le début des années cinquante, on découvrit en même temps, et ce dans plusieurs instituts de recherche et universités les énormes autres possibilités qu'offrait l'utilisation des tubes à choc, telle que son utilisation comme soufflerie sub,trans ou supersonique et même hypersonique en munissant le tube à choc d'une tuyère, atteignant du coup des nombres de Mach et des températures inenvisageables jusqu'alors au moyen des souffleries conventionnelles afin de simuler les phénomènes apparaissant dans les conditions réelles de vol des différents engins, par exemple lors du retour des satellites, missiles ballistiques intercontinentaux et des sondes spatiales dans l'atmosphère terrestre, ou lors de leur entrée dans l'atmosphère d'autres planètes, ainsi que la possibilité d'étudier n'importe quel gaz sous des conditions extrêmes de températures, par exemple en l'échauffant jusqu'au point de le dissocier ou de l'ioniser. Le tube à choc trouva son utilisation aussi en chimie notamment dans l'étude de la relaxation et la cinétique chimique des réactions qui ne sont possibles d'aucune autre manière. Ces possibilités ont permis par la suite de procéder à de nombreuses expériences dans le domaine de la dynamique, de la physique et de la chimie de l'air chaud à des vitesses atteignant 11.2 Km/s, et ce dans la perspective de réaliser les programmes de vols spatiaux qui prirent par ce fait une sérieuse allure.

En général les applications des tubes à choc couvrent les domaines suivants où ils sont utilisés comme :

- souffleries sub,trans,supersoniques et hypersoniques notamment pour la reproduction et la simulation des conditions réelles d'écoulements autour des corps solides, et surtout dans le domaine de l'aérodynamique spatiale, là où l'aérodynamique hypersonique classique des gaz parfaits, peut à peine donner des indications sur les forces et les transferts mis en jeu [3], car les conditions thermodynamiques, la température et la

masse volumique, apparaissant dans l'onde de choc de tête sont extrêmes (températures très élevées et masses volumiques très faibles).

- en aérophysique pour étudier les phénomènes d'interaction d'ondes, de diffraction, les fronts de transition, les couches limites et les phénomènes rencontrés à hautes températures .

- dans la recherche en chimie où les tubes à choc offrent des avantages uniques pour l'étude des réactions chimiques à très hautes températures, dans la mesure où l'état thermodynamique d'un gaz peut varier très rapidement et de façon homogène, notamment en combustion où l'on étudie ses aspects physico-chimiques, telle que la détermination des vitesses de réactions et les températures d'auto-inflammation des différents combustibles gazeux. Ces applications s'étendent aussi à la cinétique chimique et à la détermination des énergies de dissociation .

- comme moyen d'étalonnage des instruments de mesure tels que les transducteurs de pression et de chaleur .

Avec ces intéressantes performances, on était amené dans beaucoup de domaines de la recherche scientifiques à utiliser les souffleries et les tubes à choc comme moyen expérimentaux de rechange en commençant par la physique et la chimie des gaz chauds et en s'étendant à des expériences nouvelles n'ayant jamais été réalisées jusqu'alors pour plusieurs contraintes d'ordre expérimentales que seul le tube à choc a permis de surmonter. Parmi ces performances, pour ne citer que celles se rapportant à l'étude des gaz chauds à titre indicatif, on cite:

- la haute température des gaz est réalisée de manière pratiquement homogène et dans un grand volume .

- l'échauffement et le refroidissement des gaz, s'effectue très rapidement et d'une manière bien définie .

- l'onde de choc constitue une zone de transition d'une épaisseur de l'ordre de quelques libres parcours moyens seulement séparant le gaz chaud du gaz froid .

- l'extrémité froide du tube de travail ne vient en contact

avec le gaz chaud que pendant une durée de l'ordre de la milliseconde.

- on peut effectuer des tests au choix, soit dans un gaz au repos ou en mouvement rapide .

- l'état du gaz peut être calculer d'une manière approchée à partir des conditions initiales [6], et d'une manière précise à partir de la vitesse de propagation de l'onde de choc qui peut être mesurée d'une manière facile et très précise [1],[4].

CONCEPTION DE LA SOUFFLERIE A CHOC

2-1. Introduction

Dans la perspective d'installer un laboratoire de gazodynamique à l'école nationale polytechnique, il était convenu d'abord de concevoir une soufflerie à choc sub-trans-supersonique et hypersonique pour étudier la dynamique des gaz et tout ce qui a trait aux écoulements autour des corps solides avec effets de gaz réels, qui sera nécessaire pour la simulation des phénomènes apparaissant dans les conditions réelles de vol des différents engins, et d'étudier les forces ainsi que les transferts mis en jeu; en s'étendant plus tard à des expériences dans les domaines de la physique et de la chimie des gaz .

2-2. Description conceptuelle sommaire de l'installation de la soufflerie à choc

La soufflerie à choc dont il est question (planche 1), est constituée d'un tube à choc tandem muni à son extrémité, côté tube de travail, d'une tuyère convergente-divergente qui débouche dans un réservoir. Cette structure sera soutenue par des supports et des mécanismes permettant, entre autres, le réglage rigoureux de la coaxialité .

Les dimensions du tube à choc ont été déterminées de manière à obtenir un temps d'essai optimal [2], et à supporter une pression maximale de 100 bars: le diamètre intérieur étant de

100 mm et la longueur est de 27.3 m qui sera répartie sur trois tronçons de 3 m de longueur et de trois autres de 6 m en acier inoxydable. Les plus courts seront réservés aux parties du tube à choc qui subiront des usinages spécifiques, tels que le tube moteur, le premier tronçon et le dernier (section des tests) du tube de travail (planches 1 et 19). Quant aux trois autres, ils constitueront sa partie intermédiaire et ne subiront pas d'usinages spécifiques hormis une rectification intérieure. En plus de ces tronçons, on prévoira un autre d'environ 30 cm de longueur qui constituera la section du double diaphragme (tronçon compris entre le tube moteur et le tube de travail, planche 15).

Le tube à choc est soutenu par des blocs-supports en forme de vé (planche 2), nécessaire aussi au réglage de la coaxialité des différents tronçons qui le constituent lors de leur assemblage. Tous ces blocs-supports sont identiques à l'exception de deux blocs réduits en hauteur qui supporteront le tube moteur, chacun d'eux sera posé sur un système amovible permettant de déplacer le tube moteur lors du montage et du démontage des diaphragmes et de leur système de rupture à basse pression .

Le système de guidage du tube moteur, ainsi que les blocs-support en vé, sont soudés à leurs bases sur les semelles d'une poutre profilée IPN 400 dite aussi poutre principale ou encore poutre en I, de longueur avoisinant les 27.5 m. Elle est disposée longitudinalement par rapport au sol, duquel elle sera maintenue à une hauteur de 80 cm par des vérins mécaniques (planche 29) qui sont soudés sur la face inférieure de l'âme de celle-ci. Ces vérins sont suffisamment distants pour que la flèche ne dépasse pas 10 μ m. La hauteur de l'axe du tube à choc se trouve alors maintenue à 1.25 m du sol, permettant ainsi du point de vue ergonomique de manipuler confortablement. De plus, pour assurer une bonne stabilité de la structure, on dispose au niveau de chaque vérin de traverses, qui sont des poutres profilées UPN 100 nécessaires pour éviter le roulis de la

poutre principale (mouvement d'oscillation autour de la fibre moyenne). Elles seront soudées par couples interposés sur les semelles de celle-ci, et fixées au sol par goujons. D'autres parts pour éviter le phénomène de recul dû à l'onde de choc, on disposera de trois couples de poutres profilées UPN 120 dites poutres supports longitudinales soudées sur la face inférieure de l'âme de la poutre principale (planche 1) selon trois positions: au niveau de chaque extrémité du tube à choc et au niveau du système anti-choc, elles seront fixées au sol au moyen de goujons .

La deuxième partie de l'installation est constituée du système convergent-divergent et du réservoir (planches 1 et 21), elle sera fonctionnelle en régimes hautement supersonique et surtout hypersonique. Sa caractéristique principale est l'interchangeabilité du col de la tuyère, qui permettra d'effectuer des essais dans une large gamme de nombres de Mach. La zone des essais (ou section des test côté tuyère) est située entre le divergent et le réservoir (planches 1 et 37) ce dernier servira entre autres de support pour la tuyère .

L'installation est reliée à une station de compression comprenant un compresseur, une pompe à vide et un tableau de commande et de contrôle [8]. L'instrumentation sera composée :

- d'un ordinateur muni d'une table traçante, d'un lecteur de disquettes et d'un disque dur .
- d'un oscilloscope à mémoire avec quatre voies .
- d'un amplificateur de signaux multivoies .
- d'un compteur de vitesses binaire .
- de jauges piézoélectriques .
- de jauges de chaleur .
- d'une pompe à vide .
- d'une pompe classique à gaz .
- d'une unité de compression .
- de manomètres à aiguilles BP, MP et HP à tubes à mercure (au nombre de deux) et à alcool (deux aussi) .

- d'un cylindre et piston à air comprimé, d'un diamètre maximal de 10 mm .
- de six vannes à commande électrique (solénoïdes) .
- de six vannes à sens uniques .
- d'environ 100 m de tuyauterie légère HP en acier inoxydable.

2-3. Le tube à choc

Le tube à choc forme la première partie de la soufflerie à choc, et peut être utilisé indépendamment de la tuyère. Il est du type dit "à tandem" ou communément appelé "à double diaphragme", de configuration annulaire constante sur une longueur d'environ 27.3 m, d'un diamètre intérieur $d_i = 100$ mm et d'épaisseur $e = 12.5$ mm. Ces dimensions vérifient amplement la condition de résistance applicable aux tubes à parois épaisses [19]:

$$e \geq \frac{d_i}{2} \cdot \left[\sqrt{\frac{\sigma_p}{\sigma_p - 2 \cdot P_i}} - 1 \right] \quad (2-1)$$

Où : - P_i est la pression maximale d'utilisation du tube estimée à 100 bars .

- $\sigma_p = \frac{\sigma_e}{s}$: représente la résistance pratique à l'extention, où s est le coefficient de sécurité pris égal à 3, et $\sigma_e = 195 \text{ N/mm}^2$ représente la limite élastique du matériau du tube qui est de l'acier inoxydable de désignation : Z6 CN18-06 (selon la norme NF A 35-574). Il est à noter que le choix de ce matériau a été fait dans le but de minimiser l'épaisseur du tube et surtout pour éviter la corrosion de la surface intérieure du tube en contact avec l'écoulement toutefois en s'assurant que, outre le critère de résistance, les critères de soudabilité et d'usinabilité soient favorables, tel est le cas pour cette désignation .

Le tube à choc est constitué de plusieurs tronçons de tubes, assemblés au moyen de brides soudées à chaque bout de tronçon, liées par des vis ou par goujons de classes 8.8 ou 10.9 et de même diamètre nominal égale à 24 mm calculé à la traction pour une pression de 100 bars avec un coefficient de sécurité de 3 .

Du point de vue fonctionnel, le tube à choc est constitué de trois parties distinctes (planche 1) : le tube moteur, la section du double diaphragme et le tube de travail .

2-3-1. Le tube moteur

c'est le premier organe du tube à choc qui contient initialement le gaz à haute pression avant la rupture des diaphragmes, la pression qui y règne peut atteindre une valeur maximale de 100 bars. Ce tube est constitué d'un seul tronçon d'une longueur de 3 m fermé à l'une de ses extrémités par un couvercle (planche 22) monté sur une bride soudée en bout de tube. Cette bride comporte cinq perçages taraudés débouchant à l'intérieur du tube moteur à travers cinq orifices correspondant percés sur sa paroi, ils permettront la jonction avec la station de compression, de pompage et de contrôle. L'étanchéité à ce niveau du tube moteur est assurée grâce à un joint torique inséré entre le couvercle et la bride .

L'autre extrémité du tube moteur est en liaison directe avec le tube de la section du double diaphragme par l'intermédiaire de deux brides soudées à leurs bouts. Elles sont conçues de manière à réaliser le centrage, de porter des joints toriques pour l'étanchéité et de porter aussi le premier diaphragme (planche 15). Ces brides sont assemblées par six goujons de même diamètre de 24 mm qui, à l'instar des vis, faciliteront beaucoup les opérations de montage et de démontage des diaphragmes prévues à ce niveau .

Le tube moteur est soutenu par deux blocs-support en vé réduits posés chacun sur un système amovible, permettant de déplacer le tube moteur (planches 1, 2 et 7) quand cela est nécessaire .

2-3-2. Section du double diaphragme

C'est un tronçon de tube d'une longueur de 30 cm séparant le tube moteur du tube de travail au moyen de deux diaphragmes situés à ses deux extrémités respectives. la paroi interne du tube doit subir une rectification et un revêtement de surface (chromage) convenables pour minimiser les effets de la viscosité de la paroi et les réflexions d'ondes .

La section du double diaphragme est liée avec le tube moteur et le tube de travail au moyen de deux brides soudées à chaque extrémité de la section. Elles sont conçues de manière à porter des joints toriques pour l'étanchéité, à réaliser le centrage et l'alignement de l'axe, toutefois avec une tolérance de 10 à 15 μm . L'assemblage de ces brides est réalisé au moyen de goujons, compte tenu des démontages fréquents prévus à ce niveau comme il l'a été mentionné précédemment .

Du point de vue conceptuel, ces deux brides diffèrent uniquement par le fait que celle située du côté du tube moteur comporte en plus quatre perçages taraudés, recevant des valves solénoïdes.

2-3-3. Les diaphragmes

Les diaphragmes (ou membranes) sont des plaques circulaires minces délimitant le tube moteur où règne une haute pression de 10 MPa, et le tube de travail où règne une très basse pression d'environ 1 Pa. En abaissant la pression dans la section du

double diaphragme jusqu'à environ 5 Pa, et suite à cette différence de pression les diaphragmes éclateront successivement en s'ouvrant en forme de pétales, cette configuration est due à deux sillons diamétraux usinés sur la face de chaque diaphragme .

L'épaisseur d'un diaphragme dépend essentiellement de son matériau, elle est déterminée pour que le diaphragme se rompe pour une différence de pression (ou pression effective) au voisinage de la pression du gaz moteur, tel que [1] :

$$e = \frac{P_{ef} \cdot d}{4 \cdot \sigma_e} \quad (2-2)$$

où: - P_{ef} est la pression effective telle que: $P_{ef} = P_m - P_o$ avec P_m pression du gaz moteur et P_o , pression dans la section du double diaphragme .

- σ_e est la limite élastique à la traction du matériau du diaphragme.

Cette relation permet de trouver un ordre de grandeur de l'épaisseur du diaphragme. Il nous incombera par la suite, une fois l'installation mise en marche, de procéder à des essais permettant d'établir une relation empirique ou de courbes des données pour une détermination optimale des épaisseurs des diaphragmes pour différentes pressions et pour divers matériaux. A ce propos on distingue deux catégories de diaphragmes : les diaphragmes métalliques et les diaphragmes non métalliques. Ces derniers sont très variés et peuvent être utilisés dans une gamme de pressions allant de 0.1 à 15 bars. Dans notre étude on utilisera surtout le cellophane et l'acétate de cellulose. Mais le risque que présente ces diaphragmes en se fragmentant en petit morceaux lors de leur rupture, constitue un sérieux inconvénient dans la mesure où ils perturbent l'écoulement. Par contre les diaphragmes métalliques, de par leurs bonnes caractéristiques de rupture en s'ouvrant en pétales, permettent de remédier à cela. Malheureusement ce n'est pas toujours le cas, et en se fragmentant, non seulement ils perturbent l'écoulement mais

aussi ils risquent d'endommager les instruments de mesure et les maquettes. Les matériaux employés dans cette catégorie sont très variés, les plus utilisés sont les aciers (ordinaires et inoxydables), le cuivre, l'aluminium et le nickel .

2-3-4. Le tube de travail

C'est la partie opérationnelle du tube à choc, où règne une très basse pression d'environ 1 Pa avant la rupture des diaphragmes. Ce tube de travail, comme il l'a été mentionné auparavant, est de section annulaire constante d'un diamètre intérieur de 100 mm et de 12.5 mm d'épaisseur. Sa longueur est de 24 m composée (planche 1) de deux tronçons de 3 m situés aux extrémités insérant trois autres de 6 m. Tous ces tronçons doivent subir une rectification intérieure de manière à ajuster leurs diamètres intérieurs dans un intervalle de tolérance de 10 à 15 μm et d'améliorer convenablement l'état de surface pour assurer la continuité de l'écoulement et pour minimiser les réflexions d'ondes sur les aspérités de la paroi, à ce propos, un revêtement de surface (chrômage) est très recommandé .

L'assemblage des tronçons du tube de travail est réalisé au moyen de brides (planche 17) soudées à chaque bout par des boulons de 24 mm de diamètre. L'étanchéité est assurée grâce à des joints toriques. La section d'entrée du premier tronçon du tube de travail présente un arrondi (planche 15-1) qui permettra le rabattement des pétales du second diaphragme pour éviter son cisaillement à sa périphérie de manière à ne pas gêner l'écoulement. A ce même niveau on a prévu aussi deux perçages taraudés débouchant dans le tube de travail à travers la première bride, ils permettront la jonction avec la pompe à vide et la station de compression. Le dernier tronçon du tube de travail constitue la section des tests; elle est conçue pour recevoir plusieurs prises de mesure (planche 19). Son extrémité est fermée par un couvercle (dans le cas où l'on utilise

seulement le tube à choc sans la tuyère), celui-ci est monté sur la dernière bride et porte un trou taraudé pour recevoir des maquettes ou d'éventuels instruments de mesure .

2-4. Les systèmes annexes

2-4-1. Les blocs-support en vé

Les blocs-support en vé (planche 1) permettent non seulement de supporter le tube à choc, mais aussi de régler sa coaxialité en compensant la flèche de la poutre-support principale et celle du tube à choc, ainsi que les défauts de formes de ses tronçons, en positionnant l'axe du tube à choc dans n'importe quelle position suivant une circonférence de 10 mm de diamètre et à une hauteur convenable. Chaque bloc-support en vé est constitué essentiellement de deux appuis (planche 6) formant les parties droite et gauche du vé, ceux-ci se déplacent indépendamment l'une de l'autre sur une glissière commune (planche 5) soudée, à ses bords, sur les semelles de la poutre en I. Le déplacement de ces appuis s'effectue manuellement grâce à un système vis-écrou, qui sera bloqué par une vis de pression après réglage définitif de la position de l'axe du tube .

2-4-2. Système de guidage du tube moteur

Ce système (planche 7) comprend, outre un bloc-support en vé réduit, un dispositif qui permettra de déplacer le tube moteur sur une distance suffisante d'environ 40 cm et ce pour effectuer le remplacement des diaphragmes et la mise en place de leur système de rupture à basse pression. Le bloc-support en vé réduit est identique, de par sa conception, à celui décrit précédemment mis à part sa hauteur qui se trouve ici réduite à cause du système de déplacement se trouvant de part et d'autre au dessous de sa glissière .

Le guidage en translation du tube moteur s'effectue grâce à des douilles à billes fixées sous la glissière du vé, et coulissant sur des arbres en acier inoxydable d'une dureté HRC supérieure à 60, lesquels reposent sur des appuis qui permettent aussi le réglage du parallélisme (très préconisé dans ce genre de mécanismes) .

2-4-3. Le système anti-choc

Le système anti-choc est un dispositif (planches 1 et 16) constitué essentiellement d'une plaque en caoutchouc placée entre la bride du premier tronçon du tube de travail et un support métallique soudé sur la poutre en I. Il permettra d'amortir le phénomène de recul survenant au moment de la rupture des diaphragmes et lors de la réflexion des ondes de compression contre la paroi terminale du tube à choc .

2-4-4. Poutre-support principale

C'est une poutre profilée IPN 400, dite poutre en I, de 27.5 m de longueur, constituée de deux ou trois tronçons soudés bout à bout (planche 1); Cette poutre sert comme sa désignation l'indique, de base supportant les appuis du tube à choc (le système de guidage du tube moteur et les blocs-support en vé). Elle est donc disposée horizontalement, à une hauteur de 80 cm du sol reposant sur des vérins et immobilisée par des poutres-support transversales et longitudinales .

2-4-5. Les vérins.

Ce sont des vérins de type mécaniques (planches 1 et 29), servant d'appuis à la poutre en I, constitués essentiellement d'un système vis-écrou. Ces vérins sont conçus pour supporter

une charge minimale de 3 tonnes et pouvant être réglés à partir d'une hauteur minimale de 70 cm avec une course de 50 cm. Chaque vérin comprend une vis (planche 32) de 36 mm de diamètre, d'un socle (vérifié au flambage) supportant un écrou (planches 33 et 34), et de deux plaquettes de fixation (planches 30 et 35) .

2-4-6. Poutres-support transversales

Ce sont des poutres profilées UPN 100, de longueur unitaire 1.4 m. Elles sont disposées transversalement par rapport à la poutre en I (planche 1) et soudées par paires interposées de part et d'autre sur les semelles de celle-ci au niveau de chaque vérin. Chacune de ces traverses est inclinée de 45° par rapport au sol, où elles sont fixées aux moyen de goujons. Cette configuration permet d'éviter le roulis de la poutre en I et assure sa stabilité .

2-4-7. Poutres-support longitudinales

Ce sont des poutres profilées UPN 120 de longueur unitaire 1.5 m, prévues pour pallier au recul provoqué lors de la rupture des diaphragmes et au coup de bélier se produisant au moment où l'onde de choc vient percuter les deux extrémités respectives du tube à choc, et ce afin d'assurer la stabilité de la structure dans le sens longitudinal. Elle sont donc disposées longitudinalement par rapport à la poutre en I, et soudées sur la face inférieure de l'âme de celle-ci par paires interposées au niveau de la section du double diaphragme et à chaque extrémité de la poutre en I. Elles sont inclinées de 45° par rapport au sol, sur lequel elles sont fixées par des goujons .

2-5. Le système convergent-divergent

Le système convergent-divergent (planche 21) est en fait une tuyère qui sera placée à l'extrémité libre du tube de travail lors des essais en régimes hautement supersoniques et hypersoniques pour la simulation des écoulements à très hautes températures avec effets de gaz réels .

Ce système est constitué d'une pièce essentielle dite "col" (planche 26) qui comporte la section minimale de la tuyère. Ce col est interchangeable selon le nombre de mach escompté à la section de sortie de la tuyère, et ce grâce à un système vis-écrou. La réalisation du profil de la section du col se fera grâce au logiciel qui sera élaborer dans le quatrième chapitre. Ce système comporte aussi une pièce dite cône intermédiaire (planche 24) qui facilitera le montage et le démontage du col (planche 21), et d'un divergent relié à la section des tests finale par un couple de brides assemblées au moyen de vis (planches 36 et 37) .

La section des tests finale (côté tuyère) est un tube en acier inoxydable (planche 37) d'un diamètre intérieur de 600 mm, d'une épaisseur de 15 mm et de 600 mm de longueur, située entre le divergent et le réservoir. Cette section porte deux hublots identiques disposés face-à-face d'un même diamètre de 260 mm. Ils sont portés sur deux bossages soudés sur la paroi du tube et maintenus par des brides .

2-6. Le réservoir

Il est constitué (planches 1 et 38) d'un cylindre disposé verticalement d'un diamètre intérieur de 2.5 m, et de deux dômes soudés à leurs bases sur les extrémités du cylindre, le réservoir ainsi constitué, atteindra une hauteur de 3 m, et avec une épaisseur de 30 mm, il opérera dans une plage de pressions allant de 0 à 50 bars .

Ce réservoir comporte deux orifices, sur la coque du cylindre, disposés face-à-face et de même axe colinéaire avec celui de la soufflerie à choc. A leurs périphéries sont soudées deux brides dont l'une permettra l'assemblage du réservoir avec la soufflerie à choc et l'autre est prévue pour recevoir une porte d'accès (ou trou de visite). A l'intérieur du réservoir, du côté inférieur, une plate forme horizontale est soudée à la paroi du réservoir pour servir de base à un système porte-maquettes. De plus pour pallier à la corrosion de la surface interne du réservoir, un revêtement de surface adéquat est nécessaire.

2-7. système de rupture des diaphragmes à basses pressions

Ce système est constitué d'un système de fixation comprenant deux pattes de fixation qui s'appuient sur la paroi intérieure du tube à choc en manœuvrant une vis, et un système percuteur constitué d'une pointe coulissant dans un cylindre (planche 39).

NOMENCLATURE DE L'APPAREILLAGE ET DE L'INSTRUMENTATION

3-1. L'unité de compression et de pompage

L'unité de compression et de pompage comprend un compresseur et une pompe à vide qui seront connectés à la soufflerie à choc au niveau du tube moteur (planche 14) et du tube de travail (planche 15-1) d'une part, et d'autres parts à un tableau de commande et de contrôle.

3-1-1. Désignation du compresseur

En utilisant le programme élaboré dans [8], et d'après les conditions d'utilisation, on a fait le choix du compresseur comme suit :

- Type : compresseur à piston, moyenne pression, bi-étagé.
- Débit : $10 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Pression maximale : entre 150 et 220 bars.
- Puissance : 5 ch.
- Vitesse : 500 à 1000 tr/mn.
- Voltage : 220/380 volts.

3-1-2. Désignation de la pompe à vide

En utilisant le même programme que précédemment, et d'après les conditions d'utilisation de la pompe à vide, on a établi ses caractéristiques comme suit :

- Type : pompe rotative à palettes à un étage.
- Débit : $4,5 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Pression maximale : 1 Pa.
- Température du fluide : ambiante (20°C).
- Pertes de charge : négligeables.
- Taux de vapeur d'eau admissible à 30°C : 80 g/h.
- Vitesse de rotation nominale : 1500 tr/mn.
- Puissance du moteur : de l'ordre de 0,5 KW.
- Voltage : 220/380 volts.

La commande du compresseur et de la pompe à vide doit être accompagnée des accessoires de commande et de contrôle ainsi que de la tuyauterie et des raccords nécessaires selon la liste suivante :

- manomètres à aiguilles BP, MP et HP à tubes à mercure et à alcool (deux de chaque type).
- six vannes à commande électriques (solénoïdales).
- six vannes à sens unique.
- d'environ 100 m de tuyauterie légère HP en acier inoxydable.
- raccords et joints pour des diamètres nominaux de taraudages de 10 et 12 mm.

3-2. Instruments de mesure

Le temps des essais dans les souffleries à choc étant très court (de l'ordre de quelques centaines de microsecondes) nécessite des instruments de mesure spéciaux dont le temps de réponse ne dépasse pas la microseconde, et doivent être à l'épreuve des changements de températures et des accélérations.

3-2-1. Mesure de la pression

Pour la mesure des pressions, on utilise des jauges piézoélectriques à quartz avec amplificateur, à affichage déigital et dont le temps de réponse est de l'ordre de la microseconde pour les domaines des pressions suivants :

- très basses pressions (de 1 à 100 Pa).
- basses pressions (plusieurs centaines de Pascals).
- moyennes pressions (1 à 20 bars).
- hautes pressions (jusqu'à 100 bars).

3-2-2. Mesure de la masse volumique

Il existe plusieurs méthodes pour la mesure de la masse volumique d'un gaz dans les souffleries à choc, dont le principe est la dépendance qui existe entre l'indice de réfraction d'un gaz et sa masse volumique, ainsi en mesurant la réfraction d'un rayon lumineux (ou son angle de déflexion) on peut déterminer directement le gradient de la masse volumique d'un gaz par des relations mathématiques appropriées [1]. Parmi ces méthodes on cite: l'interférométrie, l'ombroscopie et la méthode de Toepler-Schliren [1],[3],[4]. Cette dernière est la plus utilisée et nécessite de se doter d'une caméra ultra-rapide, d'une source de lumière continue et de lentilles convergentes.

3-2-3. Mesure de la température et du flux de chaleur

Pour la mesure de la température, lorsque l'augmentation de celle-ci est insuffisante pour provoquer l'ionisation du gaz dans les ondes de choc modérées [1],[4], on utilise le thermocouple ou de préférence le thermomètre à fil mince de résistance de par sa simplicité et son efficacité par rapport au thermocouple qui s'avère de surcroit très fragile

(généralement dans les souffleries à choc, les thermocouples s'endommagent après à peine une ou deux expériences [1]). Le thermomètre à fil mince de résistance est un film de platine d'une très faible épaisseur peint sur un support isolant en verre, et sert de résistance qui est traversée par un courant constant de faible intensité, cette résistance sera reliée à un circuit de mesure de résistance tel que le pont de Wheatstone.

Pour mesurer les hautes températures atteintes dans les écoulements ionisés par les ondes de choc intenses, on peut utiliser le thermomètre à fil mince de résistance, cependant il faut enduire le film de platine d'une couche très faible (environ 800 Å) de dioxyde de silicium. Dans ce cas on peut aussi utiliser la méthode de spectroscopie des radiations émises [1],[3].

Les températures d'arrêts peuvent être mesurées au moyen de l'anémomètre à fil chaud [1] qui consiste en un très fin fil conducteur d'un diamètre d'environ 2,5 µm et d'une longueur de 2 mm, agissant comme une résistance thermométrique, qui sera reliée à un pont de Wheatstone. Quant à la mesure de la température statique, elle peut être faite à partir de la masse volumique (dont la relation de dépendance vis-à-vis de la température est connue) qui sera mesurée par l'une des méthodes optiques (voir 3-2-2).

Pour la mesure du flux de chaleur, on utilise les jauges thermiques à base de platine dont le principe est le même que celui du thermomètre à fil mince de résistance, cependant l'épaisseur du film est plus grande et ce pour mieux retenir la chaleur reçue durant le temps d'essai qui est très bref et qui nécessite des jauges thermiques dont le temps de réponse est de l'ordre de la microseconde.

3-2-4. Mesure de la vitesse de l'onde de choc

La vitesse de l'onde de choc peut être mesurée soit par une méthode optique telle que la méthode de Toepler-Schliren ou à l'aide de détecteurs de choc qui sont en fait des jauges piezoélectriques qui émettent des pulsations électriques au passage de l'onde de choc

3-3. Unité de traitement de données

Cette unité comporte :

- un amplificateur de signaux multivoies.
- un oscilloscope à mémoire à quatre voies.
- un micro-ordinateur équipé des périphériques suivants :
 - de six slots d'extention.
 - d'un lecteur de disquettes 3,5 pouces et 5,25 pouces.
 - d'un disque dur de capacité minimale de 80 mégaoctets et de 5 mégaoctets de mémoire centrale.
 - d'un écran couleur avec carte VGA.
 - d'une imprimante graphique (132 colonnes).
 - d'une table traçante (format A3).
 - d'un co-processeur arithmétique.
 - d'une souris pour graphisme.

CHAPITRE 4

ETUDE DE L'ÉCOULEMENT PARFAIT DANS LES TUYÈRES SUPERSONIQUES A HAUTES TEMPERATURES

4-1. Introduction

Comme on l'a mentionné auparavant, il existe à l'École Nationale Polytechnique, au département de génie mécanique, un programme expert pour le traçage de tuyères supersoniques [7] établi sur la base de l'hypothèse des gaz parfaits, qui ne tient nullement compte de l'effet de la température (pour un nombre de Mach de sortie fixé, on obtient le même profil pour n'importe quelle température). Ceci n'est donc qu'une approche du phénomène réel, car en principe, plus le gaz est chaud plus il requiera un espace plus grand pour se détendre afin d'atteindre le nombre de Mach escompté à la section de sortie. Cependant, compte tenu des applications spécifiques à très hautes températures (voir chapitre 1), ce programme peut être repris et amélioré avec des hypothèses se rapprochant encore plus de la réalité. Ainsi, dans ce chapitre, on reconsidèrera le problème avec une autre approche où le gaz à très hautes températures, n'est plus entièrement parfait (paragraphe 4-2), ceci conduira par la suite à faire une correction plus ou moins notable du profil des tuyères supersoniques selon le nombre de Mach de sortie, surtout au delà d'une température génératrice de 1000°K à partir de laquelle, la majorité des gaz voient leurs chaleurs spécifiques à pression et à volume constants varier considérablement avec la température [1,16].

4-2. Hypothèses

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

1- Le gaz est considéré comme étant thermiquement parfait, c'est à dire qu'il obéit à l'équation d'état des gaz parfaits:

$$P = \rho \cdot r \cdot T$$

ceci reste valable tant que le gaz n'atteint pas sa phase de dissociation [1] et que son facteur de compressibilité reste voisin de l'unité pour une pression réduite favorable [1,15], tel est le cas pour cette étude.

2- D'autres parts, le gaz est considéré comme étant calorifiquement imparfait [1], c'est à dire que ses propriétés calorifiques telles que C_p , γ et le nombre de Prandtl Pr sont considérées, comme variables dépendant uniquement de la température. Ceci est justifiable vu les variations importantes de ces propriétés avec la température (figures 4-1) surtout au delà de $1000^\circ K$ [12,16], domaine d'utilisation des souffleries à choc.

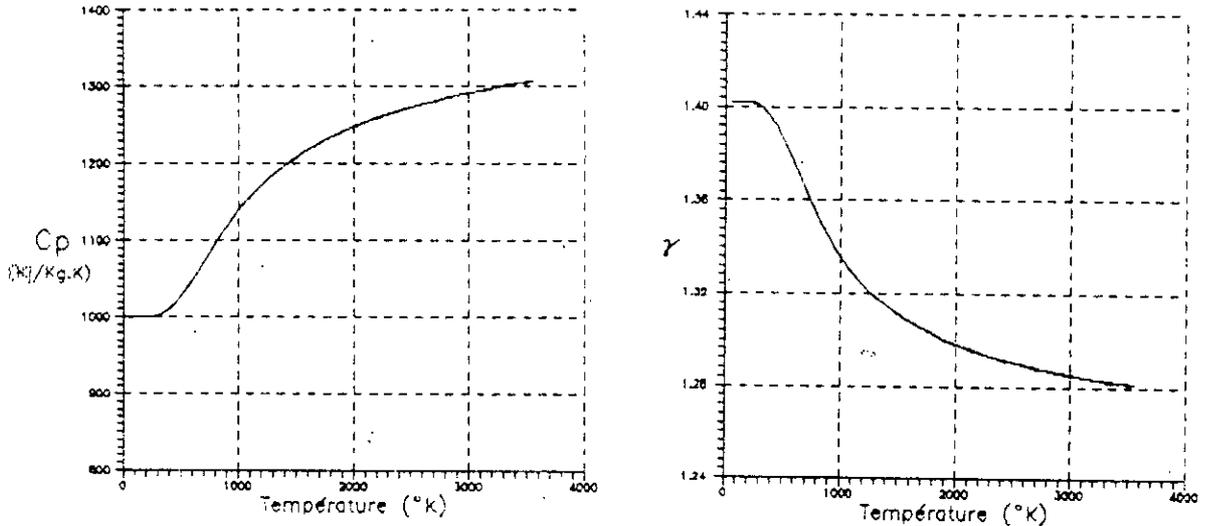


Fig.4-1: Variation de C_p et γ avec la température (d'après des données numériques pour l'air tirées de [12]).

A partir de ces graphes de variations de C_p et de γ , on peut déduire l'approximation suivante:

$$C_p(T) = a_1 + b_1 \cdot T + c_1 \cdot T^2 \quad (4-1)$$

$$\gamma(T) = a_2 + b_2 \cdot T + c_2 \cdot T^2 \quad (4-2)$$

où toutes les constantes a_1, b_1, \dots, c_2 figurant dans les relations précédentes, sont déterminées numériquement par la méthode des moindres carrés entre autres. A priori les constantes a_1 de γ et a_2 de C_p doivent être du même ordre de grandeur que les valeurs correspondant à ceux des gaz parfaits, quant aux autres constantes, elles sont indubitablement inférieures à l'unité.

3- L'écoulement est considéré comme étant entièrement établi et stationnaire (les dérivées par rapport au temps sont nulles), bidimensionnel (la vitesse V possède deux composantes u et v), polytropique (puisque le rapport des chaleurs spécifiques γ est

variable) et parfait c'est à dire qu'on négligera l'effet de la viscosité (dans une première étape).

4- On considère aussi que la distribution de la température est fonction de l'abscisse x seulement, et que sa variation selon le rayon de la tuyère est négligeable, ceci est justifiable du fait de l'homogénéisation de la température causée par la turbulence de l'écoulement dans le volume du divergent due à l'importance du nombre de Mach de l'écoulement et du fait du nombre de Reynolds.

4-3. Etude de l'écoulement dans une tuyère supersonique

Si on considère que l'écoulement dans une tuyère supersonique est unidimensionnel et isentropique, alors la seule variable géométrique qui intervient est le rapport des sections d'entrée et de sortie. Cependant en réalité, les écoulements dans les tuyères supersoniques sont loins d'être vraiment unidimensionnels, et le profil de la paroi est beaucoup plus grand. Une tuyère supersonique se compose de deux parties: le convergent dont le tracé n'est pas d'un grand effet, vu qu'il suffit que celui-ci soit d'un contour légèrement courbé pour qu'il fournisse un écoulement favorable sans détachement de la couche limite (gradient de pression favorable). La deuxième partie est le divergent, qui à l'instar du convergent, requiert une grande précision pour le tracé de son profil, afin d'obtenir un écoulement parallèle et uniforme à sa section de sortie, et ce dans le but d'éviter le décollement de l'écoulement, ou l'apparition d'ondes de choc qui engendreraient de sérieuses pertes de charge.

Soit alors un écoulement supersonique parallèle et uniforme entrant dans le divergent d'une tuyère, dans le but de décrire cet écoulement, considérant le schéma de la figure suivante:

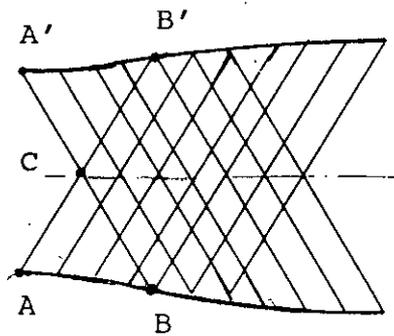


Fig. 4-2: Ecoulement dans le divergent d'une tuyère supersonique

Suite à la courbure de la paroi, il s'y établit un gradient de pression qui fait dévier les lignes de courant. Ainsi le fluide suivra la même courbure que celle de la paroi du divergent, et puisqu'on a négligé le frottement dans cette étude, le fluide peut être supposé glisser librement sur la paroi du divergent. Au point A une déviation infinitésimale $d\theta$ provoque un gradient de pression dP qui se propage dans le fluide le long de la ligne de Mach A-C qui est nommée ligne caractéristique ξ [2,7,11] dont l'angle avec la direction de la vitesse de l'écoulement peut être déterminé connaissant le nombre de Mach local par la relation suivante:

$$\beta = \arctg \frac{1}{\sqrt{M^2 - 1}} \quad (4-3)$$

De la même façon au point A de la paroi, la perturbation initiale se propage le long de la ligne A'-C qui est appelée ligne caractéristique η dont l'angle β avec le direction de l'écoulement se calcule de la même manière que précédemment, Au delà des points A et A', la courbure de la paroi génère un nombre infini de succession de lignes de Mach dont quelques unes ont été représentées dans le schéma précédent.

Dans une région telle que la région A-B-C ou A'-B'-C où un des types de lignes caractéristiques ξ ou η existe, les propriétés du fluide sont constantes juste en aval d'une ligne caractéristique ou en amont; ce qui nous permet de supposer que la connaissance des propriétés du fluide le long d'une ligne de courant, comme celle de la paroi entre autres, est suffisante pour décrire la région A-B-C toute entière.

A ce propos considérons une portion de la paroi du divergent de la tuyère possédant une inclinaison infinitésimale $d\theta$ par rapport à l'horizontale tel que:

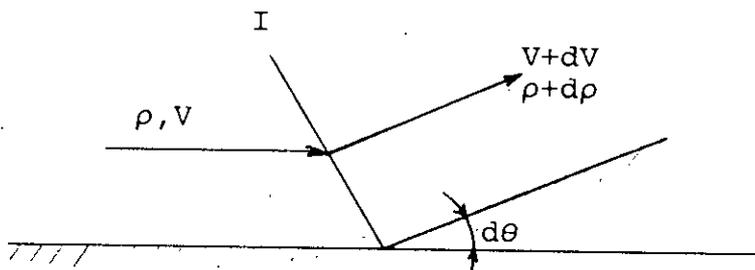


Fig.4-3: Perturbation de l'écoulement due à une inclinaison

il s'établit alors à partir du point d'inflexion A un perturbation I qui se déplace selon une caractéristique ξ ou η . En traversant cette ligne, les propriétés caractérisant l'écoulement V et ρ entre autres subissent une incrémentation de quantités infinitésimales dV et $d\rho$ respectivement. Dans ce qui suit, on établira une relation liant la vitesse V à l'angle d'inclinaison θ , pour cela considérons le plan hodographe traduisant le schéma physique précédent:

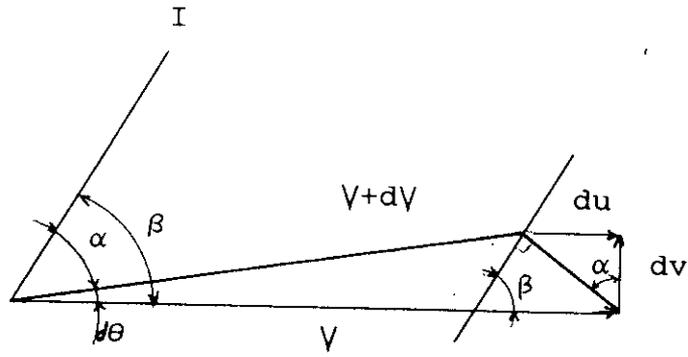


Fig.4-4: Hodographe de la vitesse en amont et en aval d'une perturbation.

d'après ce schéma on a :

$$dv = V \cdot d\theta \quad (4-4)$$

$$du = dV \quad (4-5)$$

alors :

$$-\frac{du}{dv} = \operatorname{tg} \beta = \frac{1}{\sqrt{M^2 - 1}} \quad (4-6)$$

l'angle \$\beta\$ est défini comme étant l'angle de Mach. En éliminant les termes \$du\$ et \$dv\$ de l'équation (4-6), il vient:

$$\frac{-dV}{V \cdot d\theta} = \frac{1}{\sqrt{M^2 - 1}} \quad (4-7)$$

d'où après réarrangement des termes on peut écrire :

$$d\theta = \frac{-dV}{V} \cdot \sqrt{M^2 - 1} \quad (4-8)$$

Cette dernière équation est très intéressante dans la mesure où elle se présente comme une correspondance directe entre les deux caractéristiques principales affectant l'écoulement, soient le nombre de Mach et l'inclinaison de la paroi.

4-4. Détermination des caractéristiques de l'écoulement

Dans le cas d'un écoulement stationnaire, parfait, bidimensionnel et isentropique d'un gaz parfait dans une tuyère supersonique, l'équation (4-8) est directement intégrable et conduit à l'équation suivante:

$$\theta = \nu(M) + \text{const.} \quad (4-9)$$

où $\nu(M)$ est une fonction analytique connue avec pour seule variable le nombre de Mach. Cette fonction n'est autre que celle de Prandtl-Meyer [7,10,11,12] qui est donnée par:

$$\nu(M) = \sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \cdot \text{arctg} \left[\frac{\gamma-1}{\gamma+1} \cdot (M^2-1) \right] - \text{arctg} \sqrt{M^2-1} \quad \dots\dots (4-10)$$

Cette dernière expression a été obtenue en éliminant le terme V de l'équation (4-8) en l'exprimant en fonction de M puis par intégration directe de la relation obtenue. En ce qui nous concerne, et sur la base des hypothèses émises (paragraphe 4-2), on essaiera d'éliminer les termes V et M de l'équation (4-8) pour les remplacer par des expressions ne contenant que le terme de la température T comme seule variable vis-à-vis de l'angle de déviation de la paroi θ , et ce dans l'idée préconçue de mettre en évidence son influence directe sur l'écoulement.

puisque: $M = \frac{V}{a}$ (4-11)

après différentiation on obtient :

$$\frac{dV}{V} = \frac{dM}{M} + \frac{da}{a} \quad (4-12)$$

où a est la vitesse du son. Il ne reste maintenant qu'à exprimer les termes M^2 (figurant dans l'équation (4-8)), dM/M et da/a en fonction de la température T .

Commençons par exprimer le terme da/a en fonction de T ; d'après la définition de la vitesse du son et compte tenu des hypothèses on a :

$$a^2 = \gamma(T) \cdot r \cdot T \quad (4-13)$$

en considérant l'expression de γ de l'équation (4-2), il vient après différentiation de la relation précédente :

$$\frac{da}{a} = \frac{1}{2} \cdot \frac{a_1 + 2 \cdot b_1 \cdot T + 3 \cdot c_1 \cdot T^2}{a_1 + b_1 \cdot T + c_1 \cdot T^2} \cdot \frac{dT}{T} \quad (4-14)$$

A présent exprimant les termes M^2 et dM/M en fonction de T , tenant compte des hypothèses, l'équation de l'énergie s'écrit sous sa forme différentielle comme suit :

$$V \cdot dV + C_p(T) \cdot dT = 0 \quad (4-15)$$

En remplaçant $C_p(T)$ par son expression (équation 4-2) dans la relation (4-15), et après intégration et réarrangement des termes, on obtient :

$$M^2 = \frac{2 \cdot \alpha_1 - 2 \cdot a_2 \cdot T - b_2 \cdot T^2 - 2 \cdot c_2 \cdot T^3 / 3}{r \cdot (a_1 \cdot T + b_1 \cdot T^2 + c_1 \cdot T^3)} \quad (4-16)$$

c'est l'expression du nombre de Mach en fonction de la température pour un gaz thermiquement parfait et calorifiquement imparfait obéissant aux hypothèses du paragraphe 4-2, avec :

$$\alpha_1 = a_2 \cdot T_0 + \frac{b_2}{2} \cdot T_0^2 + \frac{c_2}{3} \cdot T_0^3 \quad (4-17)$$

où T_0 représente la température génératrice . En dérivant l'équation (4-16), on obtient après simplification :

$$\frac{dM}{M} = - \frac{\alpha_6 + \alpha_2 \cdot T + \alpha_3 \cdot T^2 + \alpha_4 \cdot T^3 + \alpha_5 \cdot T^4}{\beta_6 + \beta_1 \cdot T + \beta_2 \cdot T^2 + \beta_3 \cdot T^3 + \beta_4 \cdot T^4 + \beta_5 \cdot T^5} \cdot \frac{dT}{T}$$

.....(4-18)

les coefficients $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_6$ sont des constantes données par les relations suivantes :

$$\alpha_2 = -2 \cdot b_1 \cdot \alpha_1 \quad (4-19)$$

$$\alpha_3 = b_1 \cdot a_2 - 0,5 \cdot a_1 \cdot b_2 - 3 \cdot c_1 \cdot \alpha_1 \quad (4-20)$$

$$\alpha_4 = 2 \cdot c_1 \cdot a_2 - 2 \cdot a_1 \cdot c_2 / 3 \quad (4-21)$$

$$\alpha_5 = 0,5 \cdot c_1 \cdot b_2 - b_1 \cdot c_2 / 3 \quad (4-22)$$

$$\alpha_6 = -a_1 \cdot \alpha_1 \quad (4-23)$$

$$\beta_1 = 2 \cdot a_1 \cdot a_2 - 2 \cdot b_1 \cdot \alpha_1 \quad (4-24)$$

$$\beta_2 = a_1 \cdot b_2 + 2 \cdot b_1 \cdot a_2 - 2 \cdot c_1 \cdot \alpha_1 \quad (4-25)$$

$$\beta_3 = 2 \cdot a_1 \cdot c_2 / 3 + b_1 \cdot b_2 \quad (4-26)$$

$$\beta_4 = 2 \cdot b_1 \cdot c_2 / 3 + c_1 \cdot b_2 \quad (4-27)$$

$$\beta_5 = 2 \cdot c_1 \cdot c_2 / 3 \quad (4-28)$$

$$\beta_6 = -2 \cdot a_1 \cdot \alpha_1 \quad (4-29)$$

En remplaçant les équations (4-14) et (4-18) dans (4-12) ensuite avec (4-16) dans (4-6), il vient:

$$d\theta = F(T) \cdot dT \quad (4-30)$$

F(T) est une fonction de T donnée par l'équation suivante :

$$F(T) = \left[\frac{\alpha_6 + \alpha_2 \cdot T + \alpha_3 \cdot T^2 + \alpha_4 \cdot T^3 + \alpha_5 \cdot T^4}{\beta_6 + \beta_1 \cdot T + \beta_2 \cdot T^2 + \beta_3 \cdot T^3 + \beta_4 \cdot T^4 + \beta_5 \cdot T^5} - \frac{a_1 + 2 \cdot b_1 \cdot T + 3 \cdot c_1 \cdot T^2}{2 \cdot (a_1 + b_1 \cdot T + c_1 \cdot T^2)} \right] \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_1 - 2 \cdot a_2 \cdot T - b_2 \cdot T^2 - 2 \cdot c_2 \cdot T^3 / 3}{r \cdot (a_1 \cdot T + b_1 \cdot T^2 + c_1 \cdot T^3)} - 1} \cdot \frac{1}{T} \quad (4-31)$$

L'équation différentielle (4-30) est très importante dans la mesure où elle permet, après sa résolution, de trouver l'angle de déviation convenable de la paroi de la tuyère connaissant la température de l'écoulement en chaque point.

A titre de comparaison (et par la même de vérification) de l'équation (4-30) avec l'équation (4-9) obtenue par la théorie des gaz parfaits, considérons que le gaz est parfait et transformant l'équation (4-31), prenons :

$$\gamma = a_1 \quad \text{et} \quad C_p = a_2$$

Après simplification on trouve :

$$F(T) = \frac{0,5}{T_0 - T} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a_1 \cdot (T_0 - T)}{a_1 \cdot r \cdot T} - 1} \quad (4-32)$$

sachant que : $a_1 = \gamma$

$$\text{et : } a_2 = C_p = \frac{\gamma \cdot r}{\gamma - 1}$$

donc on a :

$$F(T) = \frac{0,5 \cdot \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \cdot \frac{T_0}{T} - \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}}{T - T_0} \quad (4-33)$$

de plus :

$$M^2 = \frac{2}{\gamma-1} \cdot \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) \quad (4-34)$$

l'équation (4-30) s'écrira alors comme suit:

$$d\theta = \frac{0,5 \cdot \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \cdot \frac{T_0}{T} - \frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}{\frac{T_0}{T} - 1} \cdot \frac{dT}{T} \quad (4-35)$$

en remplaçant le terme T/T_0 tiré de l'équation (4-34) dans l'équation (4-35), il vient :

$$d\theta = - \frac{\sqrt{M^2 - 1}}{1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M^2} \quad (4-36)$$

qui après intégration fournie :

$$\theta = \nu(M) + \text{const.} \quad (4-37)$$

où $\nu(M)$ est la fonction de Prandtl-Meyer, équation (4-10), trouvée avec la théorie des gaz parfaits [7], on conclut donc que cette théorie n'est qu'un cas particulier de la théorie développée ici sur la base des hypothèses du paragraphe 4-2, d'où sa grande importance qui laisse présager un champs d'application plus vaste à très hautes températures des tuyères supersoniques notamment dans les souffleries à choc.

A présent revenons à la résolution de l'équation (4-30) et considérons les figures suivantes:

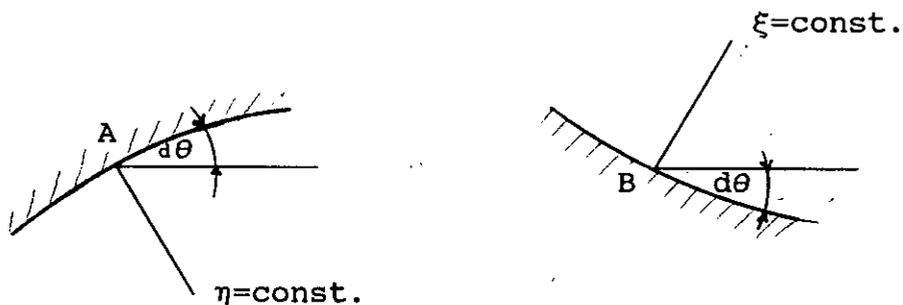


Fig.4-5: Définition des lignes caractéristiques ξ et η

En un point quelconque A de la paroi du divergent de la tuyère, on considère [7] que $d\theta$ est comptée positivement selon une ligne caractéristique η constante, et négativement selon une ligne caractéristique ξ constante (point B), ceci se traduit comme suit :

- selon une ligne $\eta=\text{const.}$, on a :

$$d\theta = F(T).dT \quad (4-38)$$

- et selon une ligne $\xi=\text{const.}$, on a :

$$d\theta = -F(T).dT \quad (4-39)$$

L'intégration du système d'équations différentielles (4-38) et (4-39) n'étant pas possible analytiquement, étant donnée que $F(T)$ n'est pas directement intégrable, on procédera alors numériquement par la méthode de Simpson, entre autres, du fait qu'elle est la plus précise.

Considérons un divergent tel que schématisé sur la figure (4-6), et prenons un point P quelconque tel que :

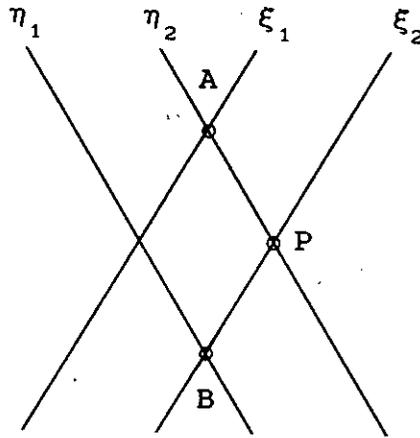


Fig.4-6: Interaction des lignes caractéristiques ξ et η

En connaissant les caractéristiques de l'écoulement aux points A et B, qu'on considère comme points initiaux, on peut, après intégration de (4-38) entre A et P puis entre B et P, obtenir un système d'équations non linéaires avec seulement deux inconnues θ_P et T_P telles que:

$$\text{selon } \eta = \text{const.}: \quad \int_{\theta_A}^{\theta_P} d\theta = \int_{T_A}^{T_P} F(T) \cdot dT \quad (4-40)$$

$$\text{selon } \eta = \text{const.}: \quad \int_{\theta_B}^{\theta_P} d\theta = - \int_{T_B}^{T_P} F(T) \cdot dT \quad (4-41)$$

après intégration de $d\theta$ en utilisant la méthode de Simpson, on obtient:

$$\theta_P - \theta_A = \frac{h_1}{3} \cdot \left[F(T_A) + F(T_P) + 4 \cdot \sum_{i=1}^n F(T_A + (2 \cdot i - 1) \cdot h_1) + \right. \\ \left. + 2 \cdot \sum_{i=1}^n F(T_A + 2 \cdot i \cdot h_1) \right] \quad (4-42)$$

$$\theta_P - \theta_B = -\frac{h_2}{3} \cdot \left[F(T_B) + F(T_P) + 4 \cdot \sum_{i=1}^n F(T_B + (2.i-1).h_2) + \right. \\ \left. + 2 \cdot \sum_{i=1}^n F(T_B + 2.i.h_2) \right] \quad (4-43)$$

avec :

$$h_1, \text{ pas suivant } \eta = \text{const.} : h_1 = \frac{T_P - T_A}{N} \quad (4-44)$$

$$h_2, \text{ pas suivant } \xi = \text{const.} : h_2 = \frac{T_P - T_B}{N} \quad (4-45)$$

des deux dernières équations on peut écrire :

$$h_1 = \frac{T_B - T_A}{N} + h_2 \quad (4-46)$$

c'est une relation supplémentaire liant les deux équations (4-42) et (4-43).

Les équations ainsi posées, avec pour inconnues θ_P et T_P , peuvent être résolues numériquement comme suit :

d'abord effectuons l'opération suivante : en retranchant membre à membre les équations (4-42) et (4-43), on obtient :

$$\theta_B - \theta_A = \frac{h_1}{3} \cdot \left[F(T_A) + F(T_P) + 4 \cdot \sum_{i=1}^n F(T_A + (2.i-1).h_1) + \right. \\ \left. + 2 \cdot \sum_{i=1}^n F(T_A + 2.i.h_1) \right] + \frac{h_2}{3} \cdot \left[F(T_B) + F(T_P) + \right. \\ \left. + 4 \cdot \sum_{i=1}^n F(T_B + (2.i-1).h_2) + 2 \cdot \sum_{i=1}^n F(T_B + 2.i.h_2) \right] \quad (4-47)$$

avec les équations (4-45), (4-46) et (4-47) on constitue un

ystème ittératif qui après convergence fournit la valeur de la température T_p en un point P. Ensuite, en utilisant l'équation (4-42) ou (4-43), on peut calculer directement la valeur de l'angle θ_p correspondant.

4-5. Méthode de calcul des caractéristiques dans un divergent d'une tuyère supersonique

Pour avoir un écoulement parallèle et uniforme à la section de sortie de la tuyère, avec un nombre de Mach fixé [7,11,12], on fait varier l'angle de déviation de la paroi θ depuis sa valeur initiale au col, où $\theta_1=0$, jusqu'à sa valeur finale à la section de sortie ($\theta_f=0$), en passant par un maximum dont la valeur, dénotée θ_{max} , se calcule en considérant le raisonnement suivant:

selon une ligne caractéristique $\eta = \text{constante}$, on a:

$$\theta_2 - \theta_1 = \int_{T_1}^{T_2} F(T) \cdot dT \quad (4-48)$$

au col: $\theta_1 = 0$; $\theta_2 = \theta$

et: $T_1 = T_e$; $T_2 = T$

donc on a:
$$\theta = \int_{T_e}^T F(T) \cdot dT \quad (4-49)$$

et selon une ligne caractéristique $\xi = \text{constante}$, on a:

$$\theta_4 - \theta_3 = - \int_{T_3}^{T_4} F(T) \cdot dT \quad (4-50)$$

à la section de sortie: $\theta_3 = 0$; $\theta_4 = \theta'$

et: $T_3 = T_s$; $T_4 = T'$

donc on a:
$$\theta' = \int_{T'}^{T_s} F(T) \cdot dT \quad (4-51)$$

Au point de déviation maximale où les lignes η et ξ sont concourantes, on a:

$$\theta = \theta' = \theta_{\max.}$$

et : $T = T'$

l'équation (4-49) devient :
$$\theta_{\max} = \int_{T_e}^{T'} F(T) \cdot dT \quad (4-52)$$

et l'équation (4-51) devient :
$$\theta_{\max} = \int_{T'}^{T_s} F(T) \cdot dT \quad (4-53)$$

En ajoutant les équations (4-52) et (4-53) membre à membre, on obtient:

$$\theta_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \int_{T_e}^{T_s} F(T) \cdot dT \quad (4-54)$$

4-5-1. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont considérées à la section d'entrée du divergent, soit au col où toutes les caractéristiques de l'écoulement sont connues.

considérons donc le col de la tuyère tel que schématisé sur la figure suivante:

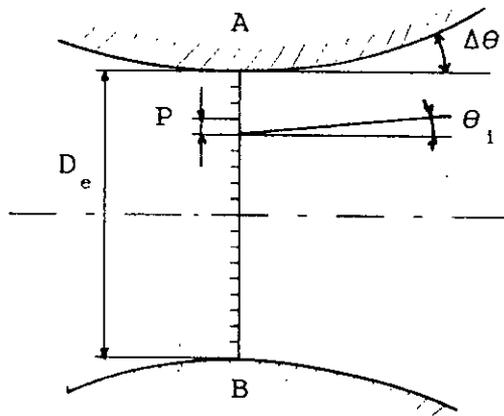


Fig.4-7: Déviation initiale des points situés sur la section du col de la tuyère.

on remarque que juste après la section A-B, le fluide en contact avec la paroi subira une déviation $\Delta\theta$ donnée. Par suite toutes les particules du fluides comprises entre A et B subiront une déviation θ_1 proportionnelle à $\Delta\theta$ tel que:

$$\theta_1 = a.i + b \quad (4-55)$$

où a et b sont des constantes vérifiant les conditions suivantes:

- au point A : $i=0$, $\theta_1 = \Delta\theta$
- au point B : $i=N$, $\theta_1 = -\Delta\theta$

Ainsi on trouve :

$$\theta_1 = \left(1 - \frac{2.i}{N}\right) \cdot \Delta\theta \quad (4-56)$$

par conséquent les particules fluides qui se trouve sur l'axe de la tuyère, où $i=N/2$, ne subiront pas de déviation puisque $\theta_{N/2}=0$.

4-5-2. Calcul des caractéristiques dans le divergent

Considérons la paroi supérieure du divergent où un écoulement traverse se dernier selon la figure suivante :

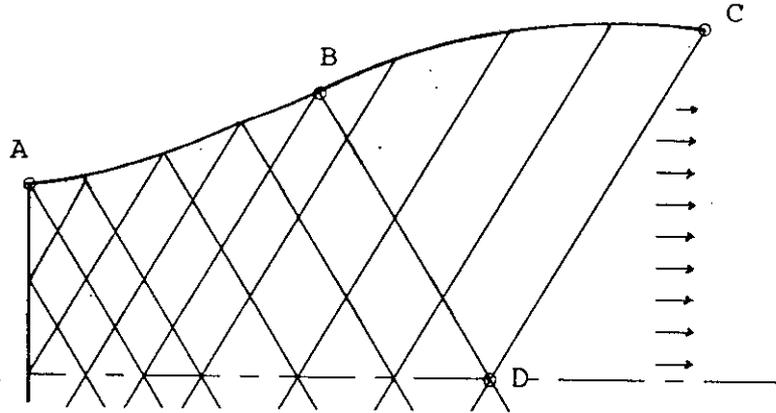


Fig.4-8: Domaines d'écoulement dans le divergent.

La partie de la paroi située entre les points A et B est le domaine où s'effectuent les réflexions des perturbations. Ce domaine est dénommé domaine non simple, puis à partir du point B où la déviation est maximale, la réflexion des perturbations sur la paroi s'annule au fur et à mesure qu'on s'approche de la section de sortie au point C, où toutes les réflexions sont éliminées, afin d'uniformiser l'écoulement et d'obtenir des lignes de courant parallèles. La partie B-C de la paroi est dite domaine simple.

4-5-2-1. Calcul des caractéristiques dans le domaine non-simple

Dans ce domaine, l'angle d'inclinaison de la paroi est connu et se calcule comme suit:

sachant qu'au point A : $\theta = \Delta\theta$

et qu'au point B : $\theta = \theta_{\max.}$

En faisant varier θ d'une manière proportionnelle par rapport à $\Delta\theta$, on peut écrire:

$$\theta_i = a.i + b \quad (4-57)$$

où a et b sont des constantes vérifiant les conditions suivantes:

pour $i = 0$ (au point A) : $\theta = \Delta\theta$

pour $i = i_1$ (au point B) : $\theta = \theta_{\max}$.

on trouve donc:

$$\theta_i = \left[\frac{i}{i_1} \cdot \left(\frac{\theta_{\max}}{\Delta\theta} - 1 \right) + 1 \right] \cdot \Delta\theta \quad (4-58)$$

En connaissant la valeur de l'angle en un point quelconque P appartenant à la paroi, et connaissant les caractéristiques de l'écoulement (θ et T) aux points A et B, on peut déterminer la température au point P à l'aide de l'équation (4-43) qui correspond au schéma suivant:

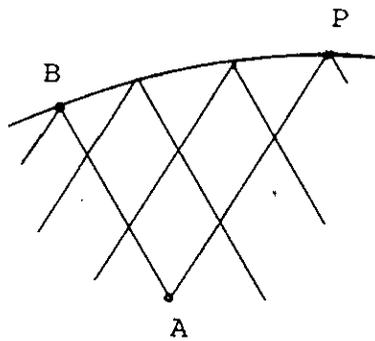


Fig.4-9: Détermination des caractéristiques d'un point appartenant à la paroi du domaine non-simple.

Après avoir déterminé la température au point P, on peut déterminer le reste des caractéristiques de l'écoulement telles

que le nombre de Mach, la pression, la masse volumique ou autres à l'aide d'équations appropriées (paragraphe 4-7).

Si le point P est un point quelconque de l'écoulement n'appartenant pas à la paroi du divergent, on construit le maillage tel que représenté sur la figure suivante:

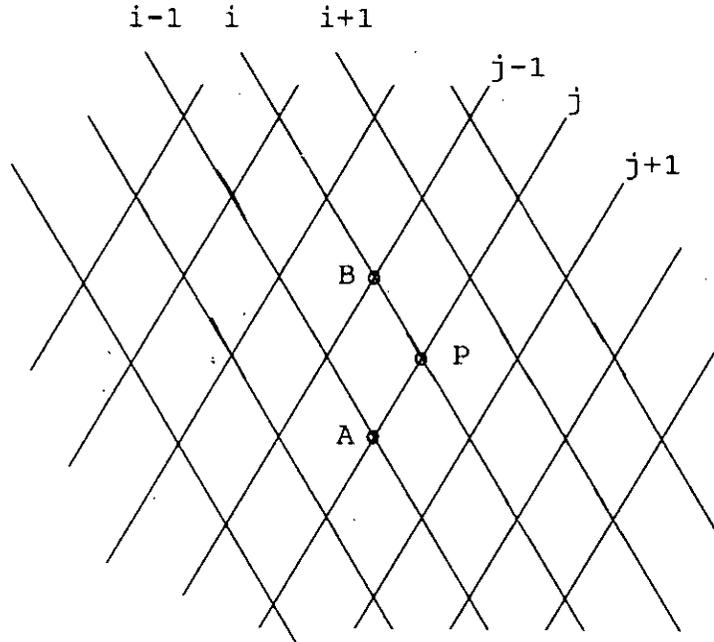


Fig.4-10: Détermination des caractéristiques d'un point quelconque dans le domaine non-simple.

Les caractéristiques au point P se calculent à partir de la connaissance obligatoire des caractéristiques aux points A et B. En adaptant le système d'équations (4-42) et (4-43) au maillage précédent, on obtient:

$$\theta(i,j) - \theta(i-1,j) = \frac{h_1}{3} \cdot \left[F(T(i-1,j)) + F(T(i,j)) + \right.$$

$$\left. + 4 \cdot \sum_{i_s=1}^{N_s} F(T(i-1,j) + (2 \cdot i_s - 1) \cdot h_1) + 2 \cdot \sum_{i_s=1}^{N_s} F(T(i-1,j) + 2 \cdot i_s \cdot h_1) \right]$$

..... (4-59)

$$\theta(i,j) - \theta(i,j-1) = -\frac{h_2}{3} \cdot \left[F(T(i,j-1)) + F(T(i,j)) + \right. \\ \left. + 4 \cdot \sum_{i_s=1}^{N_s} F(T(i,j-1) + (2 \cdot i_s - 1) \cdot h_2) + 2 \cdot \sum_{i_s=1}^{N_s} F(T(i,j-1) + 2 \cdot i_s \cdot h_2) \right] \\ \dots\dots\dots (4-60)$$

où $i_s=1,2,\dots,N_s$, caractérise les itérations (nombre de points) pour le calcul d'intégrale par la méthode de Simpson.

En éliminant $\theta(i,j)$ entre ces deux équations, on obtient l'expression suivante:

$$\theta(i,j-1) - \theta(i-1,j) = \frac{h_1}{3} \cdot \left[F(T(i-1,j)) + F(T(i,j)) + \right. \\ \left. + 4 \cdot \sum_{i_s=1}^{N_s} F(T(i-1,j) + (2 \cdot i_s - 1) \cdot h_1) + 2 \cdot \sum_{i_s=1}^{N_s} F(T(i-1,j) + 2 \cdot i_s \cdot h_1) \right] + \\ -\frac{h_2}{3} \cdot \left[F(T(i,j-1)) + F(T(i,j)) + 4 \cdot \sum_{i_s=1}^{N_s} F(T(i,j-1) + (2 \cdot i_s - 1) \cdot h_2) + \right. \\ \left. + 2 \cdot \sum_{i_s=1}^{N_s} F(T(i,j-1) + 2 \cdot i_s \cdot h_2) \right] \\ (4-61)$$

l'équation (4-61) est une équation non linéaire où la seule inconnue est la température $T(i,j)$. Une fois qu'on détermine $T(i,j)$ numériquement par la méthode de Newton, on pourra déterminer $\theta(i,j)$ à l'aide de l'équation (4-59) (ou (4-60)). Il est à noter que les itérations s'amorcent à partir de la section du col là où toutes les caractéristiques de l'écoulement sont connues.

4-5-2-2. Calcul des caractéristiques dans le domaine simple

Dans cette région il n'y a pas d'interaction d'ondes, et seul un des types de lignes caractéristiques (ξ ou η) est présent. Considérons le schéma de la figure suivante :

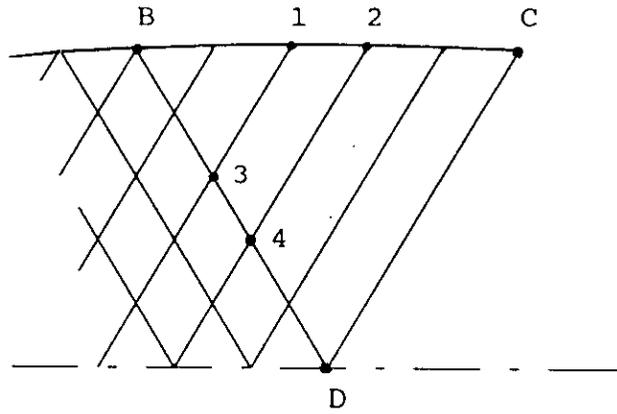


Fig.4-11: Détermination des caractéristiques de la paroi du domaine simple.

Sachant les caractéristiques de l'écoulement suivant la ligne B-D, on peut déterminer les caractéristiques à la paroi de la manière suivante:

selon la ligne caractéristique passant par les points dénotés par 1 et 2, on a:

$$\theta_2 - \theta_1 = \int_{T_1}^{T_2} F(T) \cdot dT \quad (4-62)$$

et entre les points 3 et 4, on a:

$$\theta_4 - \theta_3 = \int_{T_3}^{T_4} F(T) \cdot dT \quad (4-63)$$

en retranchant, membre à membre, l'équation (4-62) de l'équation (4-63), on a :

$$\theta_2 - \theta_1 - \theta_4 + \theta_3 = \int_{T_1}^{T_2} F(T) \cdot dT - \int_{T_3}^{T_4} F(T) \cdot dT \quad (4-64)$$

puisque: $T_1 = T_3$ et $T_2 = T_4$, car suivant une ligne caractéristique dans le domaine simple, où il n'y a pas d'interaction d'ondes, le nombre de Mach est constant. L'équation (4-64) devient donc :

$$\theta_2 - \theta_1 - \theta_4 + \theta_3 = 0 \quad (4-65)$$

d'où: $\theta_2 = \theta_4 - \theta_3 + \theta_1 \quad (4-66)$

tous les termes du membre de droite se déterminent à partir du domaine non simple, et les calculs s'amorcent à partir du point B, c'est à dire: $\theta_B = \theta_1 = \theta_3$. Quant à la température, elle peut être déterminée à partir de l'une des deux équations (4-42) ou (4-43).

4-6. Calcul des coordonnées des points caractéristiques et de la longueur de la tuyère

D'après [11,7] les coordonnées des points caractéristiques se calculent comme suit:

- Si le point P appartient à la section du col, alors ses coordonnées cartésiennes sont données par:

$$x_p = 0$$

$$y_p(i) = \left(1 - \frac{2 \cdot i}{N} \right) \cdot \frac{D}{2} \quad (4-67)$$

où D est le diamètre au col.

- Si le point P est quelconque et n'appartient pas à la paroi, alors ses coordonnées se calculent par:

$$x(P) = \frac{y(A) - y(B) + \operatorname{tg} \beta_1(A) \cdot x(A) + \operatorname{tg} \beta_2(B) \cdot x(B)}{\operatorname{tg} \beta_2(B) + \operatorname{tg} \beta_1(A)} \quad (4-68)$$

$$y(P) = \operatorname{tg} \beta_2(B) \cdot (x(P) - x(B)) + y(B) \quad (4-69)$$

avec: $\beta_1 = \beta - \theta$

et $\beta_2 = \beta + \theta$

- Si le point P considéré appartient à la paroi alors ses coordonnées seront:

$$x(P) = \frac{y(A) - y(B) + \operatorname{tg} \beta_2(A) \cdot x(A) + \operatorname{tg} \theta(B) \cdot x(B)}{\operatorname{tg} \beta_2(A) + \operatorname{tg} \theta(A)} \quad (4-70)$$

$$y(P) = \operatorname{tg} \beta_2(B) \cdot (x(P) - x(A)) + y(A) \quad (4-71)$$

Quant à la longueur du divergent de la tuyère, elle est évaluée à partir de la dernière abscisse de la paroi.

4-7. calcul des caractéristiques thermodynamiques

4-7-1. calcul de la pression

Etant donné que le rapport des chaleurs spécifiques γ est variable avec la température, qui elle aussi varie en chaque point de l'écoulement entre la section au col et la section de sortie, on considère donc que l'écoulement est polytropique par tranches, c'est à dire qu'à chaque interval compris entre deux points successifs (selon le maillage considéré), on prendra une valeur constante de γ , soit la valeur moyenne des deux points considérés.

D'une façon générale, pour un écoulement polytropique on a :

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (4-72)$$

(on a remplacé γ par k afin de distinguer l'écoulement polytropique de l'isentropique.)

Considérons deux points successifs dénotés par les indices 0 et 1 respectivement (l'indice 0 correspond à un point appartenant à la section du col), on a :

$$\frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{\frac{k_{01}}{k_{01}-1}} \quad (4-73)$$

où k_{01} correspond à l'exposant polytropique moyen tel que :

$$k_{01} = \frac{k_0 + k_1}{2} \quad (4-74)$$

k_0 est l'exposant polytropique du point indicé par 0, et k_1 est celui du point indicé par 1. De la même manière entre deux points successifs indicés par 1 et 2, on a :

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{k_{12}}{k_{12}-1}} \quad (4-75)$$

où :

$$k_{01} = \frac{k_0 + k_1}{2} \quad (4-76)$$

d'autres parts on peut écrire :

$$\frac{P_2}{P_0} = \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{k_{12}}{k_{12}-1}} \cdot \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{\frac{k_{01}}{k_{01}-1}} \quad (4-77)$$

ensuite entre deux points 2 et 3, on a :

$$\frac{P_3}{P_2} = \left(\frac{T_2}{T_3} \right)^{\frac{k_{23}}{k_{23}-1}} \quad (4-78)$$

on peut écrire aussi :

$$\frac{P_3}{P_0} = \frac{P_3}{P_2} \cdot \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{\frac{k_{01}}{k_{01}-1}} \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{k_{12}}{k_{12}-1}} \cdot \left(\frac{T_2}{T_3} \right)^{\frac{k_{23}}{k_{23}-1}} \dots (4-79)$$

En continuant l'opération jusqu'au point n correspondant à la section de sortie de la tuyère, on établit par récurrence la relation suivante:

$$\frac{P_n}{P_0} = \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{\frac{k_{01}}{k_{01}-1}} \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{k_{12}}{k_{12}-1}} \cdot \dots \cdot \left(\frac{T_{n-1}}{T_n} \right)^{\frac{k_{n-1,n}}{k_{n-1,n}-1}} \dots (4-80)$$

avec :
$$k_{n-1,n} = \frac{k_{n-1} + k_n}{2} \quad (4-81)$$

L'équation (4-80) est une relation générale qui permet de déterminer la pression de n'importe quel point de la tuyère, en tenant compte de la variation du rapport des chaleurs spécifiques.

4-7-2. Calcul de la masse volumique

De la même manière que précédemment, on établit la relation de récurrence suivante, qui permet à son tour de déterminer la masse volumique ρ en chaque point de la tuyère :

$$\frac{\rho_n}{\rho_0} = \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{\frac{1}{k_{01}-1}} \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{k_{12}-1}} \cdot \dots \cdot \left(\frac{T_{n-1}}{T_n} \right)^{\frac{1}{k_{n-1,n}-1}}$$

.....(4-82)

Si on prend le cas particulier d'un écoulement isentropique d'un gaz parfait où le rapport des chaleurs spécifiques est constant, les équations (4-80) et (4-82) deviennent:

$$\frac{P_n}{P_0} = \left(\frac{T_0}{T_n} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$\frac{\rho_n}{\rho_0} = \left(\frac{T_0}{T_n} \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

et on retrouve les relations propres au cas particulier de l'écoulement isentropique, ceci est à titre de vérification.

4-8.conclusion

Par ce présent chapitre, on a pu, dans un premier temps, trouver une relation qui lie directement l'angle de déviation de la paroi d'une tuyère supersonique à la température de l'écoulement, qui aboutira au traçage de profils de tuyères supersoniques à hautes températures (chapitre suivant), couvrant d'importante applications notamment sur les souffleries à choc et en propulsion (voir chapitre 1). En second lieu, on a démontré que l'équation de Prandtl-Meyer [11,12,7] , relative au modèle du gaz parfait n'est qu'un cas particulier de la théorie développée ici qui constitue donc une amélioration notable, on montrera ensuite (chapitre suivant) d'après les résultats, le champs de son application, c'est à dire le domaine de la validité du modèle du gaz parfait. D'autres parts les résultats obtenus à partir de ce chapitre, serviront de base de données pour l'écoulement libre à la frontière de la couche limite qui va être traité dans le sixième chapitre.

Chapitre 5

RESULTATS ET COMMENTAIRES RELATIFS AU QUATRIEME CHAPITRE

Le but principal de l'étude faite dans le quatrième chapitre, était le traçage du profil des divergents des tuyères supersoniques à hautes températures selon les hypothèses du paragraphe 4-2, où on avait établi des expressions qui constituent une généralisation de l'étude déjà faite avec l'hypothèse des gaz parfaits [7]. Au terme de cette étude on a élaboré un programme expert (qui est amplement décrit dans le chapitre 8) pour le traçage des tuyères supersoniques à hautes températures tant que celles-ci ne dépassent pas le seuil de la dissociation du gaz, et jusqu'à un nombre de Mach de 6.

Dans ce chapitre on présentera les principaux résultats obtenus pour le cas de l'air à hautes températures qu'on tachera de comparer avec ceux obtenus pour le même fluide avec l'hypothèse des gaz parfaits [7].

5-1. Caractéristiques géométriques

D'après les graphes (5-1, 5-2, ..., 5-6), on constate que pour des nombres de Mach de 1.5 et 2, la théorie des gaz parfaits est consistante puisque les profils tracés pour différentes températures génératrices sont très proches, mais à partir d'un nombre de Mach de 3, l'écart devient plus grand tant en longueurs qu'en diamètres : d'après les tableaux des coordonnées (5-1, 5-2) correspondant à $M_s=1.5$ et $M_s=2$ on constate que, selon

la température génératrice, l'écart entre les longueurs et les rayons des tuyères (dernières lignes des tableaux correspondant à x et à y respectivement) ne dépasse pas quelques dixièmes de millimètre, mais à partir d'un nombre de Mach de 3 (tableau 5-3) l'écart devient de plus en plus important, et les profils (graphe 5-3) diffèrent visiblement, les graphes (5-7 et 5-8) reflètent clairement cette différence.

5-2. caractéristiques thermodynamiques

Les variations des caractéristiques thermodynamiques avec la température sont régies par les équations (4-16) pour la températures, (4-80) pour la pression et (4-82) pour la masse volumique. Et à titre de comparaison avec [7], considérons l'écart relatif du rapport P_s/P_o (en %) à haute température par rapport à l'hypothèse des gaz parfaits, où P_s est la pression statique à la section de sortie de la tuyère et P_o la pression génératrice :

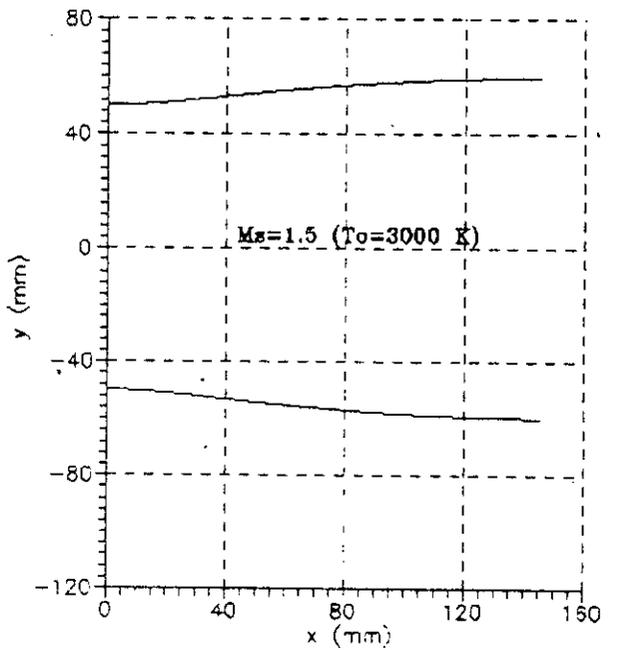
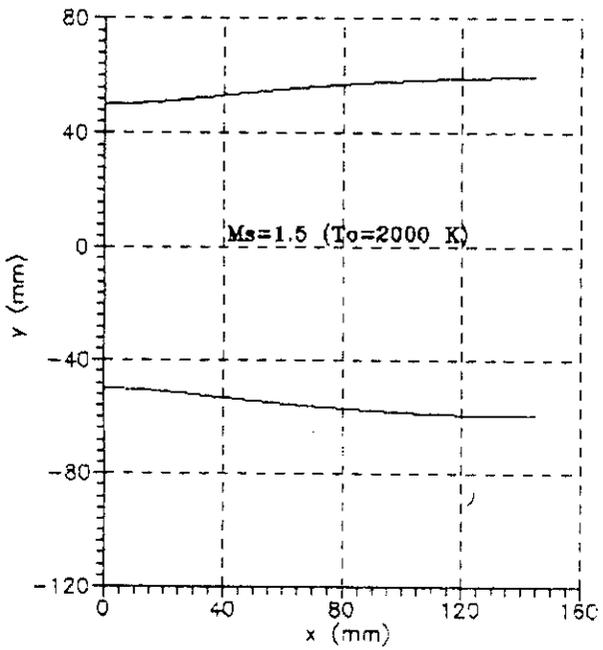
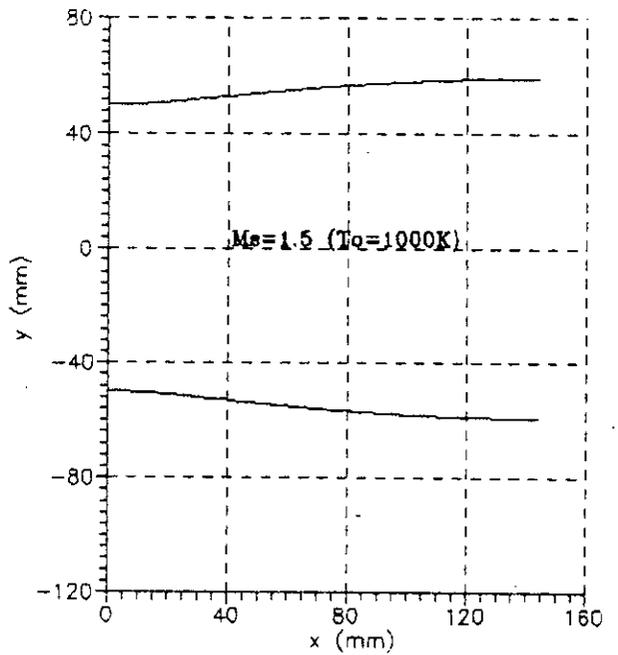
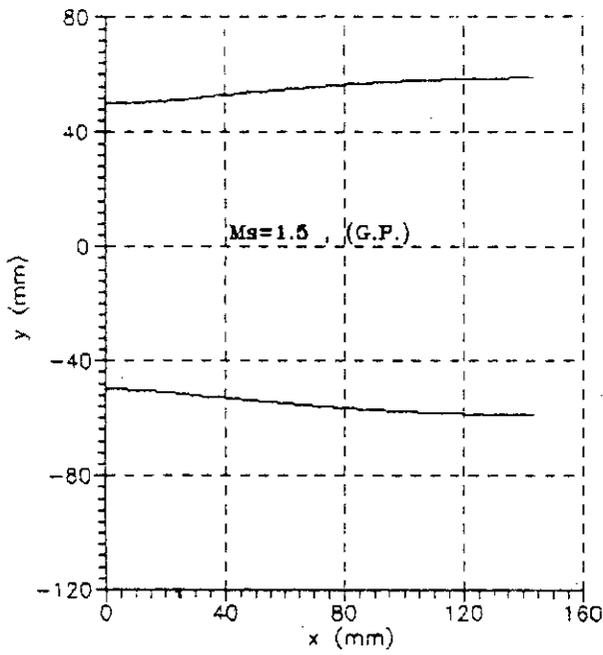
Ms \ To	To		
	1000 °K	2000 °K	3000 °K
1.5	0.10	0.11	0.12
2	0.21	0.29	0.37
3	4.56	10.59	14.94
4	6.65	19.20	24.26
5	8.40	23.26	34.66
6	10.70	26.44	44.44

Tableau 5-1: Valeurs de l'écart relatif $\Delta(P_s/P_o)$ (en %).

On remarque d'après ces valeurs que l'erreur de l'hypothèse des gaz parfaits est très importante à partir d'un nombre de Mach de 2 si on admet une erreur maximale de 1%.

5-3. Conclusion

D'après les résultats obtenus, on constate que l'hypothèse des gaz parfaits utilisée pour la traçage des tuyères supersoniques, n'est applicable que pour des nombres de Mach inférieurs à 2, ceci se constate d'autant mieux en considérant les graphes 5-7 et 5-8 qui représentent respectivement les variations des rapports L/r_e et D_s/D_e en fonction de la température génératrice T_0 et du nombre de Mach de sortie M_s (L est la longueur du divergent, $r_e = D_e/2$ représente le rayon au col et D_s diamètre à la section de sortie). d'autres parts, l'interprétation de l'aspect physique qui prédit des dimensions plus grandes suivant l'importance de la température est vérifiée.



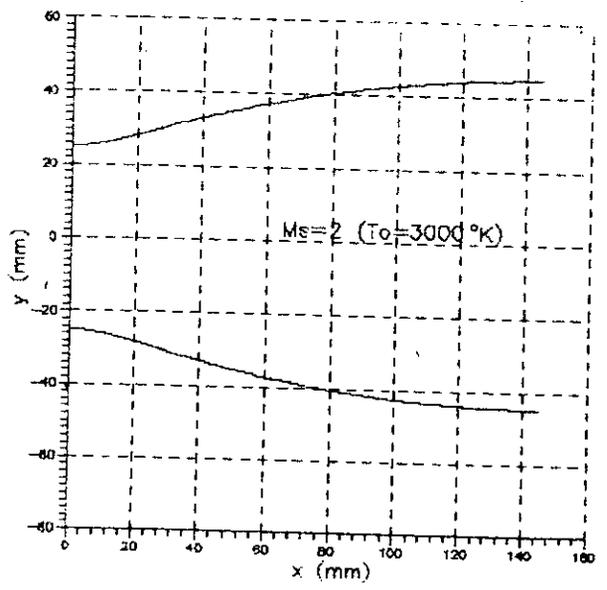
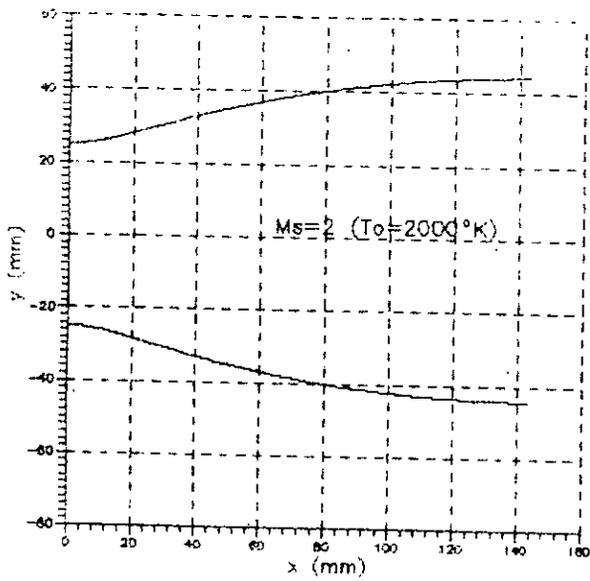
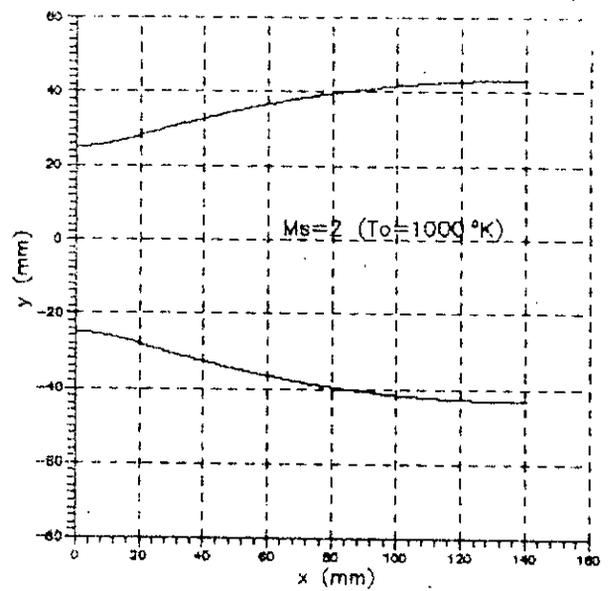
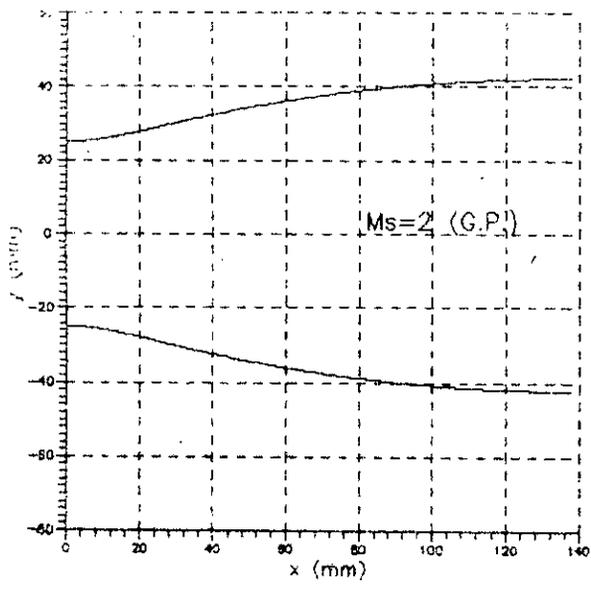
Graphe 5-1: Profils de tuyères supersoniques pour $Ms=1.5$

Tableau 5-1.

Coordonnées du profil de la paroi de la tuyère pour :

Ms=1.5

Gaz parfait		To=1000 K		To=2000 K		To=3000 K	
X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)
0.00	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00
0.37	50.00	0.34	50.00	0.45	50.00	0.36	50.00
0.96	50.01	0.92	50.01	0.88	50.01	0.97	50.01
1.67	50.01	1.62	50.01	1.57	50.01	1.72	50.02
2.47	50.03	2.42	50.03	2.35	50.03	2.57	50.03
3.34	50.04	3.29	50.05	3.20	50.05	3.50	50.05
4.28	50.07	4.22	50.07	4.12	50.07	4.49	50.08
5.27	50.10	5.21	50.10	5.10	50.10	5.55	50.11
6.31	50.13	6.25	50.14	6.13	50.14	6.67	50.15
7.40	50.17	7.34	50.18	7.21	50.18	7.83	50.20
8.54	50.22	8.48	50.23	8.34	50.24	9.03	50.26
9.71	50.28	9.65	50.29	9.50	50.29	10.29	50.32
10.85	50.34	10.75	50.35	10.68	50.36	11.43	50.39
12.05	50.41	11.93	50.42	11.90	50.43	12.48	50.45
13.32	50.48	13.20	50.50	13.17	50.52	13.65	50.53
14.63	50.57	14.51	50.59	14.48	50.61	14.90	50.61
15.98	50.66	15.85	50.68	15.82	50.71	16.27	50.72
17.35	50.77	17.24	50.79	17.19	50.82	17.63	50.83
18.76	50.88	18.65	50.91	18.59	50.93	19.08	50.95
20.20	51.00	20.09	51.03	20.02	51.06	20.56	51.08
21.67	51.12	21.56	51.16	21.47	51.20	22.07	51.23
23.16	51.26	23.05	51.31	22.96	51.34	23.62	51.38
24.68	51.41	24.57	51.46	24.47	51.50	25.20	51.55
26.22	51.56	26.12	51.62	26.00	51.67	26.81	51.72
43.98	53.39	44.00	53.53	44.05	53.65	44.13	53.65
51.88	54.17	51.93	54.34	52.00	54.49	52.17	54.50
58.09	54.75	58.15	54.95	58.24	55.11	58.48	55.13
63.55	55.23	63.62	55.45	63.72	55.63	64.06	55.67
68.60	55.66	68.67	55.90	68.78	56.09	69.23	56.14
73.38	56.04	73.48	56.29	73.58	56.49	74.14	56.56
77.99	56.39	78.12	56.66	78.20	56.87	78.88	56.94
82.47	56.71	82.64	56.99	82.72	57.21	83.51	57.29
86.87	57.00	87.07	57.29	87.16	57.52	88.06	57.62
91.22	57.26	91.45	57.57	91.53	57.81	92.55	57.91
95.53	57.51	95.79	57.83	95.88	58.07	97.03	58.19
99.69	57.73	99.97	58.06	100.17	58.31	101.27	58.43
103.85	57.93	104.13	58.27	104.40	58.53	105.28	58.63
107.98	58.11	108.29	58.45	108.60	58.73	109.34	58.82
112.07	58.27	112.42	58.62	112.75	58.90	113.41	58.99
116.13	58.41	116.52	58.77	116.86	59.05	117.55	59.15
120.14	58.53	120.58	58.89	120.93	59.18	121.59	59.28
124.12	58.63	124.60	59.00	124.96	59.29	125.69	59.39
128.07	58.71	128.59	59.09	128.97	59.38	129.74	59.48
131.98	58.77	132.55	59.15	132.94	59.45	133.77	59.55
135.86	58.82	136.48	59.20	136.88	59.50	137.78	59.60
139.70	58.85	140.37	59.23	140.79	59.53	141.75	59.63
143.48	58.86	144.20	59.24	144.63	59.54	145.68	59.64



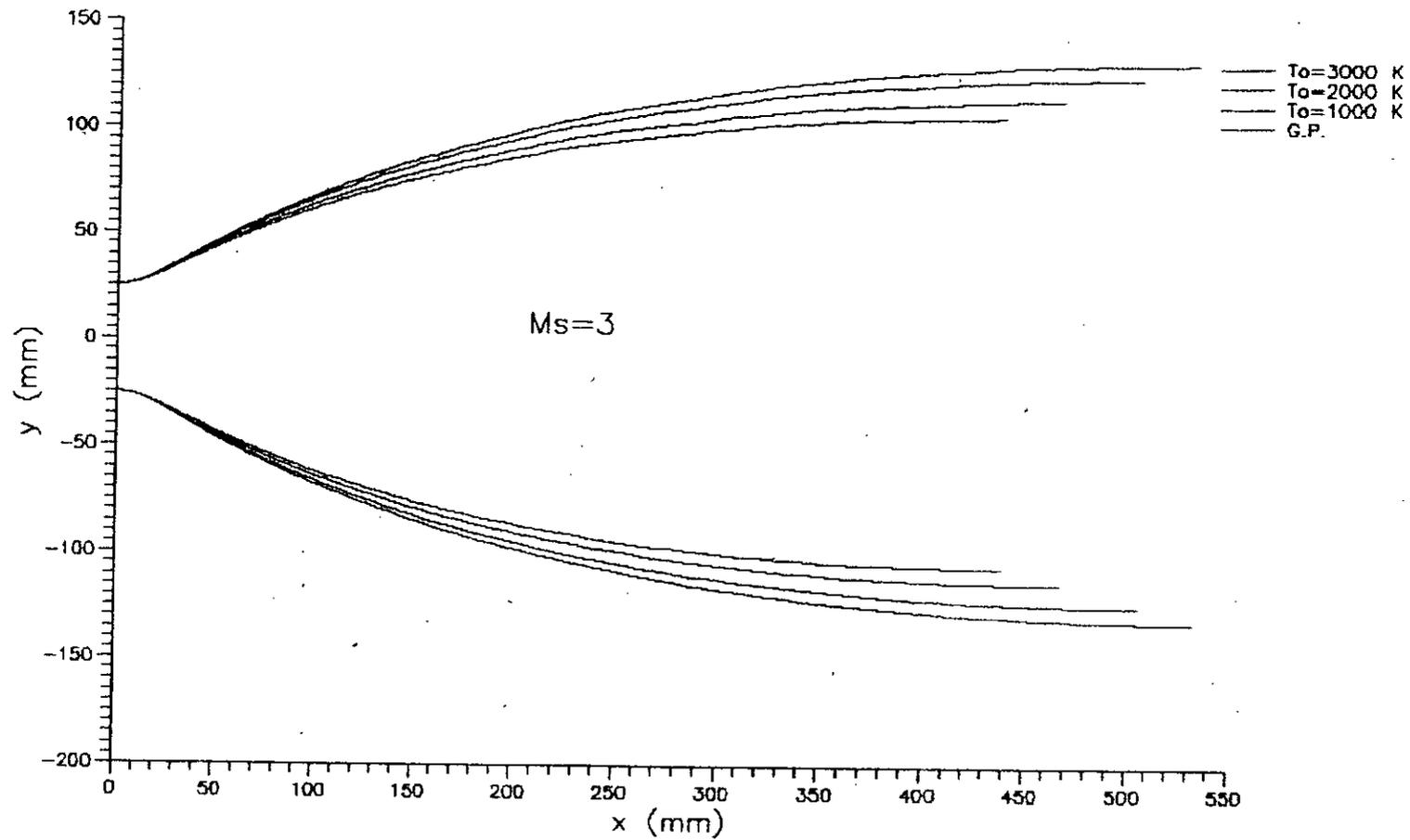
Graphe 5-2: Profils de tuyères supersoniques pour $Ms=2$

Tableau 5-2.

Coordonnées du profil de la paroi de la tuyère pour :

Ms=2

Gaz parfait		To=1000 K		To=2000 K		To=3000 K	
X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)
0.00	25.00	0.00	25.00	0.00	25.00	0.00	25.00
0.22	25.00	0.21	25.00	0.21	25.00	0.21	25.00
0.58	25.01	0.56	25.01	0.57	25.01	0.58	25.01
1.02	25.02	1.01	25.02	1.01	25.02	1.04	25.02
1.53	25.04	1.51	25.04	1.51	25.04	1.56	25.04
2.08	25.06	2.06	25.07	2.07	25.07	2.13	25.07
2.68	25.10	2.66	25.10	2.66	25.10	2.75	25.11
3.32	25.14	3.30	25.14	3.30	25.15	3.41	25.16
3.99	25.19	3.97	25.20	3.98	25.20	4.10	25.21
4.70	25.25	4.68	25.26	4.68	25.27	4.83	25.28
5.43	25.32	5.41	25.33	5.43	25.35	5.59	25.36
6.20	25.40	6.18	25.42	6.22	25.44	6.38	25.46
6.98	25.49	6.95	25.51	7.00	25.54	7.18	25.56
7.79	25.59	7.76	25.62	7.86	25.65	7.97	25.67
8.63	25.71	8.60	25.74	8.73	25.78	8.78	25.79
9.50	25.83	9.47	25.87	9.63	25.92	9.64	25.93
10.39	25.97	10.36	26.01	10.55	26.08	10.53	26.08
11.30	26.12	11.28	26.17	11.43	26.24	11.46	26.25
12.24	26.29	12.22	26.34	12.35	26.41	12.40	26.44
13.20	26.47	13.18	26.53	13.31	26.61	13.38	26.64
14.19	26.66	14.16	26.73	14.28	26.82	14.38	26.85
15.19	26.87	15.16	26.95	15.29	27.04	15.40	27.09
16.21	27.09	16.19	27.18	16.32	27.29	16.44	27.34
17.26	27.33	17.23	27.43	17.38	27.55	17.51	27.61
30.23	30.33	30.29	30.59	30.44	30.84	30.53	30.95
36.51	31.71	36.61	32.04	36.82	32.37	36.97	32.51
41.71	32.80	41.87	33.19	42.13	33.58	42.34	33.76
46.49	33.75	46.70	34.20	47.02	34.63	47.30	34.85
51.05	34.61	51.33	35.11	51.71	35.60	52.06	35.84
55.51	35.41	55.87	35.95	56.33	36.49	56.75	36.77
59.95	36.15	60.38	36.74	60.92	37.33	61.42	37.63
64.39	36.85	64.91	37.49	65.54	38.12	66.11	38.45
68.87	37.51	69.48	38.19	70.20	38.86	70.85	39.22
73.40	38.13	74.11	38.85	74.97	39.57	75.68	39.95
78.01	38.72	78.83	39.48	79.83	40.24	80.59	40.64
82.68	39.26	83.60	40.06	84.73	40.86	85.57	41.28
87.40	39.76	88.43	40.60	89.76	41.44	90.53	41.86
92.17	40.23	93.33	41.09	94.83	41.97	95.57	42.40
96.99	40.64	98.29	41.54	99.96	42.45	100.69	42.88
101.87	41.02	103.31	41.94	105.16	42.88	105.90	43.32
106.80	41.34	108.40	42.29	110.33	43.25	111.19	43.71
111.81	41.62	113.56	42.60	115.59	43.57	116.58	44.04
116.87	41.86	118.79	42.85	120.98	43.84	122.06	44.32
122.01	42.05	124.11	43.05	126.44	44.06	127.63	44.55
127.22	42.18	129.50	43.20	132.00	44.22	133.30	44.71
132.49	42.27	134.97	43.29	137.65	44.32	139.06	44.81
137.81	42.30	140.50	43.33	143.37	44.35	144.88	44.85



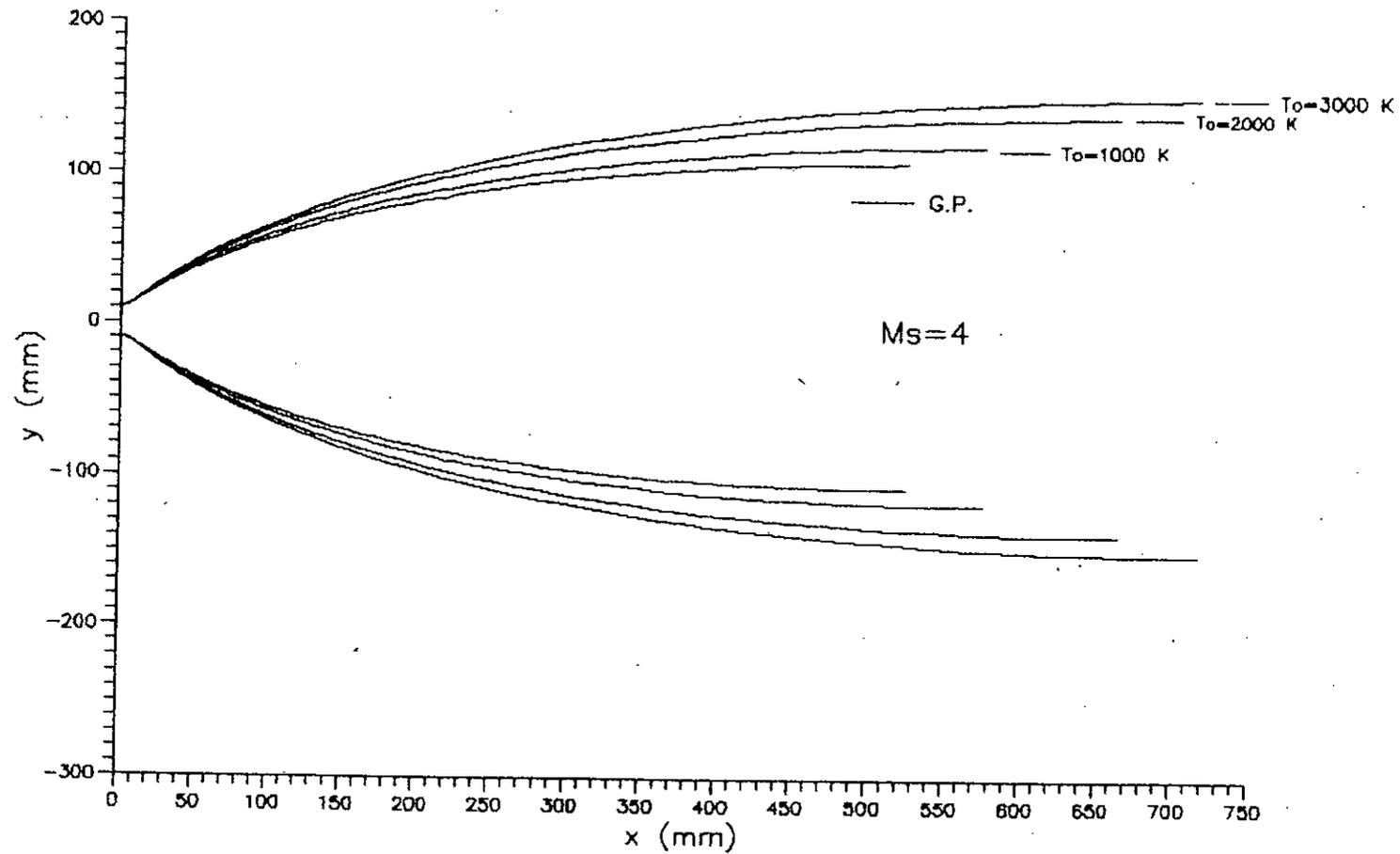
Graphe 5-3: Profils de tuyères supersoniques pour $Ms=3$

Tableau 5-3.

Coordonnées du profil de la paroi de la tuyère pour :

Ms=3

Gaz parfait		To=1000 K		To=2000 K		To=3000 K	
X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)
0.00	25.00	0.00	25.00	0.00	25.00	0.00	25.00
0.25	25.00	0.24	25.00	0.25	25.00	0.24	25.00
0.68	25.02	0.67	25.02	0.69	25.02	0.68	25.02
1.22	25.04	1.21	25.04	1.24	25.05	1.23	25.05
1.83	25.08	1.82	25.09	1.88	25.10	1.86	25.10
2.51	25.14	2.50	25.15	2.58	25.16	2.55	25.17
3.25	25.22	3.24	25.23	3.34	25.25	3.31	25.26
4.04	25.32	4.03	25.33	4.16	25.36	4.12	25.37
4.88	25.44	4.86	25.46	5.02	25.50	4.97	25.51
5.76	25.58	5.75	25.61	5.93	25.66	5.88	25.68
6.69	25.75	6.67	25.79	6.89	25.85	6.83	25.87
7.65	25.94	7.64	25.99	7.89	26.07	7.82	26.10
8.66	26.16	8.64	26.22	8.82	26.30	8.85	26.36
9.70	26.41	9.69	26.48	9.89	26.59	9.90	26.64
10.78	26.70	10.77	26.78	10.98	26.90	10.99	26.97
11.91	27.01	11.90	27.11	12.09	27.24	12.12	27.33
13.07	27.36	13.06	27.47	13.25	27.63	13.29	27.73
14.26	27.74	14.25	27.87	14.46	28.06	14.50	28.17
15.50	28.16	15.49	28.31	15.71	28.53	15.76	28.66
16.77	28.62	16.76	28.80	16.99	29.04	17.05	29.20
18.07	29.12	18.06	29.32	18.32	29.61	18.38	29.78
19.42	29.66	19.40	29.89	19.68	30.22	19.74	30.42
20.80	30.25	20.78	30.51	21.08	30.89	21.14	31.11
22.21	30.88	22.20	31.18	22.52	31.61	22.58	31.86
41.70	39.77	41.81	40.60	42.21	41.64	42.63	42.43
52.65	44.50	52.93	45.66	53.63	47.14	54.27	48.23
62.63	48.59	63.13	50.05	64.20	51.96	65.08	53.33
72.53	52.42	73.29	54.19	74.80	56.53	75.98	58.18
82.68	56.13	83.77	58.21	85.80	61.00	87.31	62.94
93.29	59.79	94.77	62.19	97.40	65.43	99.29	67.68
104.50	63.42	106.43	66.16	109.76	69.87	112.10	72.42
116.42	67.03	118.88	70.11	123.01	74.31	125.86	77.19
129.15	70.62	132.22	74.07	137.28	78.78	140.71	81.99
142.79	74.20	146.58	78.02	152.69	83.24	156.79	86.80
157.46	77.75	162.06	81.95	169.38	87.71	174.24	91.62
173.21	81.25	178.75	85.84	187.22	92.09	193.18	96.42
190.02	84.66	196.62	89.63	206.60	96.42	213.54	101.12
207.97	87.95	215.78	93.31	227.42	100.62	235.47	105.69
227.15	91.09	236.33	96.83	249.75	104.65	259.14	110.09
247.65	94.05	258.38	100.17	273.82	108.47	284.71	114.29
269.60	96.80	282.07	103.28	299.77	112.05	312.33	118.22
293.11	99.30	307.54	106.11	327.77	115.32	342.20	121.82
318.31	101.50	334.95	108.61	357.99	118.22	374.52	125.01
345.35	103.34	364.47	110.72	390.71	120.68	409.50	127.72
374.38	104.78	396.28	112.36	426.11	122.60	447.40	129.84
405.57	105.73	430.59	113.46	464.41	123.89	488.47	131.26
439.04	106.12	467.56	113.91	505.84	124.42	532.94	131.84



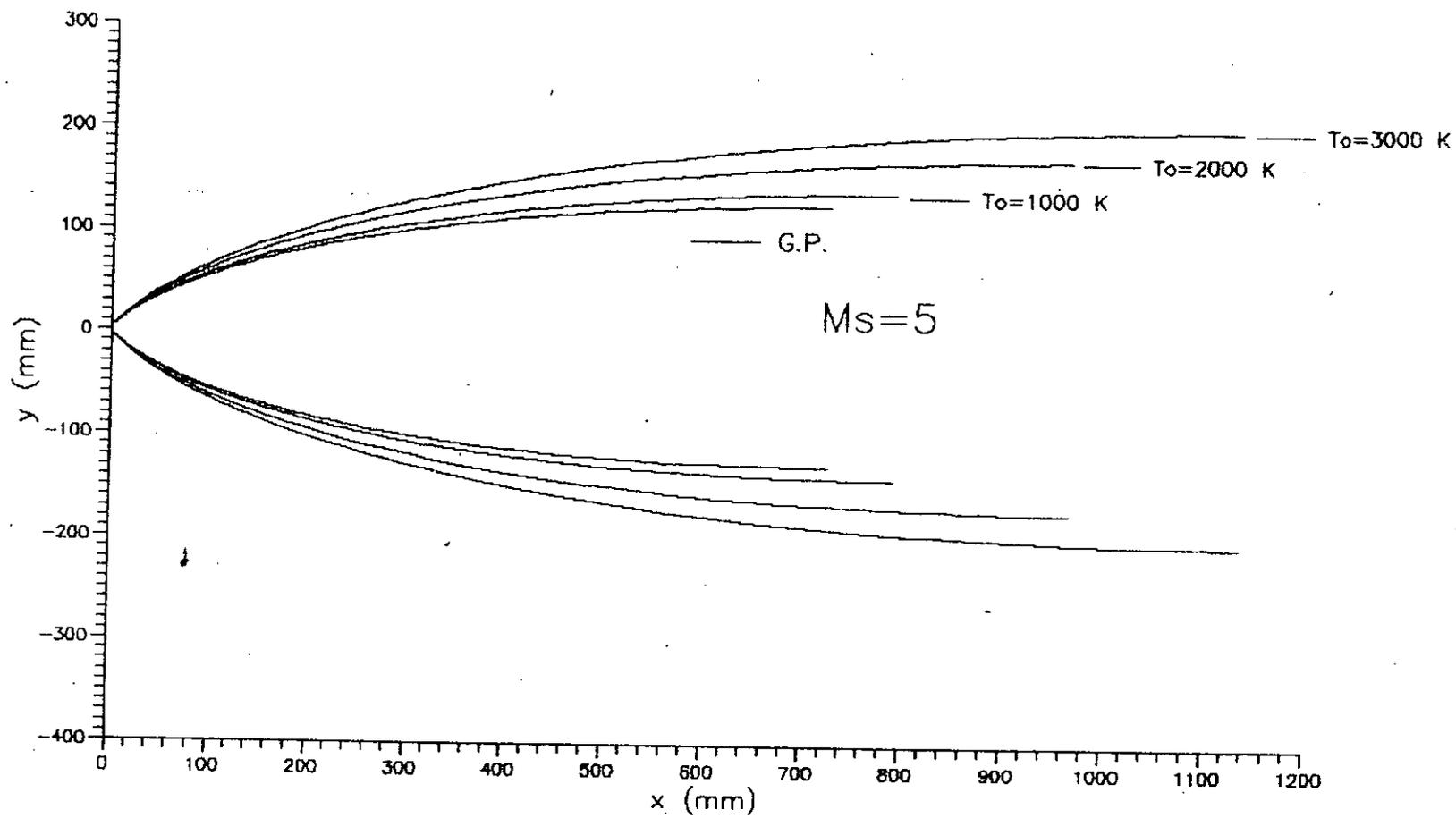
Graphe 5-4: Profils de tuyères supersoniques pour $Ms=4$

Tableau 5-4.

Coordonnées du profil de la paroi de la tuyère pour :

Ms= 4

Gaz parfait		To=1000 K		To=2000 K		To=3000 K	
X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)
0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00
0.11	10.00	0.10	10.00	0.10	10.00	0.10	10.00
0.29	10.01	0.29	10.01	0.29	10.01	0.29	10.01
0.53	10.02	0.52	10.03	0.53	10.03	0.53	10.03
0.80	10.05	0.79	10.05	0.81	10.05	0.81	10.06
1.10	10.08	1.09	10.09	1.11	10.09	1.11	10.10
1.42	10.13	1.41	10.13	1.45	10.14	1.44	10.15
1.77	10.19	1.76	10.19	1.80	10.21	1.80	10.22
2.14	10.26	2.13	10.27	2.18	10.29	2.18	10.30
2.53	10.34	2.53	10.36	2.59	10.39	2.58	10.40
2.95	10.44	2.94	10.46	3.01	10.50	3.00	10.51
3.38	10.56	3.37	10.58	3.45	10.63	3.45	10.65
3.84	10.69	3.82	10.72	3.91	10.78	3.91	10.80
4.31	10.84	4.30	10.88	4.38	10.95	4.38	10.98
4.80	11.02	4.79	11.06	4.87	11.13	4.88	11.18
5.32	11.21	5.30	11.26	5.38	11.35	5.40	11.40
5.85	11.42	5.83	11.48	5.91	11.59	5.94	11.65
6.40	11.66	6.38	11.73	6.46	11.86	6.49	11.93
6.97	11.93	6.95	12.01	7.03	12.15	7.07	12.24
7.56	12.22	7.53	12.31	7.63	12.48	7.67	12.58
8.17	12.54	8.14	12.65	8.24	12.84	8.28	12.96
8.80	12.89	8.77	13.02	8.87	13.24	8.92	13.37
9.45	13.27	9.41	13.42	9.53	13.67	9.57	13.82
10.12	13.69	10.08	13.85	10.20	14.15	10.24	14.32
20.06	20.00	20.03	20.51	20.25	21.36	20.46	21.95
26.33	23.75	26.38	24.50	26.83	25.79	27.19	26.66
32.48	27.22	32.66	28.22	33.42	29.97	33.98	31.13
38.99	30.68	39.35	31.95	40.51	34.20	41.32	35.67
46.08	34.23	46.67	35.79	48.35	38.58	49.47	40.40
53.92	37.90	54.81	39.80	57.14	43.18	58.65	45.38
62.65	41.74	63.93	43.99	67.06	48.04	69.05	50.66
72.45	45.75	74.21	48.40	78.33	53.17	80.91	56.26
83.47	49.95	85.84	53.03	91.16	58.60	94.47	62.19
95.92	54.34	99.04	57.90	105.82	64.34	110.02	68.48
110.02	58.92	114.05	62.99	122.62	70.38	127.87	75.12
125.98	63.67	131.13	68.30	141.85	76.71	148.38	82.09
143.95	68.53	150.47	73.77	163.67	83.24	171.80	89.33
164.21	73.48	172.38	79.35	188.54	89.94	198.57	96.78
187.07	78.46	197.24	85.00	216.99	96.78	229.22	104.38
212.91	83.42	225.48	90.65	249.53	103.67	264.35	112.05
242.16	88.28	257.64	96.23	286.82	110.50	304.68	119.67
275.34	92.95	294.32	101.61	329.64	117.13	351.15	127.10
313.04	97.30	336.24	106.65	378.89	123.39	404.73	134.12
355.97	101.18	384.26	111.16	435.66	129.02	466.62	140.45
404.95	104.37	439.39	114.91	501.27	133.73	538.28	145.75
460.97	106.62	502.84	117.57	577.26	137.09	621.46	149.54
525.16	107.61	576.03	118.73	665.50	138.57	718.20	151.22



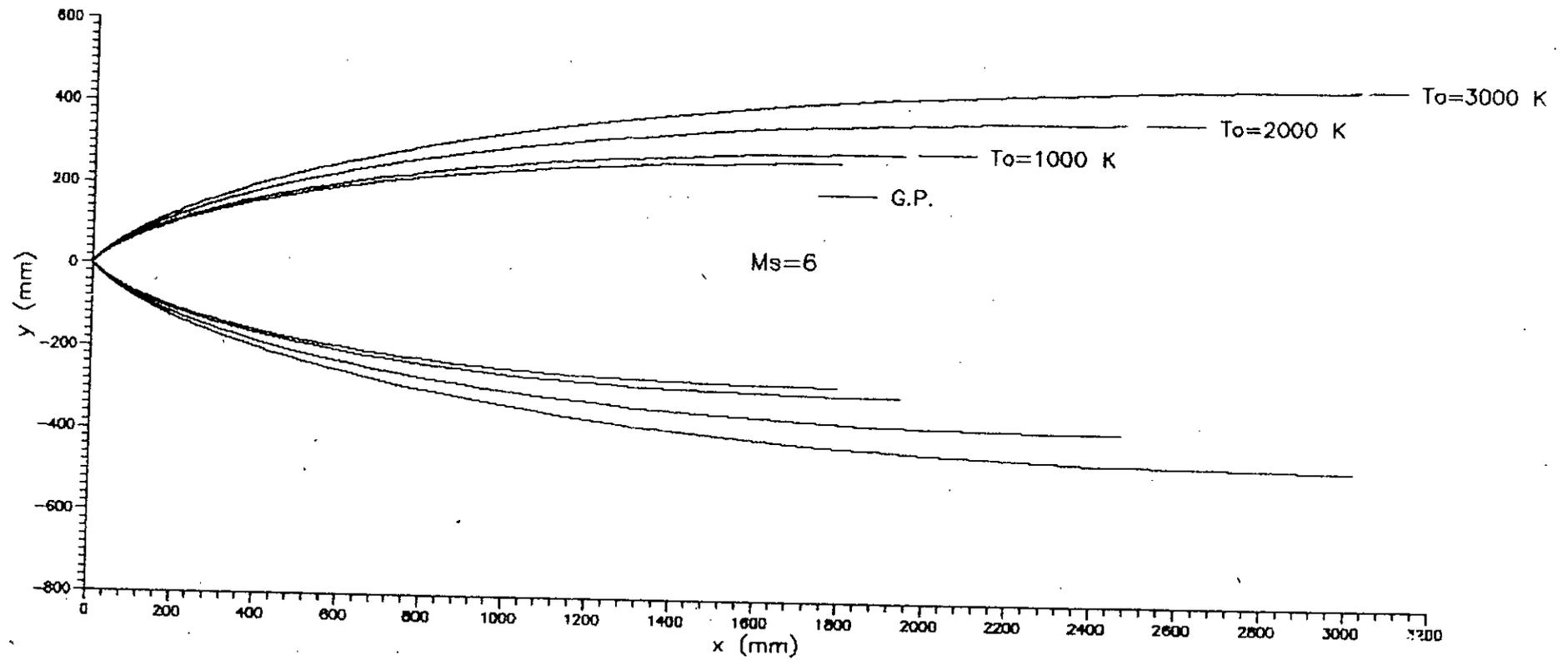
Graphe 5-5: Profils de tuyères supersoniques pour $M_s=5$

Tableau 5-5.

Coordonnées du profil de la paroi de la tuyère pour :

$M_s = 5$

Gaz parfait		$T_o = 1000 \text{ K}$		$T_o = 2000 \text{ K}$		$T_o = 3000 \text{ K}$	
X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)
0.00	5.00	0.00	5.00	0.00	5.00	0.00	5.00
0.05	5.00	0.05	5.00	0.05	5.00	0.05	5.00
0.15	5.01	0.15	5.01	0.15	5.01	0.15	5.01
0.28	5.02	0.27	5.02	0.28	5.02	0.28	5.02
0.42	5.03	0.41	5.03	0.42	5.03	0.42	5.03
0.57	5.05	0.57	5.05	0.58	5.06	0.58	5.06
0.75	5.08	0.74	5.08	0.76	5.09	0.76	5.09
0.93	5.12	0.93	5.12	0.94	5.13	0.95	5.13
1.13	5.16	1.12	5.16	1.15	5.18	1.15	5.19
1.34	5.21	1.33	5.22	1.36	5.24	1.36	5.25
1.56	5.28	1.55	5.28	1.58	5.31	1.59	5.32
1.79	5.35	1.78	5.36	1.82	5.39	1.83	5.41
2.04	5.44	2.03	5.45	2.07	5.49	2.07	5.51
2.29	5.53	2.28	5.55	2.32	5.59	2.33	5.62
2.56	5.64	2.55	5.66	2.58	5.71	2.60	5.75
2.84	5.77	2.82	5.79	2.86	5.85	2.88	5.90
3.13	5.91	3.11	5.94	3.15	6.00	3.17	6.06
3.43	6.07	3.41	6.10	3.45	6.18	3.48	6.24
3.74	6.24	3.72	6.28	3.76	6.37	3.79	6.45
4.07	6.43	4.04	6.48	4.08	6.59	4.12	6.68
4.41	6.65	4.37	6.70	4.42	6.83	4.46	6.93
4.76	6.88	4.72	6.94	4.76	7.09	4.81	7.21
5.12	7.14	5.07	7.21	5.12	7.38	5.17	7.52
5.49	7.43	5.44	7.51	5.49	7.70	5.54	7.86
11.36	12.01	11.26	12.27	11.38	12.91	11.56	13.50
15.41	14.97	15.31	15.36	15.58	16.38	15.93	17.31
19.63	17.86	19.56	18.41	20.07	19.85	20.65	21.16
24.32	20.89	24.33	21.62	25.17	23.53	26.07	25.27
29.69	24.13	29.80	25.06	31.09	27.53	32.42	29.78
35.91	27.64	36.17	28.81	38.06	31.91	39.95	34.75
43.17	31.46	43.64	32.90	46.31	36.74	48.94	40.27
51.68	35.63	52.44	37.38	56.13	42.08	59.71	46.40
61.70	40.18	62.84	42.30	67.84	47.97	72.66	53.22
73.53	45.15	75.19	47.67	81.87	54.47	88.27	60.78
87.56	50.56	89.88	53.55	98.71	61.64	107.15	69.16
104.20	56.42	107.40	59.96	118.96	69.49	129.98	78.40
123.86	62.71	128.20	66.86	143.18	78.01	157.48	88.49
147.13	69.41	152.95	74.24	172.23	87.20	190.68	99.44
174.75	76.50	182.46	82.09	207.19	97.05	230.93	111.25
207.61	83.92	217.78	90.35	249.40	107.49	279.83	123.85
246.83	91.58	260.18	98.92	300.52	118.43	339.44	137.12
293.83	99.35	311.27	107.66	362.69	129.67	412.38	150.84
350.33	106.99	373.09	116.32	438.59	140.91	502.01	164.64
418.59	114.21	448.25	124.54	531.72	151.67	612.65	177.94
501.36	120.52	540.06	131.78	646.56	161.24	749.98	189.84
602.27	125.27	652.84	137.26	788.99	168.55	921.43	198.98
725.93	127.46	792.18	139.82	966.73	172.00	1136.69	203.31



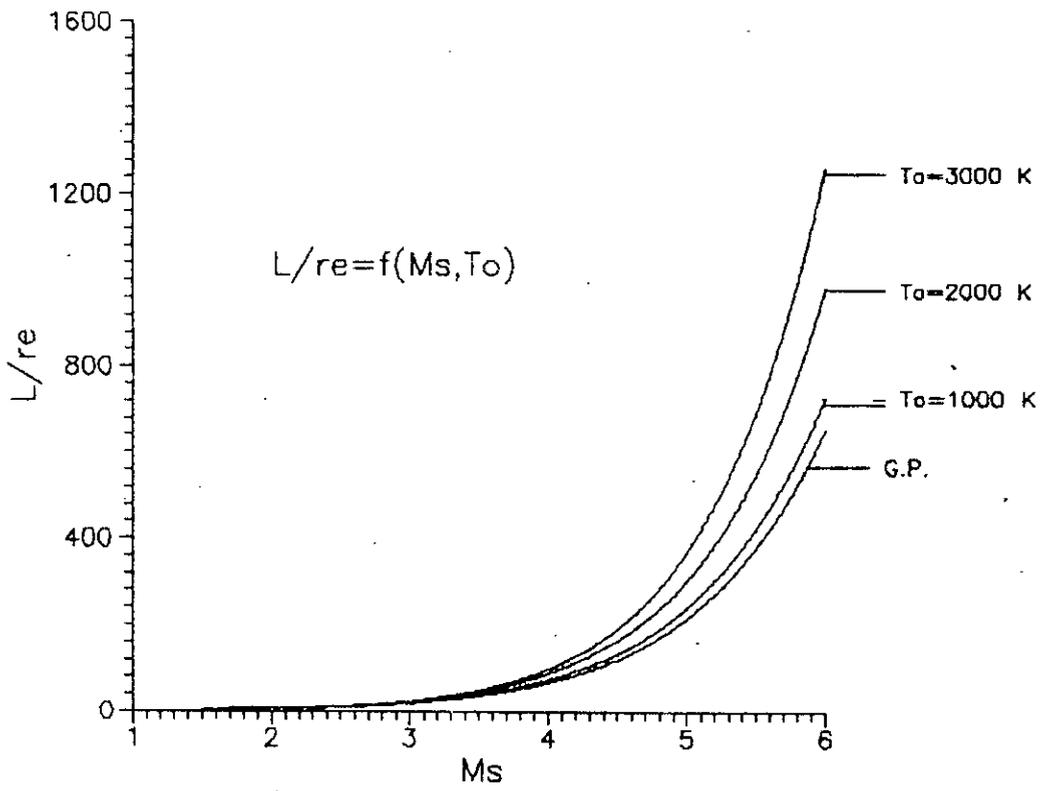
Graphe 5-6: Profils de tuyères supersoniques pour $Ms=6$.

Tableau 5-6.

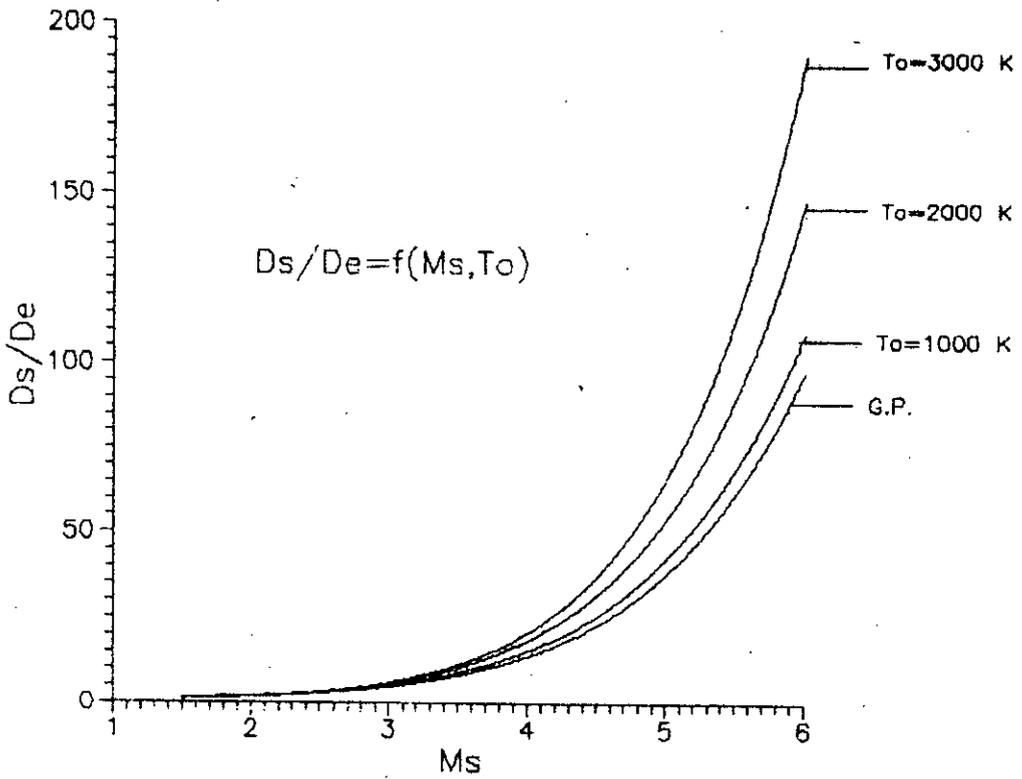
Coordonnées du profil de la paroi de la tuyère pour :

Ms=6

Gaz parfait		To=1000 K		To=2000 K		To=3000 K	
X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)
0.00	5.00	0.00	5.00	0.00	5.00	0.00	5.00
0.06	5.00	0.05	5.00	0.05	5.00	0.06	5.00
0.16	5.01	0.15	5.01	0.16	5.01	0.16	5.01
0.28	5.02	0.28	5.02	0.28	5.02	0.29	5.02
0.43	5.03	0.43	5.04	0.43	5.04	0.43	5.04
0.59	5.06	0.59	5.06	0.60	5.06	0.60	5.07
0.77	5.09	0.76	5.09	0.78	5.10	0.78	5.10
0.96	5.13	0.96	5.14	0.97	5.15	0.98	5.15
1.17	5.18	1.16	5.19	1.18	5.20	1.19	5.21
1.39	5.25	1.38	5.25	1.40	5.27	1.41	5.28
1.62	5.32	1.61	5.33	1.64	5.35	1.64	5.37
1.86	5.40	1.85	5.41	1.88	5.45	1.89	5.47
2.12	5.50	2.10	5.52	2.14	5.56	2.15	5.58
2.39	5.62	2.37	5.63	2.41	5.68	2.42	5.72
2.67	5.75	2.65	5.77	2.68	5.82	2.71	5.87
2.97	5.90	2.94	5.92	2.97	5.98	3.00	6.04
3.27	6.07	3.24	6.09	3.28	6.17	3.31	6.24
3.59	6.25	3.56	6.28	3.60	6.37	3.63	6.45
3.93	6.46	3.89	6.50	3.92	6.61	3.96	6.70
4.27	6.70	4.23	6.74	4.27	6.86	4.31	6.98
4.63	6.96	4.58	7.00	4.62	7.15	4.67	7.28
5.01	7.24	4.95	7.30	4.99	7.47	5.04	7.62
5.40	7.56	5.33	7.62	5.37	7.83	5.42	8.00
5.80	7.92	5.72	7.98	5.76	8.22	5.81	8.42
12.41	13.85	12.23	14.08	12.32	14.91	12.51	15.70
17.28	17.93	17.06	18.30	17.34	19.66	17.75	20.97
22.61	22.10	22.37	22.64	22.96	24.61	23.68	26.51
28.79	26.62	28.57	27.36	29.61	30.07	30.80	32.69
36.13	31.64	35.97	32.61	37.65	36.22	39.50	39.70
44.96	37.27	44.90	38.52	47.49	43.20	50.24	47.73
55.65	43.61	55.76	45.20	59.58	51.16	63.57	56.95
68.66	50.76	69.02	52.76	74.51	60.25	80.18	67.57
84.55	58.85	85.30	61.33	93.03	70.66	100.96	79.81
104.04	67.99	105.33	71.05	116.08	82.56	127.03	93.92
128.04	78.32	130.11	82.07	144.86	96.18	159.85	110.16
157.66	89.94	160.81	94.52	180.90	111.70	201.23	128.78
194.14	102.92	198.78	108.47	225.88	129.23	253.35	150.00
239.19	117.33	245.91	124.03	282.26	148.96	319.25	174.06
295.07	133.24	304.65	141.28	353.27	171.05	402.90	201.20
364.67	150.65	378.23	160.26	443.16	195.59	509.68	231.58
451.83	169.49	470.91	180.92	557.61	222.56	646.70	265.22
561.60	189.54	588.37	203.03	704.27	251.74	823.69	301.89
700.73	210.34	738.28	226.12	893.57	282.55	1054.03	340.91
878.35	231.07	931.09	249.30	1139.90	313.83	1356.30	380.84
1106.89	250.30	1181.25	270.98	1463.41	343.42	1756.70	418.94
1403.54	265.65	1508.90	288.43	1892.66	367.55	2292.64	450.26
1792.33	273.21	1942.89	297.12	2468.76	379.70	3018.81	466.17



Graph 5-7: $L/re = f(Ms, T_o)$



Graph 5-8: $D_s/D_e = f(M_s, T_o)$

ETUDE DE L'ÉCOULEMENT REEL DANS UNE TUYERE

SUPERSONIQUE A HAUTES TEMPERATURES

6-1. Introduction

Dans le chapitre précédent, on a déterminé les caractéristiques thermodynamiques et géométriques de l'écoulement à la paroi de la tuyère sans prendre en considération l'effet de la viscosité, où le fluide était supposé glissé sans frottement sur la paroi, or en réalité il s'y adhère, et sa vitesse est nulle à la paroi, et croît au fur et à mesure qu'on s'éloigne de celle-ci, jusqu'à atteindre sa valeur de l'écoulement incident à la frontière de la couche limite. Dans ce chapitre on considèrera le cas d'écoulement réel, en tenant compte toujours des caractéristiques thermodynamiques et géométriques déterminées dans le cas de l'écoulement parfait qui constitueront d'ailleurs, les valeurs de ceux de l'écoulement libre à la frontière de la couche limite, et ce dans le but d'évaluer les épaisseurs caractéristiques de celle-ci, ainsi que la température de la paroi en considérant toujours, l'effet de la haute température sur les propriétés du fluide. D'autre part, pour une approche plus réelle du problème, on tiendra compte de l'axisymétrie de l'écoulement. Au terme de cette étude (chapitre 7), on comparera les résultats obtenus avec des résultats expérimentaux, qui s'avèreront d'ailleurs en bonne concordance.

6-2. Hypothèses

Dans cette étude on adoptera les hypothèses suivantes:

1- la couche limite est calculée à partir du col de la tuyère, car dans le convergent, il s'établit un gradient de pression négatif qui tend à plaquer la couche limite sur la paroi favorisant ainsi la diminution de son épaisseur selon le schéma de la figure suivante:

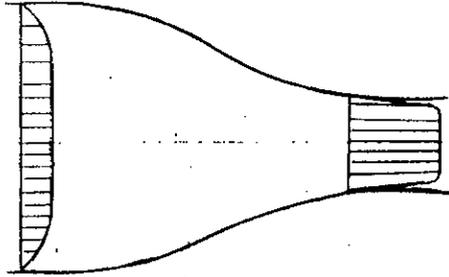


Fig.6-1: Evolution de la couche limite dans le convergent d'une tuyère convergente-divergente.

D'autres parts, on remarque qu'à la sortie du convergent, la vitesse est uniformément répartie dans la plus grande partie de la section du col.

On considère donc les conditions aux limites suivantes :

$$\text{à } x = 0 : \quad \delta = 0 \quad \text{et} \quad \delta_2 = 0$$

(où δ et δ_2 sont respectivement l'épaisseur de la couche limite et l'épaisseur de quantité de mouvement.)

Quoique en réalité δ au col a une valeur fixe mais très petite [3,5,9,12] qu'on ne prendra pas en considération, car le but de cette étude, est la détermination de l'augmentation relative de l'épaisseur de la couche limite tout au long du divergent.

2- la couche limite qui se développe dans le divergent est supposée laminaire, car d'après [12], il s'établit dans le divergent un gradient de pression qui provoque un phénomène de transition qui fait renverser le régime turbulent (qui sévit dans le volume du divergent) vers un régime laminaire près de la paroi.

3- le fluide est compressible et thermiquement parfait mais calorifiquement imparfait [1], et on considère que ses propriétés thermophysiques telles que le nombre de Prandtl (fig. 5-1) et la viscosité, à l'instar de C_p et γ , variables par tranches d'écoulement selon le maillage considéré.

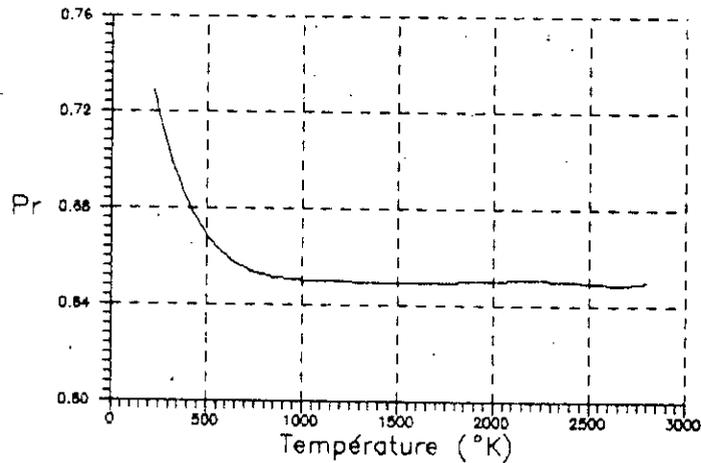


Fig.6-2: Variation du nombre de Prandtl avec la température (d'après des données numériques pour l'air [12]).

d'après la figure précédente, on peut supposer que Pr peut être calculé par la relation suivante:

$$Pr = a_3 + b_3 \cdot T + c_3 \cdot T^2 \quad (6-1)$$

où a_3 , b_3 et c_3 sont des constantes déterminées numériquement par la méthode des moindres carrées. Quant à la viscosité, elle peut être déterminée par la relation de Sutherland [14]:

$$\mu = \frac{1,49 \cdot T^{3/2}}{T + 120} \cdot 10^{-6} \quad (6-2)$$

(où μ est mesurée en m^2/s et T en °K)

4- l'écoulement est réel, établi et bidimensionnel dans une première étape, puis à l'aide d'une transformation appropriée

(paragraphe 6-8), on déterminera les caractéristiques de l'écoulement dans le cas axisymétrique.

5- la paroi du divergent est adiabatique, c'est à dire:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0} = 0$$

6-3. Equations de base de la couche limite laminaire

En considérant les hypothèses émises dans le paragraphe précédent, et en tenant compte aussi des simplifications de Prandtl [9], les équations globales de la couche limite laminaire s'écrivent:

- équation de continuité :

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} = 0 \quad (6-3)$$

- équation de quantité de mouvement :

$$u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx} + \nu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (6-4)$$

- équation de l'énergie :

$$u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\nu}{C_p} \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \quad (6-5)$$

6-4. Modification des équations de quantité de mouvement et d'énergie

Dans le but de simplifier le problème, la majorité des méthodes approximatives de résolution de la couche limite laminaire en fluide compressible, sont basées sur les équations intégrales de quantité de mouvement et d'énergie [9], qui sont en fait des modifications des équations de bases (6-4) et (6-5), en les intégrant et en introduisant les définitions des épaisseurs caractéristiques de la couche limite à savoir δ , δ_1 ,

δ_2 , δ_3 , δ_H et δ_u qui sont définies selon les relations suivantes:

- épaisseur de déplacement :

$$\delta_1 = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{\rho \cdot u}{\rho_e \cdot U_e} \right) \cdot dy \quad (6-6)$$

- épaisseur de quantité de mouvement :

$$\delta_2 = \int_0^{\delta} \frac{\rho u}{\rho_e \cdot U_e} \cdot \left(1 - \frac{u}{U_e} \right) \cdot dy \quad (6-7)$$

- épaisseur d'énergie :

$$\delta_3 = \int_0^{\delta} \frac{\rho u}{\rho_e \cdot U_e} \cdot \left(1 - \frac{u^2}{U_e^2} \right) \cdot dy \quad (6-8)$$

- épaisseur d'enthalpie :

$$\delta_H = \int_0^{\delta} \frac{\rho u}{\rho_e \cdot U_e} \cdot \left(\frac{h}{h_e} - 1 \right) \cdot dy \quad (6-9)$$

- épaisseur de vitesse :

$$\delta_u = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U_e} \right) \cdot dy \quad (6-10)$$

h_e est l'enthalpie statique de l'écoulement libre, elle est donnée par :

$$h_e = C_p \cdot T_e = \frac{U_e^2}{\gamma - 1} \quad (6-11)$$

(C_p étant considérée constante par tranche infinitésimale d'écoulement, hypothèse 3 du paragraphe 6-2).

L'équation intégrale de quantité de mouvement s'obtient à partir des équations (6-3) et (6-4), après intégration et en faisant introduire les épaisseur δ_1 et δ_2 , il vient:

$$\frac{d\delta_2}{dx} + \frac{\delta_2}{U_e} \cdot \frac{dU_e}{dx} \cdot \left(2 + \frac{\delta_1}{\delta_2} - M^2 \right) = \frac{\mu_p}{\rho_e \cdot U_e^2} \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_p \quad (6-12)$$

qui est dite aussi équation de Van Kármán.

L'équation intégrale de l'énergie, s'obtient [9] en combinant les équations (6-3), (6-4) et (6-5) ensuite par intégration de l'expression obtenue et en faisant introduire l'épaisseur δ_3 et le nombre de Mach, en remarquant aussi que :

$$\delta_H = \frac{\gamma-1}{2} \cdot M^2 \cdot \delta_3 \quad (6-13)$$

il vient :

$$\frac{d\delta_3}{dx} + \frac{\delta_3}{U_e} \cdot \frac{dU_e}{dx} \cdot \left(3 - (2-\gamma) \cdot M^2 \right) = \frac{2}{\rho_e \cdot U_e^3} \cdot \int_0^{\delta} \mu_p \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \cdot dy$$

..... (6-14)

6-5. Méthode de calcul de la couche limite laminaire dans le divergent d'une tuyère supersonique avec effet de la haute température

La méthode approximative qui sera utilisée dans cette étude, est basée sur l'algorithme de E. Gruschwitz [9], qu'on adoptera comme procédure de résolution. Cette méthode est applicable à une paroi adiabatique de forme géométrique quelconque, qui à l'instar de la méthode de Paulhausen [9,13,12], admet une distribution polynomiale du quatrième degré de la vitesse telle que :

$$\frac{u}{U_e} = c_1 \cdot \eta + c_2 \cdot \eta^2 + c_3 \cdot \eta^3 + c_4 \cdot \eta^4 \quad (6-15)$$

avec η une variable d'espace adimensionnelle définie par :

$$\eta = \frac{1}{\delta'} \cdot \int_0^y \frac{\rho}{\rho_e} \cdot dy \quad (6-16)$$

on définit : $\delta'(x) = \int_0^{\delta(x)} \frac{\rho}{\rho_e} \cdot dy \quad (6-17)$

ceci vérifie les conditions aux limites suivantes :

$$\eta = 0 \quad \text{pour } y = 0$$

$$\eta = 1 \quad \text{pour } y = \delta$$

Il est à noter que les axes de coordonnées sont définies selon le schéma de la figure suivante :

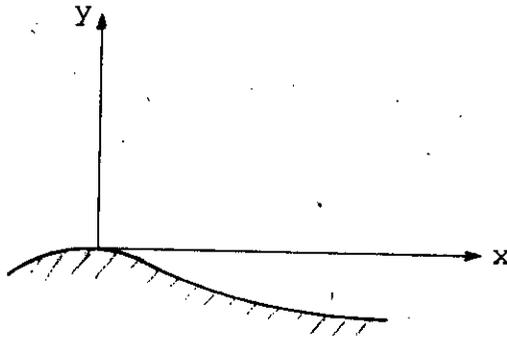


Fig.6-3: Définition des axes de coordonnées (origine au col).

Les constantes c_1 , c_2 , c_3 et c_4 , présentes dans la relation (6-15), se calculent d'après les conditions aux limites suivantes :

$$y = 0 \quad ; \quad u = 0 \quad ; \quad v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx} = -U_e \cdot \frac{dU_e}{dx}$$

$$y = \delta \quad ; \quad u = U_e \quad ; \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

ce qui donne :

$$c_1 = 2 + \frac{\lambda}{6} \quad ; \quad c_2 = -\frac{\lambda}{2} \quad ; \quad c_3 = \frac{\lambda}{2} - 2 \quad ; \quad c_4 = 1 - \frac{\lambda}{6}$$

$$\text{où :} \quad \lambda = \frac{\rho_e}{\rho_p} \cdot \frac{\delta'^2}{v_e} \cdot \frac{dU_e}{dx} \quad (6-18)$$

est un facteur caractérisant la forme du profil des vitesses .

D'autre part, on suppose aussi une distribution polynômiale de l'enthalpie (qui va de soit avec la température, équation (6-11)), on peut écrire [9] :

$$\left(1 - \frac{u}{U_e}\right) \cdot \frac{\rho_e}{\rho} = b + b_1 \cdot \eta + b_2 \cdot \eta^2 + b_3 \cdot \eta^3 + b_4 \cdot \eta^4 + b_5 \cdot \eta^5$$

..... (6-19)

en considérant la condition à la paroi, on a :

$$\text{à } \eta = 0 \quad , \quad \rho = \rho_p \quad \text{et} \quad u = 0$$

$$\text{on a :} \quad b = \frac{\rho_e}{\rho_p}$$

Puisque la pression P(x), qui se détermine par l'équation de Bernoulli, reste constante à travers l'épaisseur de la couche limite ($\partial P / \partial y = 0$), alors on a :

$$b = \frac{\rho_e}{\rho_p} = \frac{T_p}{T_e} \quad (6-20)$$

parmi toutes les constantes figurant dans l'équation (6-19), b est la seule constante qui reste indéterminée (on ne connaît pas à priori ρ_p ni T_p) étant donné qu'on a seulement cinq conditions aux limites connues qui sont :

$$\eta=0 : u=0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial T}{\partial y}=0$$

$$\eta=1 : u=U_e ; \quad \frac{\partial u}{\partial y}=0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}=0$$

La constante b sera déduite ultérieurement à partir de l'équation intégrale de l'énergie. Cette constante présente un intérêt particulier dans la mesure où elle permet d'évaluer la température à la paroi qui est l'un des principaux buts de notre étude.

Introduisons à présent un second facteur de forme noté par K , caractérisant aussi, à l'instar de λ , le profil des vitesses dans la couche limite tel que :

$$K = \lambda \cdot \left(\frac{\delta_2}{\delta'} \right)^2 = b \cdot \frac{\delta_2^2}{\nu_e} \cdot \frac{dU_e}{dx} \quad (6-21)$$

D'autres parts, en remplaçant les constantes c_1 , c_2 , c_3 et c_4 dans la relation (6-15), et en introduisant les expressions des épaisseurs δ , δ_1 , δ_2 et δ_3 et après intégration, on aboutit aux relations suivantes :

$$\frac{\delta_1}{\delta'} = \frac{10}{3} - \frac{1}{120} \cdot \lambda \quad (6-22)$$

$$\frac{\delta_2}{\delta'} = \frac{1}{63} \cdot \left(\frac{37}{35} - \frac{1}{15} \cdot \lambda - \frac{1}{144} \cdot \lambda^2 \right) \quad (6-23)$$

$$\frac{\delta_3}{\delta'} = \frac{798048 - 4656 \cdot \lambda - 758 \cdot \lambda^2 - 7 \cdot \lambda^3}{4324320} \quad (6-24)$$

En introduisant ces variables dans les équations intégrales (6-12) et (6-14), et après simplification et regroupement des termes [9], il vient :

$$\frac{\delta_2 \cdot U_e}{\nu_e} \cdot \frac{d\delta_2}{dx} = F_1(K) - \frac{K}{b} \cdot \left(2 - M^2 \cdot F_2(K) \right) \quad (6-25)$$

$$\text{et } b = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M^2 \right) \cdot \frac{1 + M^2 \cdot F_3(K)}{1 + M^2 \cdot F_4(K)} \quad (6-26)$$

où F_1 , F_2 , F_3 et F_4 sont des fonctions données par :

$$F_1(K) = 2 \cdot \frac{\delta_2}{\delta'} \cdot \left(1 - \frac{1}{15} \cdot \lambda + \frac{1}{240} \cdot \lambda^2 \right) \quad (6-27)$$

$$F_2(K) = 1 - \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{\delta'}{\delta_2} \cdot \left(\frac{\delta_3}{\delta'} - Pr \cdot \frac{(12+\lambda)^2}{2160} \right) \quad (6-28)$$

$$F_3(K) = \frac{\gamma-1}{2} \cdot \left\{ 2 - \frac{\delta'}{\delta_2} \cdot \left(\frac{\delta_3}{\delta'} - Pr \cdot \frac{(12+\lambda)^2}{2160} \right) \right\} \quad (6-29)$$

$$F_4(K) = \frac{\gamma-1}{2} \cdot \left\{ 2 - \frac{\delta'}{\delta_2} \cdot \left(\frac{\delta_3}{\delta'} - \frac{(12+\lambda)^2}{2160} \right) \right\} \quad (6-30)$$

Les équations (6-25) et (6-26) constituent les modifications des équations intégrales de quantité de mouvement et d'énergie.

D'autre part, la contrainte de cisaillement est donnée par :

$$\frac{\tau_p}{\rho_e \cdot U_e^2} = \frac{\nu_e}{U_e \cdot \delta'} \cdot \left(2 + \frac{1}{6} \cdot \lambda \right) \quad (6-31)$$

(car : $\tau_p = \mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_p$)

d'après l'expression précédente, on remarque que le point de décollement apparaît lorsque $\lambda = -12$, c'est à dire à partir du moment où la contrainte de cisaillement à la paroi s'anulle, d'où l'intérêt de cette méthode de GRUSCHWITZ qui prédit le point de décollement de la couche limite pour une vitesse donnée d'un fluide visqueux sur une paroi adiabatique avec présence d'un gradient de pression, donc l'équation (6-31) se présente comme un moyen de contrôle de la convergence lors des calculs.

6-6. Conditions aux limites

A $x=0$ correspondant à la section au col, l'épaisseur de la couche limite δ ainsi que l'épaisseur de quantité de mouvement δ_2 sont nulles, étant donné qu'on a supposé que la couche limite se développe à partir du col de la tuyère, d'après l'équation (6-25), on a :

$$F_1(K) - \frac{K}{b} \cdot \left(2 - M^2 \cdot F_2(K) \right) = 0 \quad (6-32)$$

au col : $M = 1$, $K = K_0$

$$\text{et } b = b_0 = \frac{\gamma+1}{2} \cdot \frac{1 + F_3(K_0)}{1 + F_4(K_0)} \quad (6-33)$$

en portant cela dans l'équation (6-32) il s'en suit :

$$\frac{F_1(K_0)}{2 - F_2(K_0)} = \frac{2 \cdot K_0}{\gamma+1} \cdot \frac{1 + F_3(K_0)}{1 + F_4(K_0)} \quad (6-34)$$

la solution de cette équation fournit la valeur initiale du facteur de forme K_0 pour un gaz donné .

Remarque sur la précision de la méthode de GRUSCHWITZ

D'après [9,12], cette méthode est plus précise lorsqu'il s'agit d'un gradient de pression négatif, tel notre cas. Cependant, lorsque le gradient de pression est positif, ou à l'approche du point de décollement, elle perd cette précision et peut diverger.

6-7. Résolution

le problème revient à résoudre le système d'équations (6-25) et (6-26) avec la condition initiale exprimée par l'équation (6-34), posons :

$$z = \delta_2^2 \quad (6-35)$$

l'équation (6-25) exprimée en un point i de la paroi devient :

$$\left(\frac{dz}{dx}\right)_i = \frac{2 \cdot v_{ei}}{U_{ei}} \cdot \left\{ F_1(K_1) - \frac{K_1}{b_1} \cdot \left(2 - M_1^2 \cdot F_2(K_1) \right) \right\} \quad (6-36)$$

qui est une équation différentielle non linéaire, qu'on peut résoudre numériquement de la manière suivante, posons :

$$\left(\frac{dz}{dx}\right)_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (6-37)$$

d'où :

$$z_{i+1} = \frac{2 \cdot v_{ei} \cdot (x_{i+1} - x_i)}{U_{ei}} \cdot \left\{ F_1(K_1) - \frac{K_1}{b_1} \cdot \left(2 - M_1^2 \cdot F_2(K_1) \right) \right\} + z_i \quad \dots (6-38)$$

En commençant les calculs à partir du col ($i=0$), où toutes les valeurs initiales présentes dans l'équation précédente sont connues, on peut déterminer l'épaisseur de quantité de mouvement δ_2 en chaque point de la paroi de la tuyère.

D'autre part, au point ($i+1$) où on a déterminé δ_2 , le facteur de forme K s'exprime avec :

$$\left(\frac{dU_e}{dx} \right)_{i+1} = \frac{U_{e_{i+1}} - U_{e_i}}{X_{i+1} - X_i} \quad (6-39)$$

par :

$$K_{i+1} = b_{i+1} \cdot \frac{z_{i+1}}{v_{e_{i+1}}} \cdot \frac{U_{e_{i+1}} - U_{e_i}}{X_{i+1} - X_i} \quad (6-40)$$

Le terme b_{i+1} se retrouve en couplant la dernière relation avec l'équation suivante :

$$b_{i+1} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M_{i+1}^2 \right) \cdot \frac{1 + M_{i+1}^2 \cdot F_3(K_{i+1})}{1 + M_{i+1}^2 \cdot F_4(K_{i+1})} = \frac{T_{p_{i+1}}}{T_{e_{i+1}}} \quad (6-41)$$

de cette dernière relation on détermine la température tout au long de la paroi du divergent de la tuyère.

En résumé, le problème revient à résoudre le système couplé d'équations différentielles non linéaires (6-21), (6-25) et (6-26) qui après discrétisation devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} z_{i+1} = \frac{2 \cdot v_{e_i} \cdot (X_{i+1} - X_i)}{U_{e_i}} \cdot F(K_i) + z_i \end{array} \right. \quad (6-42)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{i+1} = b_{i+1} \cdot \frac{z_{i+1}}{v_{e_{i+1}}} \cdot \frac{U_{e_{i+1}} - U_{e_i}}{X_{i+1} - X_i} \end{array} \right. \quad (6-43)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{i+1} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M_{i+1}^2 \right) \cdot \frac{1 + M_{i+1}^2 \cdot F_3(K_{i+1})}{1 + M_{i+1}^2 \cdot F_4(K_{i+1})} = \frac{T_{p_{i+1}}}{T_{e_{i+1}}} \end{array} \right. \quad (6-44)$$

avec :

$$z_1 = \delta_{21}^2 \quad (6-45)$$

$$F(K_1) = F_1(K_1) - \frac{K_1}{b_1} \cdot \left(2 - M_1^2 \cdot F_2(K_1) \right) \quad (6-46)$$

Les épaisseurs δ' , δ_1 et δ_3 se déterminent respectivement à l'aide des relations (6-22), (6-23) et (6-24). Quant à l'épaisseur δ de la couche limite laminaire, elle peut être déterminée par la relation suivante [7] :

$$\frac{\delta_1}{\delta} = \frac{3}{10} \quad (6-47)$$

En comparant l'équation précédente avec l'équation (6-22), on constate que δ et δ' sont assez proches pour négliger la différence, car dans les meilleurs des cas l'écart est de 0,1 mm étant donné que la valeur maximale du facteur de forme λ est de 12 qui correspond au point de décollement.

6-8. Considérations sur l'axisymétrie de l'écoulement

Il existe une méthode dite: "transformation de Mangler" [9] qui permet de retrouver les caractéristiques de la couche limite dans le cas axisymétrique à partir du cas bidimensionnel qu'on a traité auparavant, cette méthode consiste à faire la transformation des coordonnées et des vitesses à l'aide des relations suivantes :

$$x = \frac{1}{L^2} \cdot \int_0^{\bar{x}} r^2(\bar{x}) \cdot d\bar{x} \quad (6-48)$$

$$y = \frac{r(\bar{x})}{L} \cdot \bar{y} \quad (6-49)$$

$$u = \bar{u} \quad (6-50)$$

$$v = \frac{L}{r} \cdot \left(\bar{v} + \frac{r'}{r} \cdot y \cdot \bar{u} \right) \quad (6-51)$$

$$U_e = \bar{U}_e \quad (6-52)$$

où \bar{x} , \bar{y} , \bar{u} , \bar{v} et \bar{U}_e sont les paramètres de l'écoulement dans le cas axisymétrique, $r(\bar{x})$ est le rayon de la tuyère et L est la longueur sur laquelle est calculé le nombre de Reynolds tel que:

$$Re = \frac{U_\infty \cdot L}{\nu} \quad (6-53)$$

U_∞ est la vitesse à l'infini (constante), qui n'est possible qu'à la sortie de la tuyère, donc L représentera la longueur de la paroi du divergent de la tuyère.

Pour adapter cette transformation à notre cas dérivant l'équation (6-48), on obtient :

$$d\bar{x} = \frac{L^2}{r^2(\bar{x})} \cdot dx \quad (6-54)$$

et de l'équation (6-52), on obtient :

$$d\bar{U}_e = dU_e \quad (6-55)$$

rapportant à présent ces deux dernières équations dans l'équation (6-25), on obtient :

$$\frac{\delta_2 \cdot \bar{U}_e}{\nu_e} \cdot \frac{d\delta_2}{d\bar{x}} = \frac{r^2(\bar{x})}{L^2} \cdot \left(F_1(K) - \frac{K}{D} \cdot \left(2 - M^2 \cdot F_2(K) \right) \right) \quad (6-56)$$

cette équation différentielle peut être résolue de la même manière que dans le paragraphe 6-7, étant donné qu'on a la valeur du rayon r du divergent en fonction de l'abscisse x et que la longueur L est connue aussi (chapitre 4).

6-9. conclusion

Dans ce chapitre, et dans une première étape, on a résolu le problème de la couche limite laminaire en considérant que le fluide était compressible, et que l'écoulement était stationnaire et bidimensionnel en tenant compte de l'effet de la haute température sur les propriétés du fluide. Ensuite, dans une seconde étape, on a montré que le cas de l'hypothèse simplificatrice de l'écoulement bidimensionnel (qui aboutit à des résultats qui sont assez loins des résultats expérimentaux, chapitre suivant) peut être reprise et améliorée en considérant l'axisymétrie de l'écoulement qui reflète le cas réel de la forme de la tuyère, et ceci à l'aide de la transformation de Mangler qu'on a pu adapter à notre problème. Ceci laisse présager évidemment, des résultats plus précis des paramètres de la couche limite laminaire à très hautes températures telles que les épaisseurs δ , δ_1 , δ_2 et δ_3 et surtout la température de la paroi du divergent.

RESULTATS ET COMMENTAIRES RELATIFS AU SIXIEME CHAPITRE

Dans ce chapitre on présentera les principaux résultats concernant les variations des paramètres de la couche limite à savoir les épaisseurs δ' et δ_1 , ainsi que le rapport des températures T_p/T_e suivant la paroi du divergent pour différentes températures génératrices et pour divers nombres de Mach M_s . La première constatation qu'on peut d'ores et déjà faire, est que tous les paramètres de la couche limite (graphes 7-1, 7-2 et 7-3) varient très rapidement à partir du col jusqu'au point où l'angle de déviation est maximal, cela est dû au fait que l'écoulement est très accéléré dans cette partie de la tuyère où l'angle de déviation θ varie très rapidement sur une distance relativement courte par rapport à la longueur totale du divergent (chapitre 4).

7-1. Variations des épaisseurs caractéristiques δ' et δ_1 de la couche limite laminaire

D'après les graphes 7-1 et 7-2, on constate en premier lieu, que les épaisseurs δ' et δ_1 sont plus élevées lorsqu'on fait augmenter la température génératrice T_0 et le nombre de Mach de sortie M_s , ce phénomène peut être expliqué par l'accroissement de l'agitation des particules du fluides à hautes températures qui fait augmenter encore plus le frottement et par conséquent l'épaisseur de la couche limite (ceci se vérifie d'ailleurs par l'équation 6-2 où la viscosité du fluide croît avec la température). D'autre part, on remarque que l'écart de l'hypothèse des gaz parfaits s'accroît aussi avec l'augmentation de la température et du nombre de Mach de sortie.

7-2. variation du rapport T_p/T_e avec la température

D'après les graphes 7-3, on constate que la température à la paroi T_p est supérieure à la température de l'écoulement libre, cela est dû au fait que l'énergie cinétique à la frontière de la couche limite diminue au fur et à mesure qu'on s'approche de la paroi (diminution de la vitesse) et se transforme en énergie thermique (sous forme d'enthalpie) selon le principe de conservation de l'énergie.

D'autre part, on constate que le rapport T_p/T_e varie considérablement avec la température génératrice et le nombre de Mach de sortie. Ainsi le rapport T_p/T_e diminue si la température génératrice T_0 augmente, ceci est une conséquence de l'augmentation de l'épaisseur de la couche limite qui entraîne la diminution relative de la température ($T_p - T_e$) à la paroi pour un flux de chaleur constant échangé par conduction entre la paroi de la tuyère et l'écoulement libre à travers la couche limite selon la relation de Fourier :

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dy} \quad (7-1)$$

où q est le flux de chaleur transmis et λ la conductivité thermique du fluide. Cela se traduit aussi par l'augmentation des épaisseurs δ_3 et δ_H qui caractérisent respectivement les pertes en énergie et en enthalpie.

7-3. Comparaison avec des résultats expérimentaux

D'après [3], l'épaisseur de déplacement de la couche limite laminaire à la section de sortie d'une tuyère supersonique, peut être calculée directement par l'expression semi-empirique suivante :

$$\delta_1 = 0,0064 \cdot M_s^{1,25} \cdot Re_s^{-0,14} \cdot L \quad (7-2)$$

où Ms et Re_s sont respectivement les nombres de Mach et de Reynolds à la section de sortie, L est longueur du divergent. Cette relation ne tient pas compte de la température, ce qui nous laisse supposer qu'elle est applicable pour des basses températures. D'autre part, en appliquant la méthode de Gruschwitz (chapitre 6), on obtient pour δ_1 (en mm) les résultats suivants (à la section de sortie) :

$Ms \backslash T_0$	G.P.	1000 °K	2000 °K	3000 °K	(1)
1.5	0.219	0.224	0.333	0.419	0.132
2	0.342	0.357	0.545	0.687	0.312
3	1.204	1.319	2.147	2.815	1.038
4	2.295	2.599	4.541	6.042	1.855
5	4.389	4.956	9.224	13.307	3.577
6	10.507	11.807	23.147	34.844	10.643

(1) : résultats obtenues par la relation (7-2).

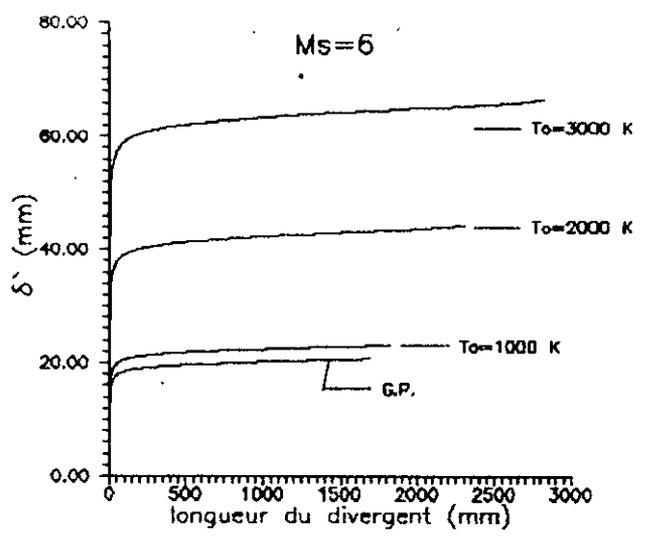
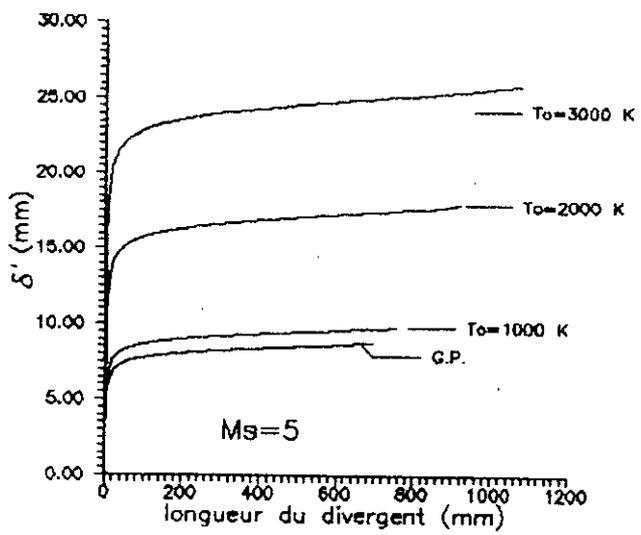
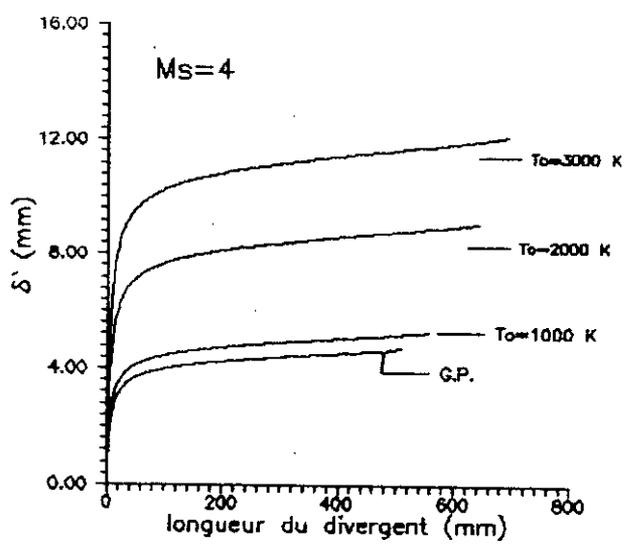
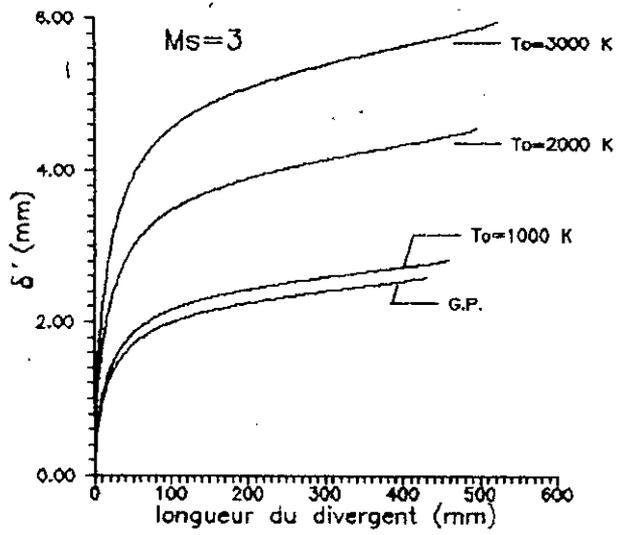
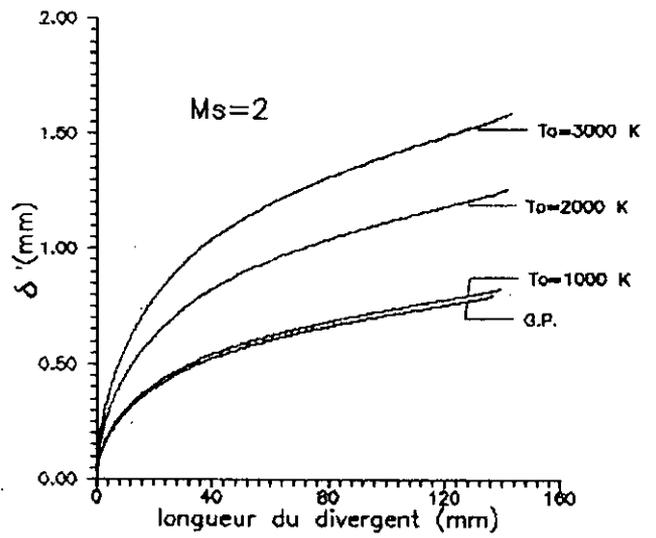
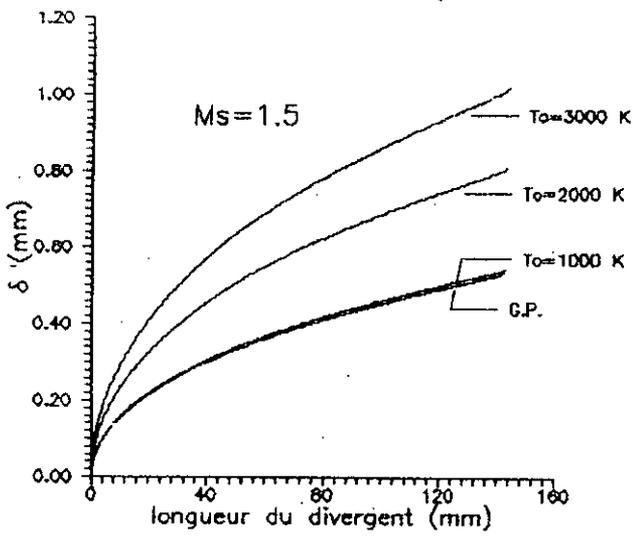
D'après ces résultats, on constate que les valeurs obtenues pour le cas des gaz parfaits et pour des températures génératrices de l'ordre de 1000 °K concordent assez bien avec les résultats obtenus à partir de la relation semi-empirique (7-2). D'autre part on a établi expérimentalement [5], que l'épaisseur de la couche limite laminaire à la section de sortie d'une tuyère supersonique est d'environ $4 \cdot 10^{-3}$ à $5 \cdot 10^{-3}$ fois la longueur du divergent pour des nombres de Mach de 1.5 à 2.5, d'après les résultats du chapitre 5 concernant les longueurs des divergents, on obtient pour δ les valeurs suivantes (pour $T_0=1000$ °K) :

pour $M_s=1.5$, $L=144,20$ mm : $\delta=0.58$ à 0.72 mm
pour $M_s=2$, $L=140.50$ mm : $\delta=0.56$ à 0.70 mm

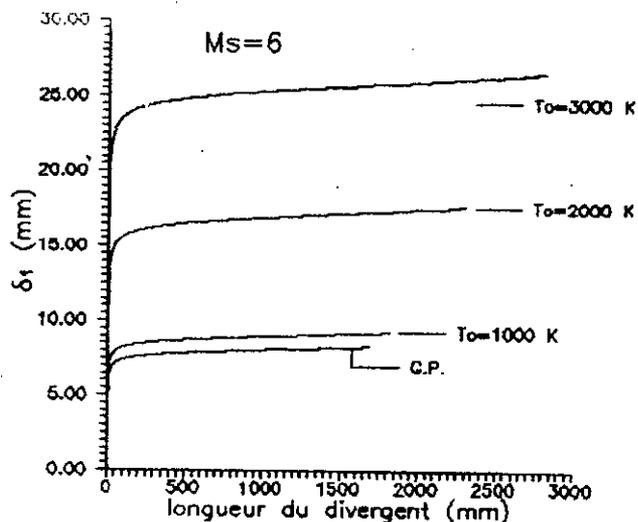
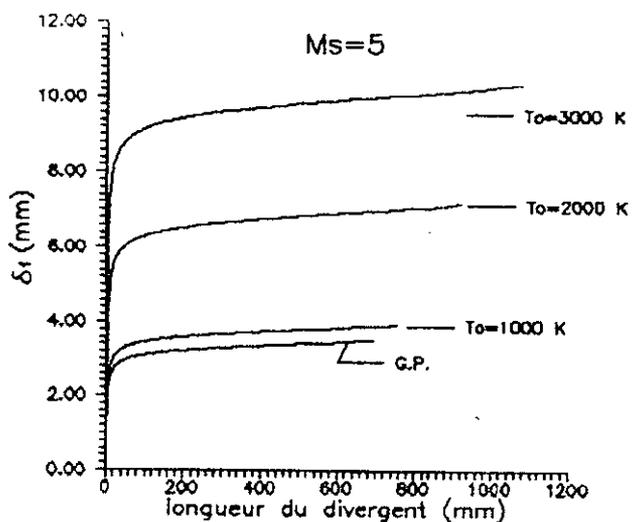
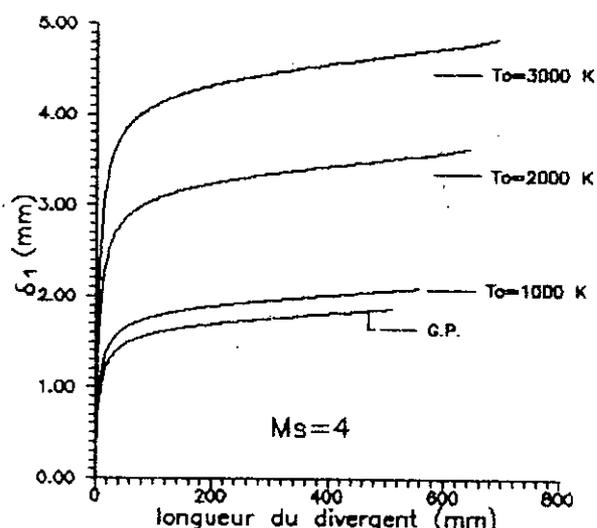
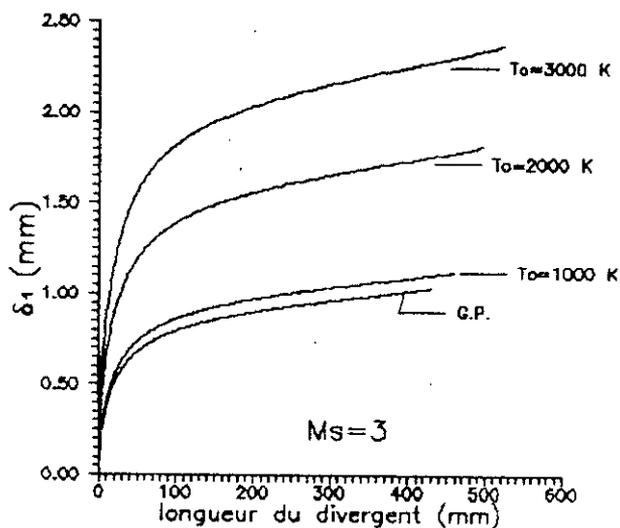
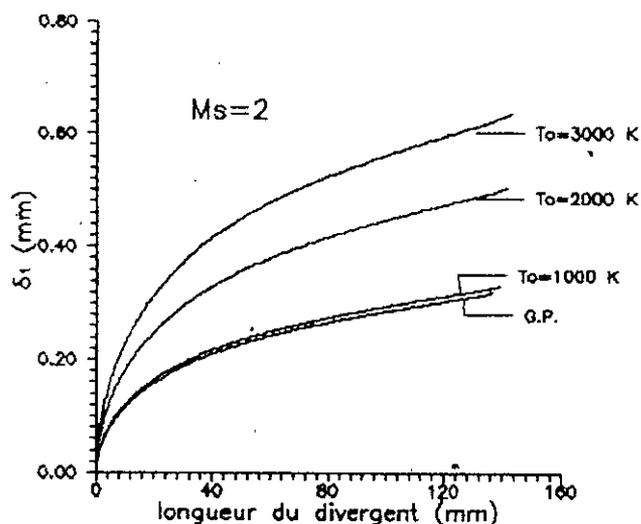
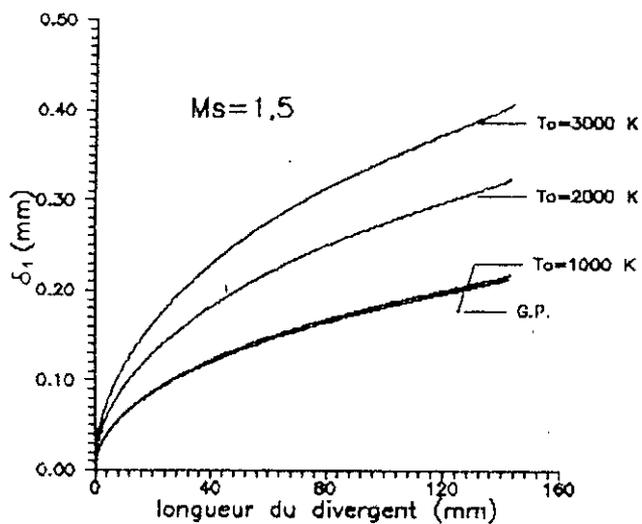
ces valeurs ont été obtenues par l'expression suivante :

$$\delta \approx (4.10^{-3} \text{ à } 5.10^{-3}).L \quad (7-3)$$

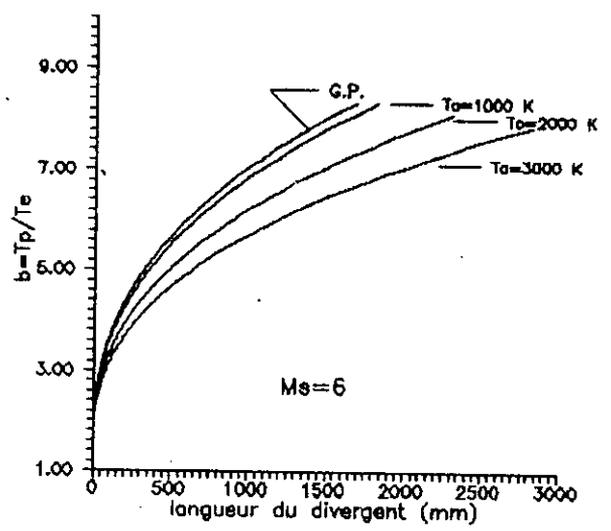
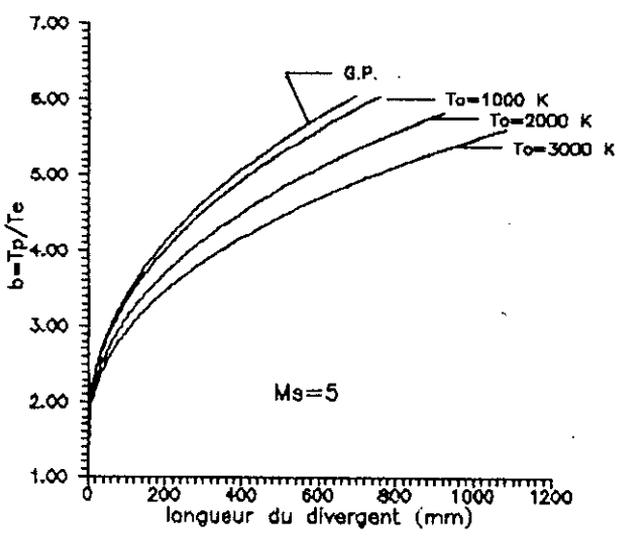
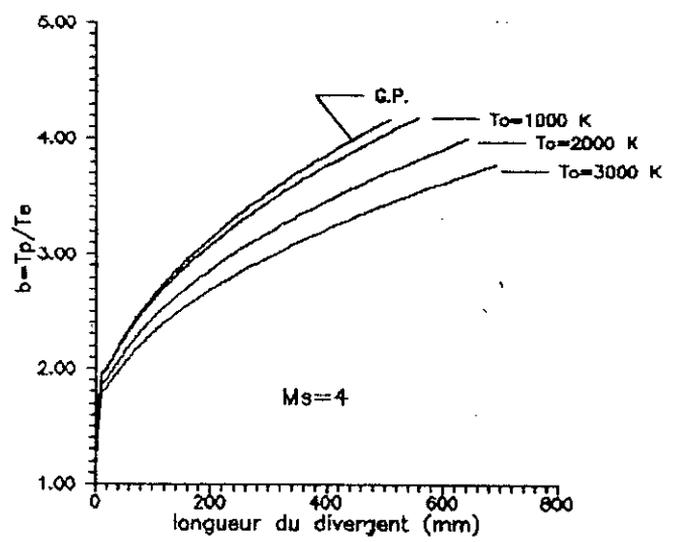
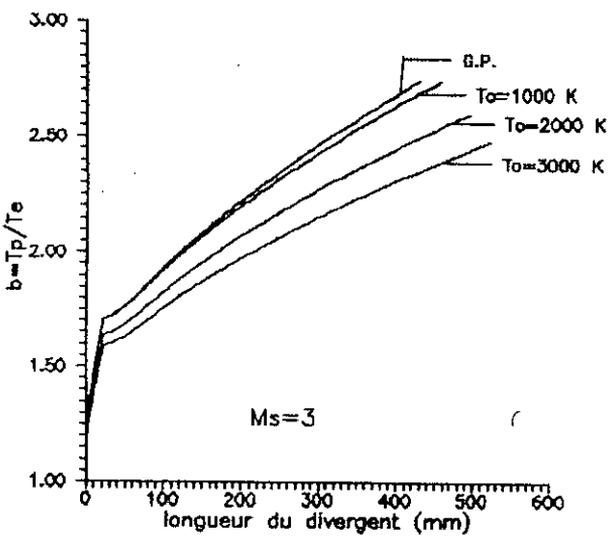
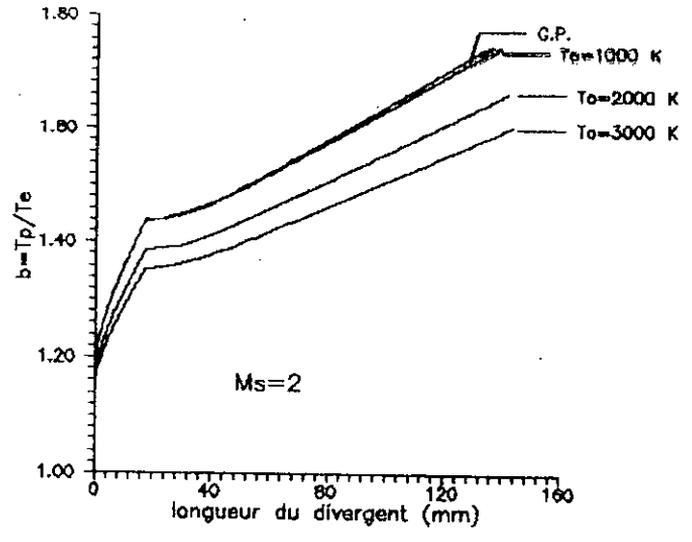
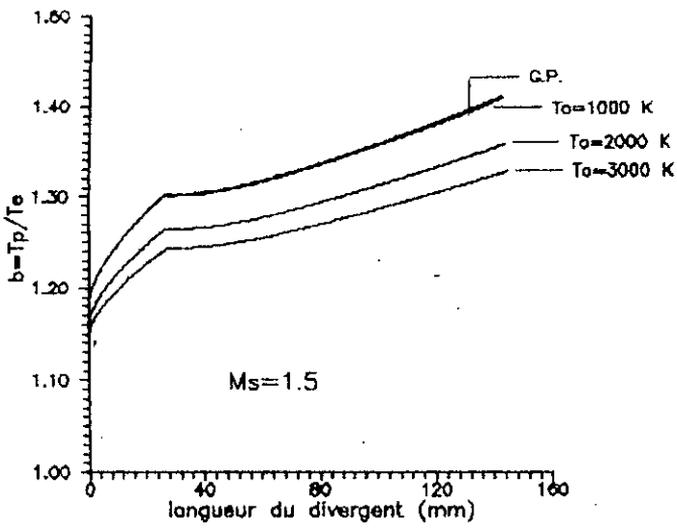
Ces valeurs comparées avec ceux des résultats obtenus par la méthode de Gruschwitz (graphes 7-1 et tableaux des résultats correspondant en annexe), confirment sans équivoque l'exactitude de nos résultats (même ordre de grandeur).



Graphes 7-1: variations de l'épaisseur δ' avec la température génératrice T_0 et le nombre de Mach de sortie M_s .



Graphes 7-2: variations de l'épaisseur δ_1 avec la température génératrice T_0 et le nombre de Mach de sortie M_s .



Graphes 7-3: variations du rapport T_p/T_e avec la température génératrice T_o et le nombre de Mach de sortie M_s .

CHAPITRE 8

PROGRAMMATION

8-1. Intéret du programme

Le programme élaboré permet dans un premier temps, de déterminer toutes les caractéristiques thermodynamiques et géométriques dans les divergents des tuyères supersoniques pour un écoulement parfait bidimensionnel principalement à leur paroi, où étant données les coordonnées, on peut tracer judicieusement leurs profils de manière à obtenir un écoulement uniforme et parallèle à la section de sortie, et ce pour n'importe quelle température inférieure à la température de dissociation (environ 3000 °K pour le cas de l'air) et pour n'importe quel nombre de Mach supérieur à l'unité et inférieur à la limite du régime hypersonique (entre 5 et 6). En second lieu le programme permet la détermination des épaisseurs caractéristiques de la couche limite s'établissant à la paroi avec l'hypothèse d'un écoulement axisymétrique réel en considérant toujours l'effet de la température sur les propriétés thermophysiques du fluide C_p , γ , μ et Pr . Ce qui va nous permettre en plus de la connaissance des épaisseurs de la couche limite, d'estimer la température en chaque point de la paroi (selon le maillage), ceci servirait de base de données pour d'éventuelles études thermiques, métallurgiques ou autres des tuyères supersoniques.

8-2. Présentation du programme

Le corps du programme est composé de deux parties essentielles qui sont:

- Etude de l'écoulement parfait dans une tuyère supersonique qui est traité dans le quatrième chapitre.
- Etude de l'écoulement réel sur la paroi de la tuyère, cette partie est traitée dans le sixième chapitre.

La première partie comprend les parties suivantes:

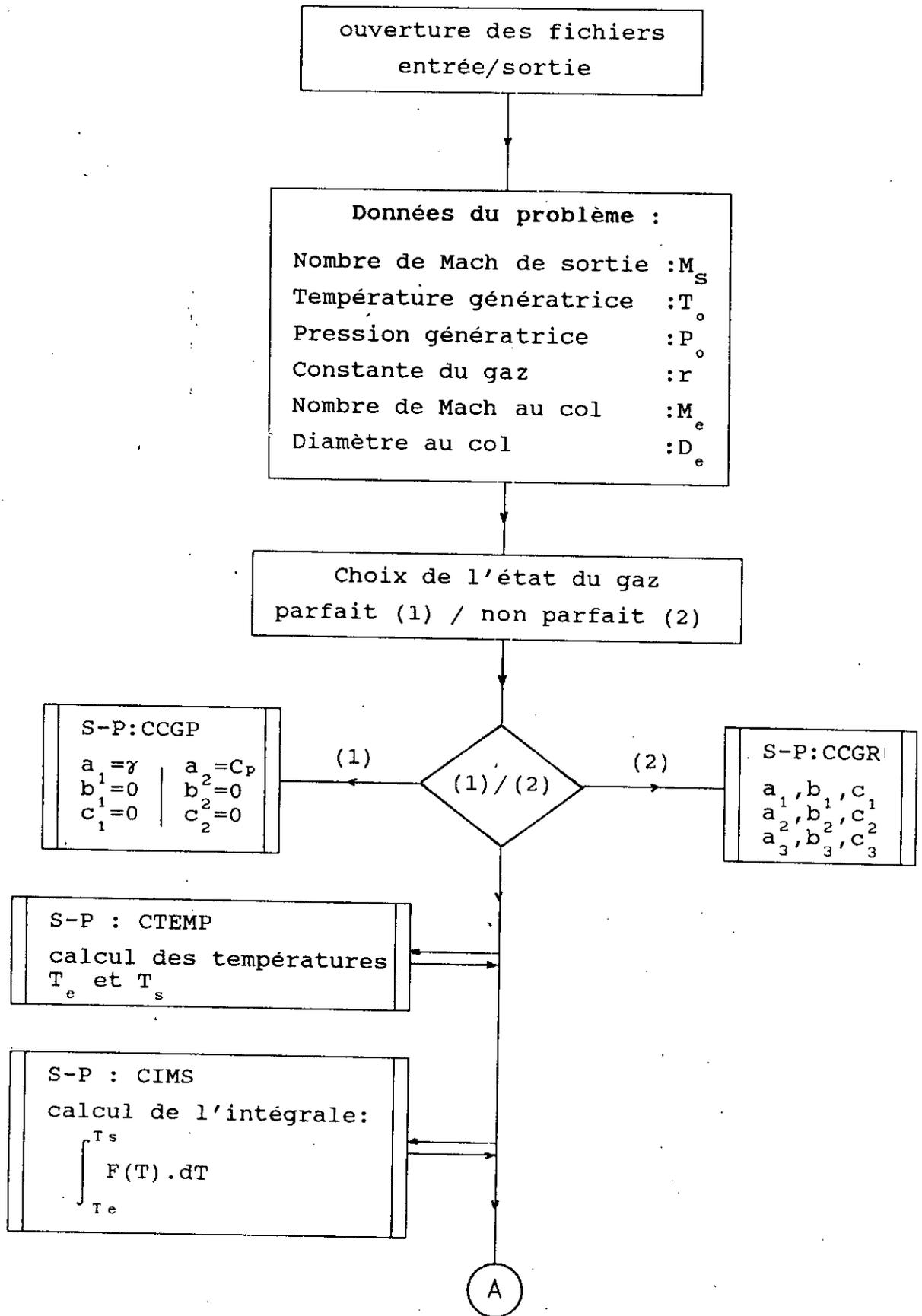
- Introduction des données (lignes 340 - 1120)
- Détermination des conditions aux limites (lignes 1240 - 1500)
- Détermination des caractéristiques dans le domaine non simple (lignes 1660 - 2650)
- Détermination des caractéristiques dans le domaine conique (lignes 2680 - 3520)
- Détermination des caractéristiques dans le domaine simple (lignes 3520 - 3620)
- Détermination des coordonnées du profil de la paroi de la tuyère (lignes 3700 - 4550)

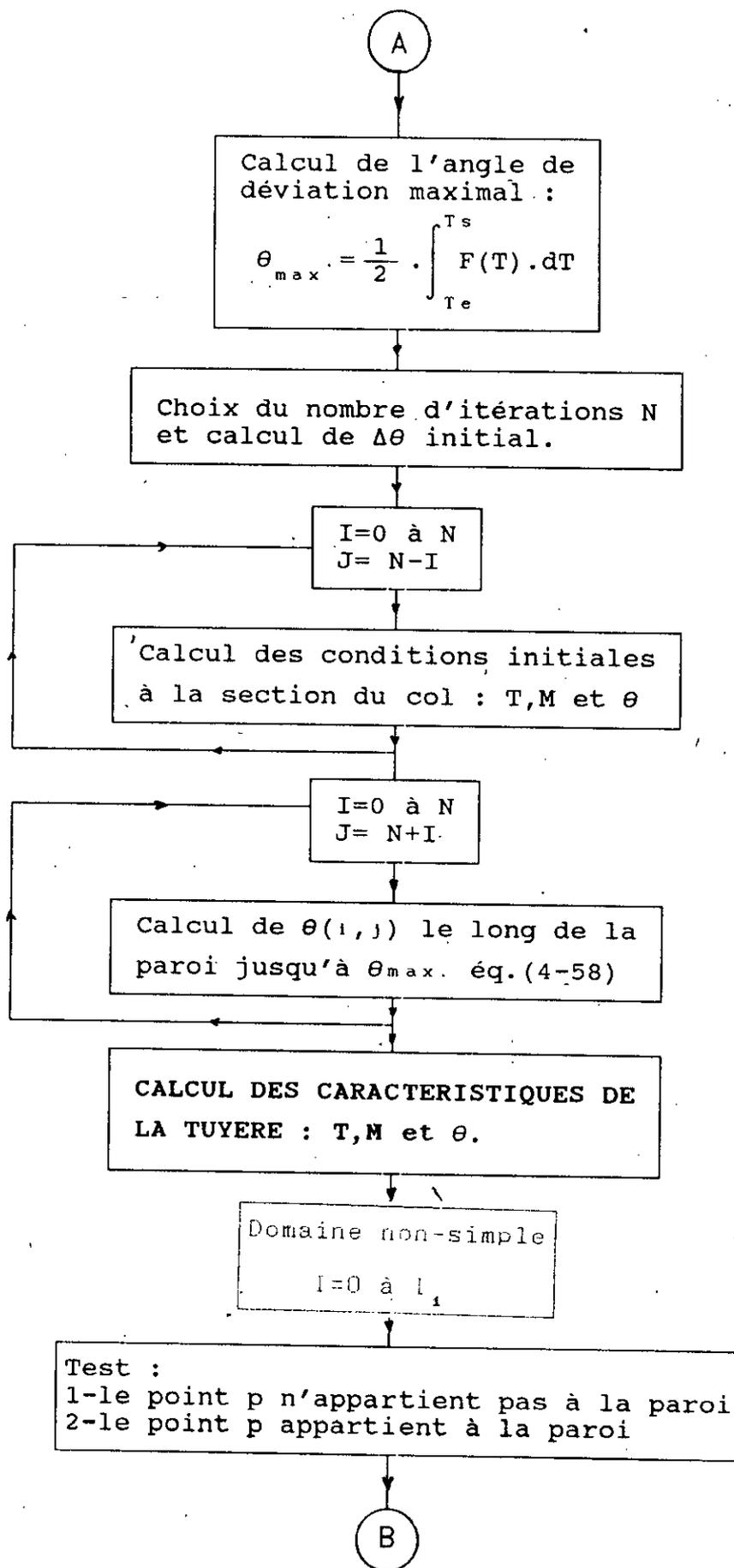
Quant à la seconde partie du programme (lignes 5700 - 6310), elle consiste en la résolution du système d'équations différentielles couplées (6-42), (6-43), (6-44) et (6-54) et (6-55).

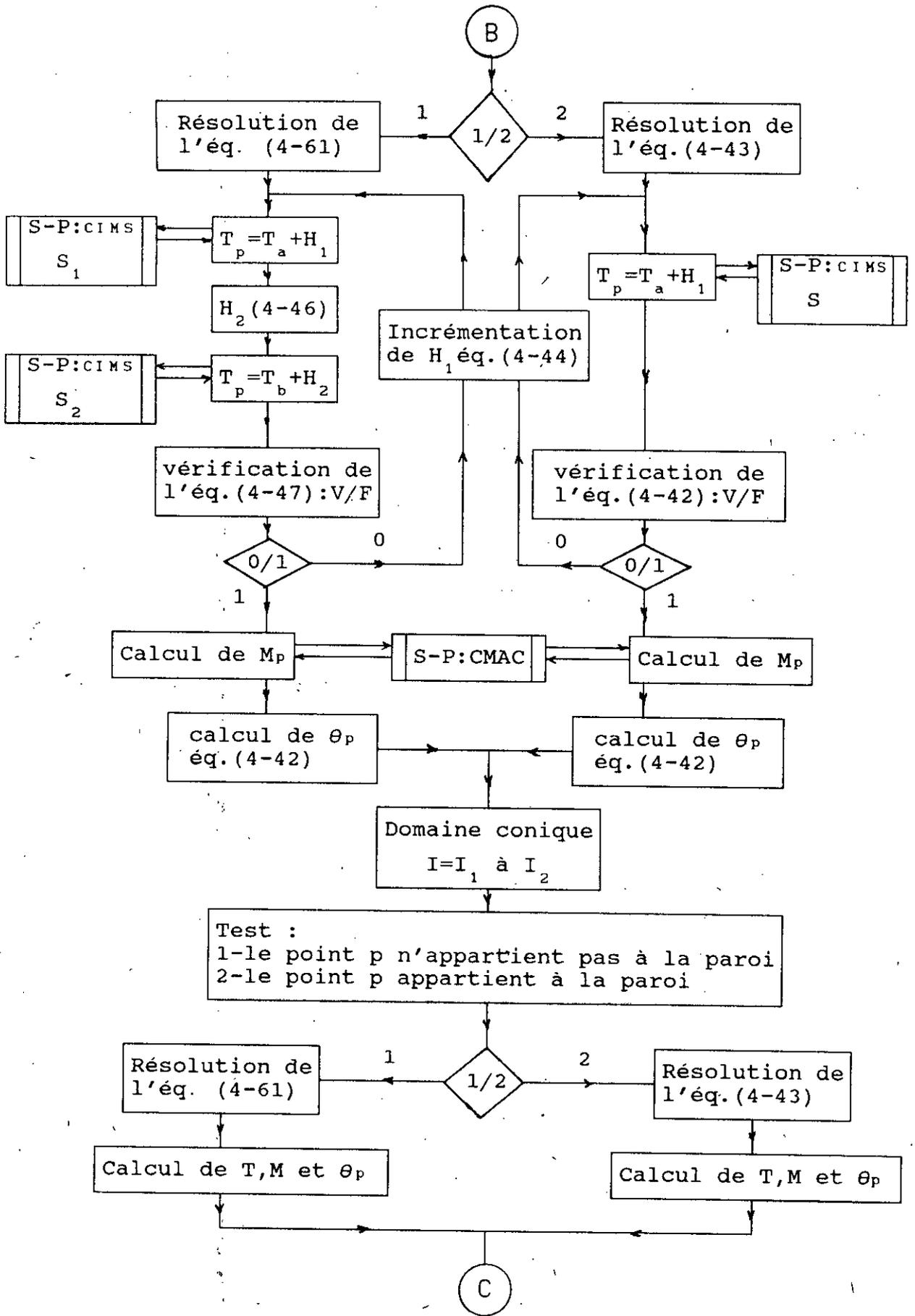
8-3. Liste des sous-programmes

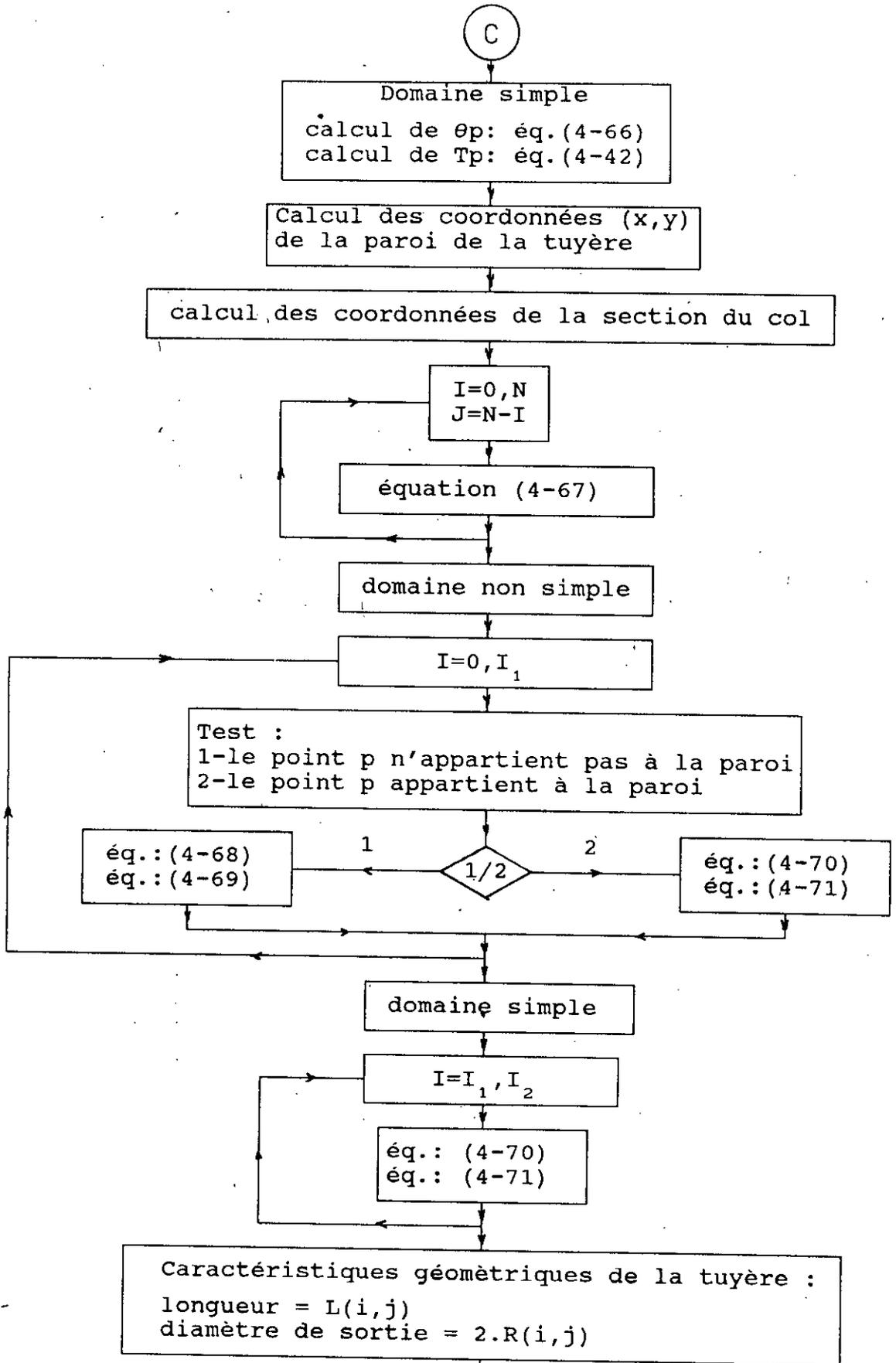
- CCGP : coefficients a_1, b_1, \dots, c_3 dans le cas de l'hypothèse du gaz parfait.
- CCGR : calcul des coefficients a_1, b_1, \dots, c_3 dans le cas de l'hypothèse du gaz non parfait.
- CTEMP : calcul de la température: équation (4-16).
- CIMS : calcul de l'intégrale (4-54) par la méthode de Simpson.
- CMAC : calcul du nombre de Mach, eq.(4-16) par la méthode des itérations successives.
- ROTHER : rapports thermodynamiques: P/P_0 (4-80) , ρ/ρ_0 (4-82), a/a_0 (4-13) et T/T_0 .
- VIT : calcul de la vitesse de l'écoulement (4-11).
- VISC : calcul de la viscosité par la relation de Sutherland eq.(6-2).
- CFF(K) : calcul des fonction $F_n(K)$, équations: (6-27), (6-28), (6-29), (6-30).

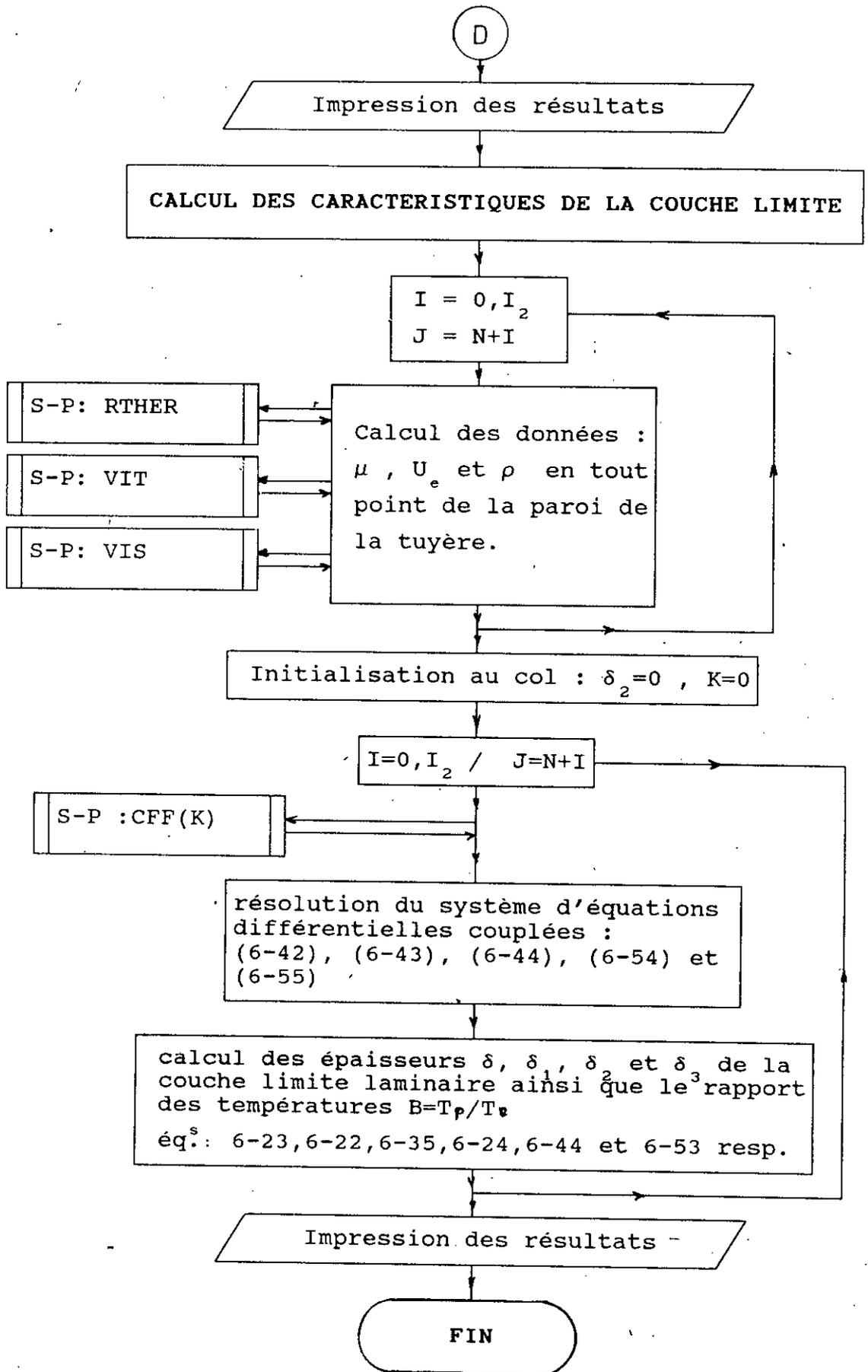
8-4. Organigramme











8-5. NOTATIONS DU PROGRAMME

M, M1	: nombre de Mach
Me	: nombre de Mach au col de la tuyère
Ms	: nombre de Mach à la section de sortie de la tuyère
X(i, j)	: nombre de Mach en un point (i, j)
Te	: température au col
Ts	: température à la section de sortie
T0	: température génératrice
TT(i, j)	: température en un point (i, j)
P0	: pression génératrice
Rau, Rauo	: masse volumique
Rpr	: rapport de pressions
Rmv	: rapport de masses volumiques
Rae	: rapport de vitesses soniques
R	: constante des gaz parfaits
a1, ..., a3	: coefficients de γ , C_p et de Pr
Ae0	: vitesse du son de l'état générateur
A, B	: bornes d'intégrales
Ns	: nombre de pas pour le calcul d'intégrale
H	: pas
S1, S2, S	: valeurs d'intégrales
Amax	: angle maximal de déviation
I1	: nombre de points à partir de $\theta=0$ jusqu'à $\theta=\theta_{max}$
Nr	: nombre de réflexions d'une perturbation η ou ξ sur la paroi
I2	: nombre de points à partir de θ_{max} jusqu'à la section de sortie
A	: angle de déviation $\Delta\theta$
D(i, j)	: angle de déviation en un point (i, j)
De, Ds	: diamètre au col et à la section de sortie respectivement
W	: numéro de la ligne qui passe par tout les noeuds disposés sur une même section
FA, FB	: valeurs de la fonction F(T) pour T=A et T=B
Mu, Mue	: viscosité
Ue(i, j), U1	: vitesses
L(i, j), XT(i, j)	: abscisse d'un point (i, j)
R(i, j)	: ordonnée d'un point (i, j)
L1	: longueur de la tuyère
a11, ..., a26	: coefficients
G, K	: rapport des chaleurs spécifiques
Cp	: chaleur spécifique à pression constante
Ncp, Nk, Np	: nombre de valeurs de C_p , K et de Pr contenues dans les fichiers d'entrée CP.DAT et K.DAT
G1, G2, , GK	: fonctions (éqs. 6-27, 6-28, 6-29, 6-30)
K1(i, j), K2	: facteur de forme K (éq. 6-21)
L1(i, j), Ld	: facteur de forme λ (éq. 6-18)
Re	: nombre de Reynolds
Z	: carré de l'épaisseur de quantité de mouvement

8-6. Utilisation du programme

Le programme est intitulé "TUYERE", il est écrit en langage basic adapté sur ordinateurs de type VAX/VMS. Son exploitation est assez simple et nécessite avant son lancement d'ouvrir les fichiers de données (d'entrée) suivants :

- Cp.dat : contient les valeurs de Cp en fonction de la température.
- K.dat : contient les valeurs de γ en fonction de la température.
- Pr.dat : contient les valeurs de Pr en fonction de la température.

Chacun de ces fichiers de données est constitué de deux colonnes, la première contient les températures et la seconde les valeurs de Cp , de γ ou de Pr correspondante.

Après avoir lancer l'exécution du programme, l'ordinateur demandera l'introduction des données suivantes :

- Nombre de Mach de sortie : Ms
- Température génératrice : To
- Pression génératrice : Po

ensuite il demandera à l'utilisateur s'il souhaite faire le calcul pour le cas des gaz parfaits ou non-parfaits, pour ce dernier cas, il calculera et affichera les expressions polynômiales du second degré de Cp, γ et Pr en fonction de La température.

D'après les données précédentes, le programme calculera et affichera les valeurs des températures au col Te et à la section de sortie Ts, ainsi que l'angle de déviation maximal Amax., suite à cela il faudra introduire les données essentielles qui conditionnent les dimensions de la tuyère à savoir :

- le nombre de réflexions d'une perturbation, Nr
- le nombre total de réflexions I_1 du col jusqu'au point où l'angle de déviation est maximal.

Le choix de I_1 est d'une grande importance sur la précision des résultats, cela se reflètera sur la valeur du nombre de Mach calculé à la section de sortie qui doit correspondre avec la valeur introduite initialement (convergence). par suite, le programme calculera l'angle de déviation initial $\Delta\theta$ et demandera de faire entrer la valeur du diamètre au col qui termine l'étape d'entrée des données nécessaires au dimensionnement de la tuyère, ensuite l'ordinateur affichera les conditions initiales et marquera le début du calcul des caractéristiques en demandant le nombre de pas N_s pour le calcul d'intégrale qui détermine aussi à l'instar de I_1 la précision des calculs.

Le calcul des caractéristiques s'effectue en affichant les caractéristiques principales soient l'angle de déviation θ , le nombre de Mach M et la température T dans chacun des domaines suivants :

- domaine non-simple ($W=0$ à $2.I_1$)
- domaine conique ($W=2.I_1+1$ à I_1+I_2)
- domaine simple (valeurs du domaine conique lorsque le point appartient à la paroi).

A la fin du calcul des caractéristiques, l'ordinateur affichera la valeur du nombre de Mach calculé à la section de sortie qui doit en principe correspondre avec la valeur choisie initialement.

Cette étape s'ensuit par le calcul des coordonnées de chaque point et par l'impression des résultats qui sont contenus dans les fichiers de sortie suivants :

- res2.dat : caractéristiques le long de la paroi de la tuyère:
 θ , M , T/T_0 , P/P_0 , ρ/ρ_0 et a/a_0 .
- res3.dat : coordonnées de la paroi de la tuyère.
- res5.dat : caractéristiques suivant l'axe de la tuyère.
- res6.dat : caractéristiques géométriques de la tuyère.

Néanmoins on peut introduire dans le programme d'autres fichiers de sortie qui contiendraient par exemple les

caractéristiques géométriques ou thermodynamiques de tous les points du volume de la tuyère.

La deuxième partie du programme concerne le calcul de l'écoulement réel, l'ordinateur demandera à l'utilisateur s'il souhaite faire le calcul de la couche limite et si la réponse est positive, l'ordinateur affichera d'abords la longueur de la paroi de la tuyère (et non pas la longueur de cette dernière) et affichera ensuite les valeurs suivantes : abscisse du point de la paroi , le nombre de Mach , les épaisseurs δ' , δ_1 , δ_2 et δ_3 ainsi que le rapport des températures T_p/T_e et la température à la paroi.

CONCLUSION

Par cette présente thèse, nous estimons avoir contribué efficacement à la réalisation future d'une soufflerie à choc performante opérant dans tous les domaines d'écoulement du subsonique à l'hypersonique, et qui constituera le premier jalon du projet d'un laboratoire de gazodynamique. A cet effet, on a conçu tous les éléments de la soufflerie à choc et on a établi tous les dessins d'ensemble et de définition nécessaires à sa fabrication, ainsi qu'une synthèse générale de ses applications et la spécification de tout l'appareillage, l'instrumentation de mesure et de traitement de données.

Dans un deuxième temps, on s'est penché particulièrement sur le problème de l'écoulement dans les tuyères supersoniques à hautes températures (en vue de dimensionner les tuyères des souffleries). Ainsi on a reconsidéré le problème pour le cas du modèle des gaz parfaits [7] valable uniquement à basses températures, et vu les applications de la soufflerie à choc (généralement pour des températures supérieures à 1000°K) on a posé des hypothèses se rapprochant plus de l'état réel du gaz à hautes températures (inférieurs au seuil de dissociation). A partir des résultats obtenus (pour le cas de l'air), on conclut que le modèle du gaz parfait n'est valable que pour des nombres de Mach inférieurs à environ 2 (la haute température n'est pas d'une grande influence sur le tracé du profil), cependant à partir de cette valeur, le profil de la tuyère et par conséquent les rapports thermodynamiques diffèrent énormément selon la température génératrice pour un nombre de Mach de sortie donné.

Dans le même contexte, on a fait l'étude de la couche limite laminaire s'établissant le long de la paroi de la tuyère on tenant compte de l'axisymétrie de l'écoulement et de l'effet de la haute température sur les propriétés du fluide. Pour cela on a utilisé la méthode de GRUSCHWITZ qui permet de prédire le

point de décollement et la température de la paroi. D'après les résultats obtenus, on constate en premier lieu qu'il n'y a pas de décollement de la couche limite et que ses épaisseurs caractéristiques augmentent considérablement avec la température génératrice, en même temps que le rapport des températures de la paroi et de l'écoulement libre diminue, des interprétations de ce phénomène ont été apportées. D'autre part, on a fait une comparaison des résultats obtenus pour l'épaisseur de la couche limite et de déplacement avec des résultats expérimentaux, et on a constaté qu'ils sont en assez bonne concordance ce qui démontre sans équivoque la consistance de cette étude.

Au terme de l'étude de l'écoulement dans les tuyères supersoniques, on a élaboré un programme expert qui permet la détermination des caractéristiques géométriques et thermodynamiques, ainsi que les épaisseurs caractéristiques de la couche limite le long de la paroi de la tuyère et la température réelle de celle-ci.

REFERENCES

- 1- Glass I.I. , Hall J.C.: "*Handbook of supersonique aerodynamics , section 18: shock tubes* " 1958
- 2- Jaumotte A.L.: "*Chocs et ondes de choc , tomes 1,2*"
édition Masson, Paris,1958.
- 3- Hertzberg A.,Wittliff C.E.,Hall J.C. : "*Summary of chock tunnel developoment and application to hypersonique research*"
Cornell Aeronautical Laboratory, Inc., Buffalo,New York,1961
- 4- Boyer A.G.: "*Design, instrumentation and performances of the UTIAS 4in.7in hypersonique shock tube*"
Institute for aerospace studies,University of Toronto. UTIAS report no. 99, May 1965.
- 5- Howarth L. : "*Modern developments in fluid dynamics high speed flow. volume 2*"
Oxford at the Clarendon press,1953.
- 6- Benbraïka M.: "*Etude du tube à choc et élaboration de logiciels de simulation.*"
Thèse de magister,Ecole Nationale Polytechnique,Alger,1988
- 7- Haoui R.: "*Programme expert pour tuyères supersoniques et conception de la soufflerie à choc.*"
Thèse de magister,Ecole Nationale Polytechnique,Alger,1989
- 8- Kadi A. :"*Base de choix des unités de compression et de pompage -Application à la soufflerie à choc.*"
P.F.E. Ing. en génie mécanique,Ecole Nationale Polytechnique Alger, 1989.
- 9- Schlichting H. : "*Boundary layer theory.*"
McGraw-Hill, 6^{me} édition, 1968.
- 10- Truitt R.W.: "*Fundamentals of aerodynamic heating.*"
The Ronald Press Company, 1960
- 11- Shapiro A.H.: "*the dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow, volume 1* "
John Wiley and sons, Inc, 1953
- 12- Hill P.G., Peterson C.R. : "*mechanics and thermodynamics of propulsion.*"
Addtion-Wesley publishing company inc., 1965.

- 13- Pai S.I. : "*Viscous flow theory, volume 1: -Laminar flow.*"
D. Van Nostrand company, inc., 1958.
- 14- Ouziaux R., Perrier J.: "*Mécanique des fluides appliquée.*"
3^{me} édition, Dunod, 1978.
- 15- Van Wylen J.J., Sonntag R.E.: "*Fundamentals of classical thermodynamics.*"
2^{me} édition, John Wiley and sons, inc., 1976.
- 16- Sisi J.C.: "*Principes de thermodynamique.*", McGraw-Hill, 1981.
- 17- Sacquepey D., Spenle D.: "*Précis de construction mécanique*"
Nathan, 1984.
- 18- Eloy C.: "*Conception en construction mécanique*"
collection Aide-mémoire, Dunod, 1981.
- 19- Eloy C.: "*Calcul en construction mécanique*"
collection Aide-mémoire, Dunod, 1981.
- 20- Chevalier A.: "*Guide du dessinateur industriel.*"
Hachette Technique, 1984.

ANNEXE A

CALCUL DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA SOUFFLERIE A CHOC

1. Calcul de l'épaisseur du tube à choc

La pression dans le tube à choc étant très élevée on applique la formule des parois épaisses telle que :

$$e \geq r_i \cdot \left[\sqrt{\frac{\sigma_p}{\sigma_p - 2 \cdot P_1}} - 1 \right] \quad (1-1)$$

avec :

- r_i : rayon intérieur du tube, $r_i = 50$ mm,
- P_1 : pression intérieur maximale, $P_1 = 100$ bars,
- σ_p : résistance pratique à l'extension, en prenant un coefficient de sécurité égale à 3 et avec une limite élastique du matériau du tube de 195 N/mm^2 , on trouve une épaisseur maximale du tube de $10,2$ mm, cependant, pour sa disponibilité, on adoptera une épaisseur constante de $12,5$ mm.

2. Estimation de l'épaisseur des diaphragmes

L'épaisseur du diaphragme peut être estimée avec une bonne précision par la relation suivante [1]:

$$e \geq \frac{P_{ef} \cdot d}{4 \cdot \sigma_e} \quad (2-1)$$

avec :

- d : diamètre du diaphragme, $d = 100$ mm,
- P_{ef} : pression effective, $P_{ef} = P_m - P_1$
où P_m est la pression du gaz moteur, $P_m = 100$ MPa, et P_1 est la pression dans la section du double diaphragme qui est d'environ 5 Pa.
- σ_e : limite élastique.

En choisissant par exemple un diaphragme en aluminium de désignation normalisée A-G6 ($\sigma_e = 100 \text{ N/mm}^2$) on trouve après calcul une épaisseur de $2,5$ mm.

3. Calcul du diamètre des vis

Les vis, les goujons et les boulons qui assemblent les brides sont soumis à la traction. Pour le calcul de leurs diamètres on choisira la situation la plus défavorable qui est celle des vis fixant le couvercle à la bride du tube moteur (planche 14), pour cette sollicitation la condition de résistance s'écrit :

$$\frac{F}{S} \leq \sigma_p \quad (3-1)$$

où F est la force exercée par la pression du gaz moteur (qui est de 100 bars) sur la surface S répartie sur la section droite des six vis. En choisissant des vis de classe 8.8 correspondant à la désignation XC38 (ou XC48) et avec un coefficient de sécurité de 3, on trouve en appliquant la condition de résistance précédente un diamètre de 24 mm.

4. Calcul des soudures des brides

Les cordons de soudures des brides (planches 14, 15 et 16) sont soumis au cisaillement, dans ce cas la condition de résistance s'écrit:

$$\tau_{\text{moy}} = \frac{F}{S} \leq \tau_{pg} \quad (4-1)$$

- F est la force exercée par une pression de 100 bars sur la surface latérale de la bride dénotée par S'.
- S est la section des cordons de soudure exposés au cisaillement telle que :

$$S = 0,707 \cdot \pi \cdot a \cdot d_e \quad (4-2)$$

dans cette expression a est la largeur des deux cordons de soudure d'une bride et d_e diamètre extérieur du tube à choc, $d_e = 125$ mm.

- τ_{pg} est la contrainte admissible au glissement, pour les aciers durs elle est donnée par la relation :

$$\tau_{pg} = 0,7 \cdot \sigma_p \quad (4-3)$$

avec σ_p contrainte admissible à l'extension. En adoptant un coefficient de sécurité de 3,5, on trouve après calcul une largeur du cordon de soudure de 16 mm.

5. Calcul de la distance entre les blocs-supports en vé

On considère chaque portion du tube comprise entre deux blocs-support comme une poutre sollicitée à la flexion par son poids qu'on assimile à une charge uniformément répartie reposant sur deux appuis simples. D'après la conception du tube à choc et la disposition des blocs-supports en vé, on distingue deux situations de charge distinctes selon la possibilité de présence d'un couple de brides assemblées entre deux blocs-supports successifs ou non (figures 5-1 et 5-2).

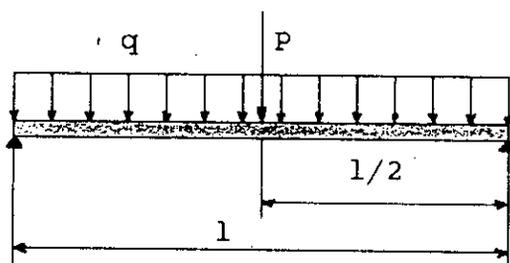


fig. 5-1

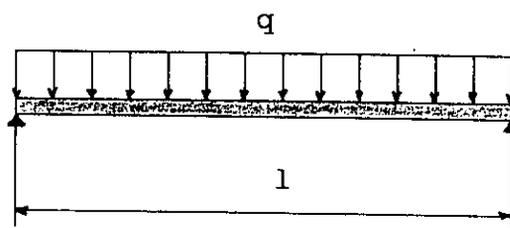


fig.5-2

- Première situation : (figure 5-1)

On considère le cas le plus défavorable où les brides se trouvant au milieu de la poutre, agissent par leur propre poids P qu'on assimile à une charge concentrée, q étant une charge uniformément répartie (elle représente le poids du tube par unité de longueur) sur la longueur l qu'on déterminera de telle manière que la flèche maximale de cette portion du tube n'exède pas la valeur de 10 μm , cela se traduit par la relation suivante :

$$f_{\max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot I_{\alpha\beta}} + \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_{\alpha\beta}} \quad (5-1)$$

Avec:

f_{\max} : flèche maximale

E : module de Young du matériau du tube, $E = 200000 \text{ N/mm}^2$

$I_{\alpha\beta}$: moment quadratique, d'après les dimensions du tube
on trouve : $I_{\alpha\beta} = 7,076.10^6 \text{ mm}^4$

q : poids du tube par unité de longueur, d'après les dimensions du tube et la masse volumique des aciers qui est de 7800 kg/m^3 on a : $q = 0,338 \text{ N/mm}$

P : poids d'un couple de brides qu'on estime à 785 N

Après calcul on trouve : $l_{\text{max}} = 887,3 \text{ mm}$.

- Deuxième situation : (fig.5-2)

L'expression de la flèche maximale est donnée par la relation suivante :

$$f_{\text{max}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot I_{\alpha\beta}} \quad (5-2)$$

Après calcul on trouve : $l_{\text{max}} = 1339,1 \text{ mm}$.

6. calcul du diamètre des vis de réglage des blocs-supports en vé

Le noyau de la vis de réglage est sollicité à la torsion et à la traction. La contrainte tangentielle de torsion est donnée par :

$$\tau = \frac{16 \cdot C_s}{\pi \cdot d_3^3} \quad (6-1)$$

- C_s représente le couple de serrage de la vis, pour un filet triangulaire ISO à pas fin , il est donné par la relation suivante :

$$C_s = 0,15 \cdot Q \cdot d \quad (6-2)$$

où Q est la charge maximale et d diamètre nominal de la vis.

- d_3 est le diamètre du noyau de la vis, il est lié au diamètre nominal d par la relation : $d_3 = d - 1,2268 \cdot p$ (6-3)

p est le pas du filet, $p = 1 \text{ mm}$.

Quant à la contrainte normale de traction, elle est donnée par l'expression suivante :

$$\sigma = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_3^2} \quad (6-4)$$

La contrainte résultante (ou équivalente) due aux deux sollicitations sera donnée par :

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma^2 + 4.\tau^2} \quad (6-5)$$

La condition de résistance est telle que :

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_p \quad (6-6)$$

où σ_{\max} est la contrainte normale maximale, dans notre cas :

$$\sigma_{\max} = k.\sigma_r \quad (6-7)$$

avec k étant le coefficient de concentration de contraintes dû au filtage, pour un profil ISO, $k = 2,5$.

Après calcul pour une charge maximale de 5000 N, on trouve :

$$d_3 = 12,4 \text{ mm}$$

donc on a : $d = 13,6 \text{ mm}$

finalement on adoptera un diamètre nominal de la vis de 16 mm.

7. Calcul des vérins

7-1. calcul de la vis

Le calcul du diamètre nominal de la vis du vérin s'effectue de la même manière que pour les vis de réglage des blocs-support en vé, mis à part le filtage qu'on considère ici à pas gros qui nous amène à utiliser une autre relation pour le couple de serrage tel que :

$$C_s = 0,2.Q.d \quad (7-1-1)$$

En menant le même calcul que le paragraphe précédent on trouve un diamètre nominal de la vis de 36 mm pour une charge maximale de 3 tonnes.

7-2. calcul de la hauteur de l'écrou

La contrainte maximale admissible entre les filets de la vis et ceux de l'écrou doit satisfaire la relation :

$$\sigma_m = \frac{4.Q}{\pi.(d^2 - d_1^2).Z} \quad (7-2-1)$$

Z est le nombre de filets en prise

d_1 est le diamètre intérieur de l'écrou, il est donné par la relation : $d_1 = d - 1,0825.p$ (7-2-2)

En prenant $\sigma_m = 30 \text{ N/mm}^2$ (valeur recommandée pour vis en acier sur écrou ou bronze), on trouve $Z=3$. Cependant pour que les filets soit en bonne prise, compte tenu de la longueur de la vis on prendra $Z=9$, ce qui donnera un hauteur de l'écrou de 36 mm.

7-3. détermination du diamètre extérieur de l'écrou

L'écrou est sollicité à la compression sous la charge Q, la condition de résistance sera donnée par l'expression suivante :

$$\frac{4.Q}{\pi.(D^2 - d^2)} \leq \sigma_p \quad (7-3-1)$$

connaissant d, Q et la nature du matériau de l'écrou et en adoptant un coefficient de sécurité de 3, on trouve un diamètre extérieur D de l'écrou de 46 mm, cependant pour des raisons de conception, on adoptera un diamètre de 56 mm.

7-4. Dimensionnement du socle du vérin

Le socle du vérin est sollicité au flambage, on détermine ces dimensions d'après la méthode de Dutheil [19] qu'on utilisera comme vérification de la résistance du socle après avoir choisi ces dimensions selon l'encombrement. Après plusieurs tâtonnements, on a choisi un socle de configuration tubulaire sans soudure d'un diamètre extérieur de 56 mm et d'une épaisseur de 4 mm.

On a procédé comme suit :

on choisit d'abords les dimensions du socle par exemple (cas favorable) :

diamètre extérieur : $D = 56 \text{ mm}$

diamètre intérieur : $d = 48 \text{ mm}$

ensuite on adopte un modèle de l'état de charge tel que schématisé sur la figure ci-contre, on détermine selon ce modèle la longueur libre de flambage qui est donnée par : $L = 2.l$

l étant la longueur réelle qui est de 600 mm , par conséquent $L=1200 \text{ mm}$

On calcul ensuite la charge critique de flambement par :

$$F_c = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\alpha\beta}}{L^2} \quad (7-4-1)$$

où :

E : module de Young, $E = 200000 \text{ N/mm}^2$

$I_{\alpha\beta}$: moment quadratique

après calcul on trouve : $F_c = 304,55 \cdot 10^3 \text{ N}$

On détermine à présent la contrainte critique d'Euler par :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S} \quad (7-4-2)$$

on trouve : $\sigma_c = 466,06 \text{ N/mm}^2$.

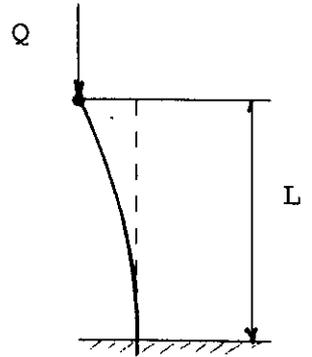
On détermine en parallèle la contrainte normale de compression correspondant à une charge de 3 tonnes telle que :

$$\sigma = Q/S = 45,91 \text{ N/mm}^2$$

On constate que σ est inférieure à σ_c , par ce fait on calcule la contrainte équivalente, dénotée σ_4 , par l'expression suivante:

$$\sigma_4 = 0,5 \cdot (\sigma_c + 1,3 \cdot \sigma_e) \quad (7-4-3)$$

où σ_e est la limite élastique du matériau du socle (E24), $\sigma_e = 240 \text{ N/mm}^2$, on trouve : $\sigma_4 = 389,03 \text{ N/mm}^2$



On calcule enfin la contrainte d'affaissement (ou contrainte critique) dénotée σ_2 par :

$$\sigma_2 = \sigma_4 - \sqrt{\sigma_4^2 - R_e \cdot \sigma_c} \quad (7-4-4)$$

on trouve après calcul : $\sigma_2 = 190,3 \text{ N/mm}^2$.

Le coefficient de sécurité correspondant à cet état de charge sera :

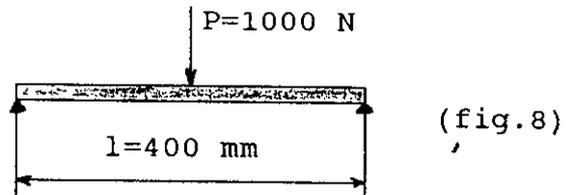
$$s = \sigma_2 / \sigma = 4,14 \quad (7-4-5)$$

cette valeur concorde parfaitement avec les valeurs du coefficient de sécurité recommandées pour les aciers comprises entre 4 et 5 [19], ce qui nous a amené d'ailleurs à choisir les dimensions du socle.

8. Diamètre de l'arbre de guidage du tube moteur

Chaque arbre est sollicité à la flexion (fig 8) par une charge maximale P de 1000 N.

Dans un tel cas la flèche maximale est donnée par l'expression suivante :



$$f_{\max} = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_{\alpha\beta}} \quad (8-1)$$

En fixant la flèche maximale à 0,2 mm on trouve un diamètre de 28,7 mm, par ailleurs et selon la normalisation des douilles à billes, on adoptera un diamètre de 30 mm.

9. Calcul du réservoir

Le calcul des réservoirs cylindriques épais se fait de la même manière que pour les tubes cylindriques à parois épaisses [19], on détermine l'épaisseur du réservoir comme dans le paragraphe 1 à l'aide de relation (1-1). La contrainte admissible à la traction σ_p du matériau du réservoir qui est de l'acier ordinaire, avec un coefficient de sécurité de 3, est de

120 N/mm² , la pression P₀ à l'intérieur du réservoir est estimée pour le cas le plus défavorable à environ 30 bars. On fixant le rayon intérieur du réservoir r₁ à 1 m on trouve e = 26 mm. Il conviendrait, toutefois, d'ajouter une surépaisseur de corrosion de 1 à 2 mm, on prendra finalement une valeur de l'épaisseur de 28 mm.

10. Calcul de l'épaisseur de la section des tests cté tuyère

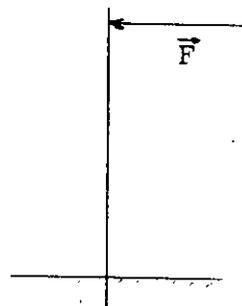
La pression maximale envisageable à la sortie de la tuyère est de l'ordre de 30 bars, en appliquant la formule des tubes épais (1-1), avec un diamètre intérieur d₁ de 600 mm et une contrainte pratique à la traction σ_p de 65 N/mm², on trouve une épaisseur de 15 mm.

11. Calcul des éléments du système de rupture des diaphragmes à basses pressions

11-1. Détermination du diamètre des pattes de fixation

Chaque patte de fixation est assimilée à une poutre encastree à une extrémité (figure ci-contre) sollicitée à la flexion sous une charge F de 150 N valeur estimée à partir d'une pression de 30 bars agissant sur le piston (planche 39). A partir de la condition de résistance à la flexion donnée par :

$$\frac{M_{f_{max}}}{(I_{\alpha\beta}/v)} \leq \sigma_p \quad (11-1-1)$$



on peut déterminer le diamètre, on trouve après calcul un diamètre de 8 mm.

11-2. Dimensionnement des ressorts de rappel

Les ressorts étant sollicités à la torsion, leur diamètre (diamètre du fil) est donnée par [19] :

$$d \geq \left[\frac{16.P.r}{\pi.Z} \right]^{1/3} \quad (11-2-1)$$

où P est l'effort, dans notre cas il correspond au poids d'une patte de fixation, r est le diamètre de la spire du ressort fixé à 5 mm et Z est le nombre de spires qu'on fixe à 4. Après calcul on trouve un diamètre d de 0,4 mm.

11-3. Détermination du diamètre de la vis

En utilisant la même méthode de calcul que celle du paragraphe 5, avec un pas fin (voir notamment le paragraphe 6) et une charge Q d'environ 100 N, on trouve après calcul un diamètre supérieur à 3 mm.

ANNEXE B

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour :

$M_s = 1.5$ (valeur nominale)

le gaz étant considéré comme parfait

θ (deg.)	M	T/T_0	P/P_0	ρ/ρ_0	a/a_0
0.064	1.001	.833000	.527543	.633305	.912688
0.319	1.033	.824064	.508001	.616457	.907780
0.575	1.053	.818527	.496153	.606154	.904725
0.830	1.069	.813791	.486178	.597424	.902104
1.085	1.085	.809476	.477216	.589536	.899709
1.341	1.099	.805434	.468926	.582203	.897460
1.596	1.112	.801585	.461130	.575273	.895313
1.851	1.125	.797904	.453761	.568691	.893255
2.107	1.137	.794356	.446739	.562391	.891267
2.362	1.149	.790917	.440006	.556324	.889335
2.617	1.161	.787557	.433498	.550434	.887444
2.873	1.172	.784287	.427231	.544738	.885600
3.128	1.183	.781129	.421240	.539271	.883815
3.383	1.194	.777979	.415325	.533851	.882031
3.639	1.205	.774895	.409590	.528575	.880281
3.894	1.215	.771854	.403992	.523405	.878552
4.149	1.226	.768852	.398520	.518331	.876842
4.405	1.236	.765887	.393167	.513348	.875150
4.660	1.246	.762956	.387925	.508450	.873473
4.915	1.256	.760055	.382787	.503631	.871811
5.171	1.266	.757182	.377747	.498885	.870162
5.426	1.276	.754335	.372799	.494209	.868524
5.681	1.285	.751512	.367939	.489598	.866898
5.937	1.295	.748711	.363162	.485050	.865281
5.691	1.304	.746104	.358755	.480838	.863773
5.436	1.313	.743410	.354242	.476509	.862212
5.177	1.323	.740699	.349741	.472177	.860639
4.919	1.332	.738002	.345305	.467891	.859071
4.660	1.341	.735316	.340925	.463644	.857505
4.400	1.350	.732637	.336598	.459433	.855942
4.140	1.360	.729975	.332336	.455271	.854385
3.881	1.369	.727327	.328136	.451153	.852834
3.621	1.378	.724692	.323995	.447079	.851289
3.362	1.387	.722065	.319903	.443039	.849744
3.103	1.396	.719455	.315873	.439045	.848207
2.846	1.405	.716875	.311926	.435119	.846684
2.586	1.414	.714284	.307998	.431198	.845153
2.328	1.423	.711708	.304128	.427321	.843628
2.069	1.432	.709140	.300305	.423478	.842105
1.810	1.441	.706581	.296529	.419668	.840584
1.552	1.449	.704030	.292799	.415890	.839065
1.293	1.458	.701487	.289114	.412145	.837548
1.034	1.467	.698952	.285473	.408431	.836033
0.776	1.476	.696424	.281876	.404747	.834520
0.517	1.485	.693903	.278321	.401095	.833008
0.259	1.494	.691388	.274807	.397471	.831498
0.000	1.502	.688881	.271334	.393877	.829988

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s=1.5$

$T_0=1000 \text{ K}$

θ (deg.)	M	T/T_0	P/P_0	ρ/ρ_0	a/a_0
0.066	1.001	.852402	.538012	.631172	.923256
0.331	1.033	.843932	.517771	.613522	.918658
0.597	1.053	.838780	.505749	.602958	.915850
0.862	1.070	.834370	.495630	.594017	.913439
1.127	1.085	.830378	.486604	.586004	.911251
1.392	1.099	.826623	.478232	.578537	.909188
1.657	1.113	.823049	.470366	.571493	.907221
1.922	1.125	.819595	.462860	.564742	.905315
2.188	1.138	.816264	.455708	.558285	.903473
2.453	1.150	.813033	.448851	.552070	.901683
2.718	1.162	.809884	.442247	.546062	.899936
2.983	1.173	.806806	.435862	.540232	.898224
3.248	1.184	.803782	.429660	.534547	.896539
3.513	1.195	.800851	.423713	.529078	.894903
3.779	1.206	.797941	.417871	.523687	.893275
4.044	1.216	.795071	.412170	.518407	.891667
4.309	1.226	.792235	.406597	.513227	.890076
4.574	1.237	.789431	.401142	.508141	.888499
4.839	1.247	.786656	.395800	.503142	.886936
5.104	1.257	.783908	.390562	.498225	.885386
5.370	1.267	.781183	.385423	.493384	.883846
5.635	1.277	.778481	.380378	.488615	.882316
5.900	1.286	.775793	.375408	.483903	.880791
6.165	1.296	.773127	.370530	.479262	.879277
5.912	1.305	.770665	.366067	.475002	.877875
5.643	1.314	.768062	.361394	.470528	.876392
5.375	1.323	.765480	.356803	.466118	.874917
5.107	1.333	.762916	.352291	.461769	.873451
4.839	1.342	.760359	.347833	.457459	.871986
4.570	1.351	.757810	.343432	.453190	.870523
4.300	1.360	.755262	.339076	.448951	.869058
4.031	1.369	.752727	.334783	.444760	.867598
3.761	1.378	.750202	.330550	.440615	.866142
3.492	1.388	.747688	.326375	.436513	.864689
3.223	1.397	.745183	.322256	.432452	.863240
2.954	1.405	.742684	.318186	.428427	.861791
2.686	1.414	.740210	.314196	.424468	.860354
2.418	1.423	.737733	.310239	.420531	.858914
2.149	1.432	.735262	.306331	.416628	.857474
1.880	1.441	.732798	.302470	.412760	.856036
1.612	1.450	.730340	.298656	.408927	.854599
1.343	1.459	.727887	.294887	.405127	.853163
1.075	1.467	.725440	.291162	.401360	.851728
0.806	1.476	.722998	.287482	.397625	.850293
0.538	1.485	.720561	.283845	.393922	.848859
0.269	1.494	.718126	.280246	.390246	.847423
0.000	1.502	.715697	.276690	.386602	.845989

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 1.5$ (valeur nominale)

$T_o = 2000$ K

θ (deg.)	M	T/T_o	P/P_o	ρ/ρ_o	a/a_o
0.068	1.001	.868250	.542692	.625041	.931800
0.137	1.013	.865223	.534646	.617929	.930173
0.410	1.039	.859179	.518873	.603917	.926919
0.683	1.058	.854650	.507300	.593576	.924473
0.956	1.074	.850695	.497364	.584657	.922331
1.229	1.089	.847065	.488385	.576561	.920361
1.502	1.103	.843656	.480071	.569036	.918508
1.775	1.117	.840410	.472259	.561939	.916739
2.048	1.129	.837288	.464844	.555178	.915034
2.321	1.142	.834256	.457732	.548672	.913376
2.594	1.154	.831316	.450921	.542418	.911765
2.867	1.165	.828445	.444348	.536364	.910190
3.414	1.187	.822875	.431813	.524762	.907124
3.687	1.198	.820160	.425809	.519178	.905627
3.960	1.209	.817483	.419954	.513715	.904148
4.233	1.219	.814840	.414236	.508365	.902685
4.506	1.230	.812227	.408646	.503118	.901236
4.779	1.240	.809642	.403175	.497967	.899801
5.052	1.250	.807082	.397815	.492905	.898377
5.325	1.260	.804544	.392558	.487926	.896964
5.598	1.270	.802026	.387399	.483025	.895559
5.871	1.279	.799528	.382333	.478198	.894163
6.145	1.289	.797047	.377354	.473440	.892775
6.286	1.298	.794648	.372590	.468874	.891430
6.010	1.308	.792226	.367830	.464300	.890071
5.732	1.317	.789804	.363118	.459757	.888709
5.456	1.326	.787400	.358490	.455283	.887356
5.179	1.336	.785008	.353932	.450863	.886007
4.903	1.345	.782628	.349441	.446497	.884663
4.626	1.354	.780258	.345017	.442183	.883322
4.350	1.363	.777897	.340654	.437916	.881985
4.073	1.372	.775541	.336344	.433689	.880648
3.797	1.381	.773198	.332100	.429515	.879317
3.521	1.390	.770861	.327912	.425384	.877987
3.245	1.399	.768531	.323779	.421295	.876659
2.968	1.408	.766209	.319699	.417248	.875334
2.692	1.417	.763892	.315671	.413241	.874009
2.416	1.425	.761580	.311692	.409270	.872685
2.140	1.434	.759273	.307762	.405338	.871363
1.864	1.443	.756971	.303880	.401442	.870041
1.587	1.452	.754674	.300045	.397583	.868720
1.311	1.461	.752381	.296256	.393759	.867399
1.035	1.469	.750092	.292512	.389969	.866078
0.759	1.478	.747807	.288813	.386213	.864758
0.483	1.487	.745526	.285156	.382490	.863438
0.206	1.495	.743239	.281529	.378787	.862113
0.000	1.502	.741539	.278856	.376051	.861127

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 1.5$ (valeur nominale)

$T_o = 3000$ K

θ (deg)	M	T/T_o	P/P_o	ρ/ρ_o	a/a_o
0.069	1.001	.875199	.546361	.624270	.935520
0.345	1.034	.867769	.525688	.605793	.931541
0.621	1.054	.863233	.513377	.594715	.929103
0.897	1.071	.859349	.503018	.585347	.927011
1.172	1.086	.855815	.493737	.576920	.925102
1.448	1.101	.852511	.485185	.569125	.923315
1.724	1.114	.849373	.477174	.561796	.921615
2.000	1.127	.846363	.469587	.554829	.919980
2.276	1.140	.843453	.462344	.548156	.918397
2.552	1.152	.840625	.455392	.541730	.916856
2.827	1.164	.837873	.448706	.535530	.915354
3.103	1.175	.835158	.442187	.529466	.913870
3.379	1.186	.832534	.435961	.523655	.912433
3.655	1.197	.829983	.429974	.518051	.911034
3.931	1.207	.827470	.424139	.512573	.909654
4.207	1.218	.824989	.418442	.507209	.908289
4.483	1.228	.822517	.412827	.501907	.906927
4.758	1.238	.820092	.407376	.496745	.905589
5.034	1.248	.817671	.401993	.491632	.904251
5.310	1.258	.815275	.396723	.486612	.902926
5.586	1.268	.812901	.391555	.481676	.901610
5.862	1.277	.810545	.386479	.476813	.900303
6.138	1.287	.808204	.381487	.472018	.899002
6.414	1.296	.805876	.376576	.467288	.897706
6.136	1.306	.803582	.371786	.462661	.896428
5.845	1.316	.801188	.366838	.457868	.895091
5.574	1.325	.798969	.362299	.453458	.893850
5.294	1.334	.796684	.357674	.448954	.892572
5.013	1.343	.794411	.353119	.444504	.891297
4.733	1.352	.792149	.348632	.440110	.890027
4.453	1.361	.789892	.344203	.435759	.888759
4.172	1.370	.787645	.339836	.431459	.887494
3.892	1.379	.785405	.335529	.427205	.886231
3.612	1.388	.783168	.331271	.422988	.884968
3.331	1.397	.780938	.327068	.418815	.883707
3.053	1.406	.778731	.322953	.414717	.882457
2.775	1.415	.776543	.318913	.410683	.881217
2.499	1.424	.774361	.314925	.406690	.879978
2.222	1.432	.772183	.310985	.402735	.878740
1.943	1.441	.770002	.307078	.398802	.877497
1.667	1.450	.767833	.303234	.394922	.876261
1.389	1.458	.765660	.299421	.391062	.875020
1.111	1.467	.763493	.295656	.387242	.873781
0.833	1.476	.761331	.291938	.383457	.872543
0.556	1.484	.759171	.288262	.379706	.871304
0.278	1.493	.757014	.284627	.375987	.870066
0.000	1.501	.754860	.281034	.372300	.868827

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 2$ (valeur nominale)

le gaz étant considéré comme parfait

θ (deg)	M	T/T_0	P/P_0	ρ/ρ_0	a/a_0
0.142	1.001	.833000	.527543	.633305	.912688
0.708	1.056	.817468	.493910	.604195	.904139
1.275	1.091	.807718	.473597	.586339	.898731
1.842	1.120	.799249	.456444	.571091	.894007
2.408	1.148	.791463	.441070	.557284	.889642
2.975	1.173	.784143	.426957	.544488	.885519
3.541	1.197	.777147	.413772	.532425	.881559
4.108	1.220	.770395	.401326	.520935	.877721
4.675	1.243	.763834	.389490	.509915	.873976
5.241	1.265	.757428	.378177	.499291	.870304
5.808	1.287	.751150	.367319	.489009	.866689
6.374	1.308	.744979	.356866	.479028	.863122
6.941	1.329	.738905	.346785	.469323	.859596
7.508	1.350	.732911	.337039	.459863	.856102
8.074	1.370	.726983	.327594	.450621	.852633
8.641	1.390	.721113	.318429	.441579	.849184
9.208	1.410	.715299	.309533	.432732	.845753
9.774	1.430	.709532	.300887	.424063	.842337
10.341	1.450	.703809	.292478	.415564	.838933
10.907	1.470	.698125	.284294	.407224	.835539
11.474	1.490	.692469	.276314	.399026	.832147
12.041	1.509	.686854	.268550	.390986	.828767
12.607	1.529	.681269	.260984	.383086	.825390
13.174	1.549	.675711	.253608	.375321	.822016
12.610	1.568	.670328	.246607	.367890	.818735
12.037	1.587	.664880	.239663	.360461	.815402
11.464	1.607	.659443	.232874	.353137	.812061
10.889	1.626	.654023	.226244	.345926	.808717
10.316	1.645	.648629	.219779	.338837	.805375
9.742	1.665	.643254	.213471	.331862	.802031
9.169	1.684	.637898	.207315	.324997	.798685
8.595	1.704	.632561	.201306	.318241	.795337
8.022	1.723	.627238	.195440	.311589	.791984
7.449	1.743	.621933	.189715	.305041	.788627
6.876	1.763	.616642	.184126	.298595	.785266
6.303	1.782	.611367	.178673	.292251	.781900
5.730	1.802	.606107	.173349	.286005	.778529
5.157	1.822	.600859	.168153	.279854	.775151
4.584	1.842	.595622	.163079	.273796	.771766
4.011	1.862	.590400	.158130	.267834	.768375
3.438	1.882	.585191	.153300	.261965	.764978
2.865	1.902	.579994	.148587	.256188	.761573
2.292	1.923	.574809	.143990	.250501	.758162
1.719	1.943	.569633	.139503	.244899	.754740
1.146	1.964	.564473	.135130	.239391	.751314
0.573	1.984	.559325	.130865	.233970	.747880
0.000	2.005	.554188	.126707	.228635	.744438

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 2$ (valeur nominale)

$T_o = 1000$ K

θ (deg.)	M	T/T_o	P/P_o	ρ/ρ_o	a/a_o
0.148	1.001	.852402	.538012	.631172	.923256
0.739	1.057	.837756	.503384	.600872	.915290
1.330	1.091	.828646	.482729	.582552	.910300
1.922	1.121	.820699	.465248	.566893	.905924
2.513	1.149	.813378	.449581	.552732	.901875
3.104	1.174	.806471	.435172	.539600	.898037
3.696	1.199	.799855	.421706	.527228	.894346
4.287	1.222	.793455	.408988	.515451	.890761
4.878	1.245	.787224	.396889	.504163	.887257
5.470	1.267	.781128	.385320	.493286	.883815
6.061	1.289	.775142	.374212	.482766	.880421
6.652	1.310	.769246	.363515	.472559	.877067
7.244	1.331	.763434	.353199	.462645	.873747
7.835	1.352	.757688	.343223	.452987	.870453
8.426	1.372	.751994	.333551	.443555	.867176
9.018	1.392	.746339	.324152	.434323	.863909
9.609	1.412	.740734	.315038	.425305	.860659
10.200	1.432	.735164	.306177	.416474	.857417
10.792	1.452	.729627	.297558	.407821	.854182
11.383	1.472	.724117	.289165	.399334	.850951
11.974	1.492	.718634	.280994	.391011	.847723
12.566	1.512	.713173	.273032	.382841	.844496
13.157	1.531	.707732	.265272	.374820	.841268
13.748	1.551	.702310	.257706	.366941	.838039
13.159	1.570	.697037	.250508	.359389	.834887
12.561	1.589	.691704	.243384	.351861	.831687
11.962	1.608	.686375	.236420	.344447	.828477
11.363	1.628	.681055	.229620	.337154	.825260
10.765	1.647	.675748	.222987	.329985	.822039
10.166	1.667	.670453	.216514	.322937	.818812
9.568	1.686	.665169	.210197	.316006	.815579
8.969	1.705	.659893	.204031	.309189	.812338
8.371	1.725	.654626	.198013	.302483	.809089
7.773	1.744	.649366	.192139	.295887	.805833
7.175	1.764	.644114	.186406	.289399	.802567
6.577	1.784	.638871	.180812	.283019	.799294
5.979	1.803	.633634	.175354	.276743	.796011
5.382	1.823	.628401	.170025	.270567	.792718
4.783	1.843	.623169	.164820	.264487	.789411
4.185	1.863	.617947	.159746	.258510	.786096
3.587	1.883	.612729	.154795	.252631	.782770
2.989	1.903	.607517	.149965	.246849	.779434
2.391	1.923	.602308	.145254	.241162	.776085
1.794	1.944	.597096	.140652	.235560	.772720
1.196	1.964	.591898	.136173	.230061	.769349
0.598	1.984	.586705	.131805	.224654	.765966
0.000	2.005	.581516	.127548	.219338	.762572

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 2$ (valeur nominale)

$T_0 = 2000$ K

θ (deg.)	M	T/T_0	P/P_0	ρ/ρ_0	a/a_0
0.154	1.001	.868250	.542692	.625041	.931800
0.769	1.058	.854675	.507365	.593634	.924487
1.384	1.093	.846231	.486341	.574714	.919908
1.999	1.123	.838877	.468606	.558611	.915902
2.614	1.150	.832098	.452725	.544076	.912194
3.229	1.176	.825687	.438106	.530596	.908673
3.844	1.201	.819536	.424439	.517901	.905282
4.459	1.224	.813574	.411521	.505818	.901983
5.074	1.247	.807761	.399231	.494245	.898755
5.689	1.269	.802065	.387478	.483100	.895581
6.304	1.291	.796432	.376128	.472266	.892430
6.919	1.313	.790877	.365199	.461764	.889312
7.534	1.334	.785415	.354702	.451612	.886236
8.149	1.355	.779963	.344469	.441648	.883155
8.764	1.376	.774578	.334595	.431971	.880101
9.379	1.396	.769234	.325020	.422525	.877060
9.994	1.417	.763924	.315726	.413295	.874027
10.609	1.436	.758708	.306806	.404380	.871039
11.224	1.456	.753513	.298123	.395644	.868052
11.839	1.476	.748317	.289636	.387049	.865053
12.454	1.496	.743163	.281408	.378663	.862069
13.069	1.515	.738022	.273390	.370436	.859082
13.684	1.535	.732893	.265574	.362364	.856092
14.299	1.554	.727776	.257954	.354442	.853098
13.680	1.573	.722710	.250585	.346729	.850123
13.058	1.593	.717638	.243376	.339134	.847135
12.436	1.612	.712568	.236335	.331666	.844137
11.814	1.631	.707507	.229470	.324337	.841134
11.191	1.650	.702451	.222773	.317136	.838124
10.568	1.670	.697401	.216239	.310064	.835105
9.944	1.689	.692354	.209863	.303115	.832078
9.321	1.708	.687310	.203642	.296288	.829042
8.698	1.728	.682270	.197572	.289580	.825996
8.074	1.747	.677216	.191631	.282969	.822931
7.450	1.767	.672164	.185836	.276474	.819856
6.827	1.786	.667126	.180196	.270109	.816778
6.202	1.806	.662067	.174672	.263828	.813675
5.579	1.825	.657021	.169295	.257671	.810568
4.958	1.845	.651999	.164077	.251651	.807465
4.337	1.864	.646970	.158979	.245728	.804344
3.719	1.884	.641966	.154032	.239937	.801228
3.256	1.899	.638217	.150407	.235667	.798885
2.480	1.924	.631928	.144477	.228628	.794939
1.860	1.944	.626910	.139879	.223125	.791776
1.240	1.964	.621887	.135395	.217716	.788598
0.620	1.984	.616863	.131023	.212403	.785406
0.000	2.004	.611838	.126763	.207184	.782200

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 2$ (valeur nominale)

$T_o = 3000$ K

θ (deg.)	M	T/T_o	P/P_o	ρ/ρ_o	a/a_o
0.156	1.001	.875199	.546361	.624270	.935520
0.782	1.058	.862250	.510738	.592332	.928574
1.040	1.094	.854168	.489460	.573025	.924212
2.033	1.124	.847136	.471526	.556611	.920400
2.659	1.152	.840636	.455419	.541755	.916862
3.285	1.178	.834496	.440611	.527996	.913508
3.910	1.203	.828603	.426761	.515036	.910276
4.536	1.226	.822892	.413676	.502709	.907134
5.162	1.249	.817323	.401225	.490901	.904059
5.787	1.272	.811871	.389329	.479545	.901039
6.413	1.294	.806499	.377886	.468550	.898053
7.039	1.315	.801207	.366877	.457905	.895102
7.664	1.337	.795978	.356254	.447567	.892176
8.290	1.358	.790823	.346024	.437550	.889282
8.916	1.378	.785726	.336143	.427812	.886412
9.541	1.398	.780664	.326555	.418304	.883552
10.167	1.419	.775630	.317240	.409010	.880699
10.793	1.439	.770622	.308186	.399918	.877851
11.418	1.459	.765636	.299378	.391018	.875006
12.044	1.478	.760668	.290805	.382302	.872163
12.670	1.498	.755716	.282458	.373762	.869319
13.295	1.518	.750778	.274328	.365391	.866475
13.921	1.537	.745853	.266406	.357183	.863628
14.547	1.557	.740937	.258684	.349131	.860777
13.914	1.576	.736075	.251226	.341305	.857948
13.278	1.595	.731204	.243929	.333599	.855105
12.643	1.615	.726341	.236815	.326038	.852256
12.008	1.634	.721485	.229879	.318619	.849402
11.374	1.653	.716633	.223114	.311336	.846542
10.739	1.672	.711785	.216515	.304186	.843674
10.105	1.692	.706940	.210078	.297166	.840797
9.471	1.711	.702098	.203800	.290273	.837913
8.838	1.730	.697259	.197680	.283509	.835020
8.204	1.749	.692417	.191703	.276861	.832116
7.570	1.769	.687578	.185878	.270337	.829203
6.938	1.788	.682745	.180203	.263938	.826284
6.309	1.807	.677942	.174702	.257695	.823372
5.681	1.827	.673137	.169337	.251563	.820449
5.051	1.846	.668325	.164097	.245534	.817512
4.421	1.866	.663506	.158981	.239607	.814559
3.790	1.885	.658681	.153989	.233783	.811592
3.159	1.905	.653851	.149118	.228062	.808610
2.528	1.924	.649016	.144369	.222443	.805615
1.896	1.944	.644177	.139739	.216926	.802607
1.264	1.964	.639335	.135226	.211510	.799584
0.632	1.984	.634490	.130829	.206196	.796549
0.000	2.004	.629642	.126546	.200980	.793500

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour :

$M_s = 3$ (valeur nominale)

le gaz étant considéré comme parfait

θ (deg.)	M	T/T_0	P/P_0	ρ/ρ_0	a/a_0
0.267	1.001	.833000	.527543	.633305	.912688
1.334	1.087	.808792	.475805	.588291	.899329
2.401	1.141	.793281	.444627	.560490	.890664
3.468	1.189	.779634	.418424	.536693	.882969
4.535	1.232	.766955	.395089	.515139	.875760
5.603	1.274	.754888	.373757	.495116	.868843
6.670	1.314	.743242	.353961	.476240	.862115
7.737	1.353	.731909	.335428	.458292	.855517
8.804	1.391	.720806	.317955	.441110	.849003
9.871	1.429	.709904	.301438	.424618	.842558
10.938	1.466	.699156	.285765	.408728	.836155
12.006	1.504	.688537	.270860	.393385	.829781
13.073	1.540	.678029	.256666	.378548	.823425
14.140	1.577	.667615	.243132	.364180	.817077
15.207	1.614	.657282	.230214	.350251	.810730
16.274	1.651	.647022	.217879	.336742	.804377
17.341	1.688	.636827	.206099	.323634	.798015
18.409	1.725	.626692	.194845	.310911	.791639
19.476	1.763	.616612	.184095	.298559	.785247
20.543	1.800	.606584	.173827	.286568	.778835
21.610	1.838	.596604	.164022	.274926	.772402
22.677	1.876	.586672	.154662	.263626	.765945
23.744	1.915	.576785	.145730	.252659	.759464
24.812	1.954	.566942	.137210	.242017	.752956
23.739	1.992	.557299	.129214	.231857	.746525
22.659	2.032	.547643	.121546	.221944	.740029
21.579	2.072	.538022	.114235	.212324	.733500
20.500	2.112	.528447	.107276	.203003	.726943
19.421	2.152	.518917	.100657	.193975	.720359
18.341	2.194	.509431	.094362	.185231	.713744
17.262	2.236	.499989	.088381	.176767	.707099
16.183	2.278	.490588	.082701	.168575	.700420
15.104	2.321	.481237	.077314	.160656	.693713
14.025	2.365	.471933	.072207	.153003	.686974
12.946	2.409	.462676	.067370	.145610	.680203
11.867	2.454	.453468	.062793	.138474	.673401
10.788	2.500	.444311	.058466	.131589	.666567
9.710	2.547	.435204	.054378	.124949	.659700
8.631	2.594	.426149	.050520	.118550	.652801
7.552	2.642	.417148	.046883	.112389	.645870
6.473	2.692	.408202	.043457	.106460	.638907
5.394	2.742	.399313	.040234	.100759	.631912
4.315	2.793	.390481	.037205	.095280	.624885
3.237	2.845	.381709	.034361	.090019	.617826
2.158	2.898	.372999	.031694	.084971	.610736
1.079	2.953	.364351	.029196	.080131	.603615
0.000	3.008	.355767	.026858	.075494	.596462

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 3$ (valeur nominale)

$T_o = 1000$ K

θ (deg.)	M	T/T_o	P/P_o	ρ/ρ_o	a/a_o
0.279	1.001	.852402	.538012	.631172	.923256
1.396	1.088	.829595	.484850	.584442	.910821
2.513	1.143	.815008	.453033	.555863	.902778
3.630	1.190	.802097	.426234	.531400	.895599
4.747	1.234	.790055	.402351	.509269	.888850
5.864	1.276	.778543	.380493	.488725	.882351
6.981	1.317	.767394	.360202	.469384	.876010
8.098	1.356	.756495	.341179	.450999	.869767
9.215	1.394	.745798	.323264	.433447	.863596
10.331	1.432	.735248	.306309	.416606	.857466
11.448	1.470	.724815	.290217	.400402	.851361
12.565	1.507	.714473	.274912	.384775	.845265
13.682	1.544	.704208	.260336	.369686	.839171
14.799	1.581	.694003	.246436	.355093	.833068
15.916	1.618	.683846	.233169	.340967	.826950
17.033	1.655	.673730	.220502	.327286	.820810
18.150	1.692	.663648	.208405	.314030	.814646
19.267	1.729	.653595	.196852	.301183	.808452
20.384	1.766	.643569	.185818	.288731	.802227
21.501	1.804	.633565	.175283	.276661	.795968
22.617	1.841	.623582	.165226	.264962	.789672
23.734	1.879	.613617	.155629	.253626	.783337
24.851	1.918	.603670	.146475	.242641	.776962
25.968	1.957	.593741	.137748	.232000	.770546
24.844	1.995	.583965	.129544	.221836	.764176
23.715	2.035	.574172	.121702	.211960	.757742
22.584	2.074	.564397	.114234	.202400	.751263
21.455	2.114	.554634	.107125	.193145	.744737
20.325	2.155	.544890	.100366	.184196	.738167
19.196	2.196	.535166	.093946	.175545	.731551
18.066	2.238	.525459	.087848	.167183	.724885
16.936	2.280	.515778	.082066	.159112	.718177
15.807	2.323	.506118	.076587	.151321	.711420
14.678	2.367	.496484	.071398	.143807	.704616
13.549	2.411	.486876	.066489	.136562	.697765
12.420	2.457	.477295	.061850	.129584	.690866
11.291	2.502	.467744	.057469	.122864	.683918
10.162	2.549	.458223	.053336	.116397	.676922
9.033	2.597	.448734	.049441	.110178	.669876
7.903	2.645	.439279	.045774	.104203	.662782
6.774	2.695	.429861	.042326	.098464	.655638
5.645	2.745	.420482	.039087	.092958	.648446
4.516	2.797	.411143	.036049	.087679	.641204
3.387	2.849	.401847	.033201	.082621	.633914
2.258	2.903	.392596	.030536	.077779	.626575
1.129	2.958	.383392	.028044	.073148	.619186
0.000	3.014	.374237	.025718	.068722	.611749

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 3$ (valeur nominale)

$T_o = 2000$ K

θ (deg.)	M	T/T_o	P/P_o	ρ/ρ_o	a/a_o
0.294	1.001	.868250	.542692	.625041	.931800
1.469	1.090	.846929	.488052	.576260	.920288
2.645	1.146	.833249	.455389	.546523	.912825
3.820	1.194	.821105	.427893	.521118	.906149
4.995	1.239	.809739	.403379	.498159	.899855
6.171	1.282	.798845	.380957	.476884	.893781
7.346	1.323	.788267	.360152	.456892	.887844
8.522	1.363	.777910	.340677	.437939	.881992
9.697	1.402	.767721	.322350	.419879	.876197
10.873	1.441	.757638	.305001	.402568	.870424
12.048	1.479	.747651	.288562	.385958	.864668
13.223	1.516	.737732	.272944	.369977	.858913
14.399	1.553	.727922	.258170	.354667	.853184
15.574	1.591	.718120	.244053	.339850	.847420
16.750	1.628	.708335	.230583	.325528	.841627
17.925	1.665	.698609	.217789	.311746	.835829
19.394	1.711	.686469	.202618	.295160	.828534
20.276	1.739	.679189	.193934	.285537	.824129
21.451	1.777	.669486	.182821	.273077	.818221
22.627	1.814	.659785	.172224	.261030	.812271
23.802	1.852	.650084	.162120	.249384	.806278
24.977	1.890	.640381	.152491	.238126	.800238
26.153	1.929	.630677	.143320	.227247	.794152
27.328	1.967	.620969	.134588	.216738	.788016
26.140	2.006	.611343	.126350	.206676	.781884
24.950	2.045	.601699	.118502	.196946	.775693
23.761	2.085	.592057	.111046	.187560	.769453
22.571	2.125	.582407	.103959	.178499	.763156
21.381	2.165	.572764	.097238	.169770	.756812
20.191	2.206	.563118	.090862	.161355	.750412
19.001	2.248	.553475	.084821	.153251	.743959
17.812	2.290	.543837	.079102	.145452	.737453
16.621	2.333	.534197	.073690	.137946	.730888
15.431	2.376	.524565	.068576	.130729	.724268
14.240	2.420	.514939	.063747	.123796	.717593
13.053	2.465	.505348	.059204	.117155	.710878
11.863	2.510	.495749	.054914	.110770	.704095
10.673	2.556	.486159	.050874	.104644	.697251
9.486	2.603	.476604	.047082	.098787	.690365
8.300	2.651	.467068	.043521	.093179	.683424
7.115	2.700	.457554	.040180	.087814	.676427
5.931	2.749	.448063	.037048	.082685	.669375
4.748	2.800	.438601	.034118	.077787	.662270
3.561	2.851	.429135	.031368	.073096	.655084
2.374	2.904	.419692	.028799	.068619	.647836
1.187	2.958	.410278	.026402	.064352	.640530
0.000	3.013	.400894	.024169	.060287	.633162

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 3$ (valeur nominale)

$T_0 = 3000$ K

θ (deg.)	M	T/T_0	P/P_0	ρ/ρ_0	a/a_0
0.303	1.001	.875199	.546361	.624270	.935520
1.513	1.091	.854707	.490856	.574298	.924504
2.724	1.148	.841537	.457626	.543797	.917353
3.934	1.197	.829837	.429633	.517732	.910954
5.145	1.243	.818871	.404655	.494162	.904915
6.355	1.286	.808370	.381840	.472358	.899094
7.566	1.328	.798161	.360658	.451862	.893398
8.777	1.368	.788160	.340834	.432443	.887784
9.987	1.408	.778311	.322174	.413940	.882219
11.198	1.447	.768573	.304541	.396242	.876683
12.408	1.485	.758917	.287831	.379266	.871158
13.619	1.523	.749322	.271967	.362950	.865634
14.829	1.561	.739773	.256884	.347247	.860101
16.040	1.599	.730271	.242552	.332140	.854559
17.251	1.637	.720801	.228916	.317586	.849000
18.461	1.674	.711352	.215933	.303554	.843417
19.672	1.712	.701907	.203557	.290006	.837799
20.882	1.749	.692465	.191763	.276928	.832145
22.093	1.787	.683025	.180529	.264307	.826453
23.303	1.825	.673584	.169830	.252129	.820722
24.514	1.863	.664137	.159644	.240378	.814946
25.725	1.901	.654683	.149949	.229040	.809125
26.935	1.940	.645225	.140732	.218112	.803259
28.146	1.979	.635760	.131971	.207580	.797346
26.923	2.018	.626381	.123730	.197531	.791443
25.701	2.057	.617000	.115907	.187855	.785494
24.476	2.096	.607589	.108464	.178516	.779480
23.251	2.136	.598176	.101412	.169534	.773419
22.028	2.177	.588764	.094733	.160902	.767310
20.804	2.217	.579342	.088408	.152601	.761145
19.580	2.259	.569913	.082423	.144623	.754926
18.357	2.300	.560480	.076766	.136965	.748652
17.133	2.343	.551042	.071423	.129614	.742322
15.909	2.386	.541600	.066381	.122565	.735935
14.684	2.429	.532157	.061629	.115809	.729491
13.460	2.474	.522707	.057151	.109336	.722985
12.235	2.518	.513259	.052938	.103141	.716421
11.010	2.564	.503817	.048980	.097218	.709801
9.786	2.610	.494383	.045266	.091561	.703124
8.562	2.658	.484953	.041782	.086157	.696386
7.338	2.705	.475532	.038519	.081002	.689588
6.114	2.754	.466123	.035466	.076088	.682732
4.890	2.804	.456728	.032614	.071407	.675816
3.667	2.855	.447348	.029951	.066952	.668841
2.444	2.906	.437986	.027469	.062716	.661805
1.221	2.959	.428647	.025158	.058692	.654712
0.000	3.013	.419330	.023010	.054872	.647557

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 4$ (valeur nominale)

le gaz étant considéré comme parfait

θ (deg.)	M	T/T_0	P/P_0	ρ/ρ_0	a/a_0
0.353	1.001	.833000	.527543	.633304	.912688
1.764	1.106	.803483	.464962	.578684	.896372
3.175	1.172	.784358	.427366	.544861	.885640
4.587	1.231	.767380	.395856	.515853	.876002
5.998	1.286	.751501	.367921	.489581	.866892
7.409	1.338	.736300	.342525	.465197	.858079
8.820	1.389	.721564	.319126	.442270	.849449
10.231	1.439	.707166	.297389	.420537	.840932
11.643	1.488	.693028	.277094	.399831	.832483
13.054	1.537	.679085	.258068	.380024	.824066
14.465	1.586	.665318	.240217	.361055	.815671
15.876	1.634	.651691	.223433	.342851	.807274
17.288	1.683	.638186	.207642	.325363	.798866
18.699	1.732	.624786	.192779	.308553	.790434
20.110	1.782	.611482	.178790	.292388	.781973
21.521	1.832	.598265	.165625	.276843	.773476
22.933	1.882	.585130	.153244	.261898	.764938
24.344	1.933	.572074	.141607	.247532	.756356
25.755	1.985	.559095	.130677	.233730	.747727
27.166	2.038	.546192	.120422	.220477	.739048
28.578	2.091	.533363	.110810	.207757	.730317
29.989	2.145	.520609	.101810	.195560	.721533
31.400	2.200	.507932	.093394	.183872	.712694
32.811	2.256	.495334	.085535	.172681	.703800
31.388	2.313	.482982	.078299	.162116	.694969
29.961	2.371	.470673	.071535	.151984	.686056
28.534	2.430	.458445	.065239	.142304	.677086
27.107	2.490	.446307	.059391	.133071	.668062
25.680	2.552	.434258	.053965	.124271	.658982
24.253	2.615	.422301	.048942	.115893	.649847
22.826	2.679	.410440	.044297	.107926	.640656
21.400	2.745	.398678	.040011	.100359	.631409
19.973	2.813	.387014	.036062	.093179	.622105
18.546	2.883	.375460	.032432	.086379	.612748
17.120	2.955	.364015	.029102	.079946	.603336
15.693	3.029	.352682	.026052	.073868	.593870
14.266	3.105	.341464	.023265	.068134	.584350
12.840	3.183	.330367	.020725	.062732	.574776
11.413	3.263	.319393	.018414	.057652	.565149
9.987	3.347	.308546	.016316	.052881	.555469
8.560	3.433	.297830	.014418	.048409	.545738
7.133	3.521	.287249	.012703	.044223	.535956
5.707	3.613	.276807	.011159	.040313	.526124
4.280	3.709	.266507	.009772	.036667	.516243
2.853	3.808	.256352	.008530	.033273	.506312
1.427	3.910	.246347	.007420	.030121	.496334
0.000	4.017	.236496	.006433	.027199	.486308

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 4$ (valeur nominale)

$T_o = 1000$ K

θ (deg.)	M	T/T_o	P/P_o	ρ/ρ_o	a/a_o
0.368	1.001	.852402	.538012	.631172	.923256
1.838	1.106	.824708	.474006	.574756	.908135
3.308	1.173	.806726	.435698	.540082	.898179
4.779	1.232	.790662	.403529	.510369	.889192
6.249	1.287	.775565	.374989	.483504	.880662
7.719	1.339	.761043	.349021	.458608	.872378
9.190	1.390	.746901	.325077	.435235	.864234
10.660	1.440	.733024	.302822	.413114	.856168
12.130	1.489	.719337	.282031	.392071	.848137
13.601	1.538	.705792	.262545	.371986	.840114
15.071	1.587	.692354	.244244	.352773	.832078
16.541	1.635	.679000	.227034	.334365	.824015
18.012	1.684	.665713	.210842	.316715	.815913
19.482	1.733	.652480	.195600	.299780	.807762
20.952	1.782	.639289	.181254	.283524	.799556
22.423	1.832	.626136	.167757	.267923	.791288
23.893	1.882	.613016	.155064	.252952	.782954
25.364	1.933	.599927	.143138	.238591	.774550
26.834	1.984	.586867	.131941	.224822	.766073
28.304	2.036	.573836	.121439	.211626	.757520
29.775	2.089	.560835	.111601	.198990	.748889
31.245	2.143	.547864	.102394	.186897	.740179
32.715	2.197	.534927	.093791	.175335	.731387
34.186	2.253	.522024	.085763	.164289	.722512
32.703	2.309	.509326	.078375	.153880	.713671
31.215	2.366	.496632	.071475	.143920	.704721
29.728	2.425	.483979	.065060	.134427	.695686
28.241	2.485	.471381	.059108	.125394	.686572
26.755	2.546	.458834	.053594	.116805	.677373
25.268	2.609	.446346	.048495	.108648	.668091
23.782	2.673	.433918	.043786	.100910	.658724
22.295	2.739	.421555	.039448	.093578	.649273
20.809	2.807	.409263	.035459	.086640	.639737
19.322	2.877	.397046	.031798	.080085	.630116
17.836	2.949	.384909	.028444	.073899	.620411
16.350	3.023	.372859	.025381	.068070	.610622
14.863	3.099	.360898	.022587	.062586	.600748
13.377	3.178	.349033	.020046	.057434	.590790
11.891	3.259	.337269	.017741	.052602	.580749
10.404	3.343	.325612	.015655	.048078	.570624
8.918	3.430	.314067	.013772	.043849	.560417
7.432	3.521	.302641	.012077	.039904	.550129
5.945	3.614	.291339	.010555	.036229	.539758
4.459	3.712	.280166	.009194	.032814	.529307
2.973	3.813	.269129	.007979	.029647	.518777
1.486	3.918	.258234	.006899	.026715	.508167
0.000	4.028	.247485	.005941	.024007	.497479

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 4$ (valeur nominale)

$T_o = 2000$ K

θ (deg.)	M	T/T_o	P/P_o	ρ/ρ_o	a/a_o
0.388	1.001	.868250	.542692	.625041	.931800
1.942	1.109	.842299	.476792	.566061	.917768
3.495	1.177	.825374	.437401	.529943	.908501
5.048	1.238	.810192	.404334	.499060	.900107
6.601	1.294	.795863	.374997	.471183	.892112
8.155	1.347	.782034	.348329	.445414	.884327
9.708	1.399	.768525	.323768	.421284	.876656
11.261	1.450	.755229	.300969	.398513	.869039
12.814	1.500	.742080	.279703	.376918	.861440
14.368	1.549	.729031	.259807	.356373	.853833
15.921	1.599	.716052	.241154	.336784	.846198
17.474	1.648	.703119	.223649	.318081	.838522
19.028	1.697	.690220	.207213	.300212	.830795
20.581	1.746	.677371	.191812	.283171	.823026
22.134	1.796	.664548	.177364	.266894	.815198
23.687	1.846	.651726	.163796	.251327	.807295
25.241	1.896	.638901	.151063	.236442	.799313
26.794	1.947	.626073	.139124	.222217	.791248
28.347	1.999	.613239	.127940	.208630	.783096
29.900	2.051	.600400	.117475	.195661	.774855
31.454	2.104	.587556	.107694	.183292	.766522
33.007	2.157	.574709	.098565	.171504	.758096
34.560	2.212	.561862	.090056	.160281	.749574
36.114	2.267	.549015	.082135	.149605	.740955
34.543	2.323	.536292	.074841	.139552	.732320
32.970	2.381	.523565	.068062	.129997	.723578
31.397	2.439	.510850	.061778	.120932	.714738
29.824	2.499	.498150	.055964	.112343	.705797
26.680	2.622	.472813	.045640	.096529	.687614
25.108	2.686	.460184	.041083	.089275	.678369
23.537	2.752	.447588	.036897	.082434	.669020
21.966	2.819	.435030	.033059	.075993	.659568
20.394	2.888	.422514	.029549	.069937	.650011
18.823	2.959	.410047	.026345	.064250	.640349
17.252	3.032	.397638	.023429	.058920	.630585
15.685	3.108	.385315	.020784	.053941	.620738
14.120	3.185	.373071	.018389	.049291	.610795
12.551	3.266	.360874	.016219	.044943	.600728
10.983	3.349	.348753	.014261	.040893	.590553
10.198	3.392	.342723	.013357	.038974	.585426
9.806	3.413	.339716	.012923	.038041	.582852
9.414	3.435	.336715	.012501	.037125	.580271
7.845	3.524	.324774	.010922	.033630	.569889
6.276	3.617	.312921	.009510	.030390	.559393
4.707	3.713	.301171	.008250	.027394	.548790
1.569	3.917	.278008	.006139	.022083	.527264
0.000	4.026	.266609	.005264	.019744	.516342

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 4$ (valeur nominale)

$T_o = 3000$ K

θ (deg.)	M	T/T_o	P/P_o	ρ/ρ_o	a/a_o
0.400	1.001	.875199	.546361	.624270	.935520
2.001	1.111	.850212	.479305	.563748	.922069
3.602	1.180	.833897	.439186	.526667	.913180
5.202	1.241	.819249	.405497	.494961	.905124
6.803	1.298	.805413	.375606	.466351	.897448
8.404	1.353	.792052	.348442	.439923	.889973
10.004	1.405	.778991	.323436	.415199	.882605
11.605	1.457	.766130	.300242	.391894	.875288
13.206	1.507	.753402	.278625	.369822	.867987
14.807	1.557	.740766	.258420	.348854	.860677
16.407	1.607	.728189	.239499	.328897	.853340
18.008	1.657	.715651	.221764	.309878	.845962
19.609	1.707	.703139	.205137	.291745	.838534
21.209	1.757	.690647	.189556	.274462	.831052
22.810	1.807	.678161	.174950	.257978	.823505
24.411	1.857	.665670	.161262	.242255	.815886
26.012	1.907	.653171	.148443	.227266	.808190
27.612	1.959	.640660	.136450	.212983	.800412
29.213	2.010	.628136	.125239	.199381	.792550
30.814	2.063	.615597	.114771	.186439	.784600
32.415	2.115	.603044	.105011	.174135	.776559
34.015	2.169	.590477	.095922	.162448	.768425
35.616	2.224	.577898	.087470	.151358	.760196
37.217	2.279	.565307	.079621	.140845	.751869
35.599	2.335	.552835	.072414	.130987	.743529
33.981	2.392	.540353	.065738	.121656	.735087
32.362	2.449	.527868	.059563	.112836	.726545
30.743	2.508	.515382	.053862	.104509	.717901
29.125	2.569	.502899	.048608	.096656	.709153
27.505	2.630	.490422	.043775	.089261	.700301
25.886	2.693	.477954	.039338	.082304	.691342
24.266	2.758	.465501	.035272	.075771	.682276
22.646	2.824	.453066	.031553	.069642	.673102
21.026	2.891	.440653	.028159	.063902	.663817
19.407	2.961	.428267	.025068	.058533	.654421
17.788	3.033	.415912	.022259	.053518	.644912
16.169	3.106	.403597	.019713	.048843	.635293
14.552	3.182	.391332	.017412	.044494	.625565
12.936	3.260	.379122	.015337	.040453	.615729
11.321	3.341	.366973	.013470	.036706	.605783
9.706	3.424	.354886	.011795	.033236	.595723
8.088	3.511	.342843	.010293	.030021	.585528
6.471	3.601	.330871	.008952	.027055	.575214
4.853	3.694	.318977	.007758	.024322	.564781
3.235	3.790	.307167	.006699	.021811	.554227
1.618	3.891	.295449	.005763	.019507	.543552
0.000	3.996	.283828	.004938	.017398	.532755

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour :

$M_s = 5$ (valeur nominale)

le gaz étant considéré comme parfait

θ (deg.)	M	T/T_o	P/P_o	ρ/ρ_o	a/a_o
0.413	1.001	.833000	.527543	.633304	.912688
2.067	1.118	.799941	.457828	.572327	.894394
3.720	1.193	.778362	.416041	.534508	.882248
5.374	1.259	.759102	.381110	.502054	.871265
7.028	1.322	.741009	.350254	.472671	.860819
8.681	1.382	.723634	.322341	.445448	.850667
10.335	1.440	.706745	.296769	.419910	.840681
11.988	1.498	.690209	.273170	.395778	.830788
13.642	1.555	.673944	.251295	.372872	.820941
15.295	1.612	.657891	.230962	.351063	.811105
16.949	1.669	.642016	.212036	.330266	.801259
18.602	1.727	.626291	.194409	.310413	.791385
20.256	1.785	.610699	.177990	.291453	.781472
21.909	1.843	.595228	.162702	.273343	.771510
23.563	1.903	.579868	.148475	.256049	.761491
25.216	1.963	.564615	.135249	.239542	.751409
26.870	2.024	.549466	.122968	.223796	.741260
28.523	2.087	.534420	.111581	.208789	.731041
30.177	2.150	.519478	.101038	.194499	.720748
31.831	2.215	.504641	.091293	.180907	.710381
33.484	2.281	.489904	.082298	.167988	.699931
35.138	2.349	.475286	.074019	.155735	.689410
36.791	2.418	.460782	.066410	.144124	.678809
38.445	2.490	.446398	.059433	.133139	.668130
36.777	2.562	.432323	.053129	.122891	.657513
35.105	2.636	.418336	.047352	.113191	.646789
33.433	2.713	.404486	.042088	.104054	.635992
31.761	2.791	.390774	.037303	.095459	.625119
30.089	2.873	.377203	.032962	.087385	.614169
28.418	2.956	.363783	.029037	.079819	.603144
26.746	3.043	.350516	.025496	.072740	.592044
25.074	3.133	.337412	.022313	.066130	.580871
23.403	3.226	.324473	.019459	.059972	.569625
21.731	3.322	.311707	.016909	.054246	.558307
20.059	3.422	.299119	.014637	.048934	.546918
18.388	3.526	.286716	.012621	.044018	.535459
16.716	3.634	.274504	.010837	.039479	.523931
15.045	3.747	.262487	.009266	.035300	.512335
13.373	3.865	.250673	.007886	.031461	.500673
11.702	3.988	.239068	.006681	.027945	.488945
10.030	4.117	.227676	.005631	.024734	.477154
8.358	4.253	.216504	.004722	.021810	.465300
6.687	4.395	.205557	.003938	.019157	.453384
5.015	4.544	.194839	.003265	.016757	.441406
3.343	4.702	.184361	.002691	.014594	.429373
1.672	4.869	.174124	.002203	.012652	.417282
0.000	5.045	.164135	.001791	.010914	.405151

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 5$ (valeur nominale)

$T_o = 1000$ K

θ (deg.)	M	T/T_o	P/P_o	ρ/ρ_o	a/a_o
0.428	1.001	.852402	.538012	.631172	.923256
2.138	1.118	.821551	.467100	.568558	.906395
3.849	1.193	.801339	.424699	.529987	.895176
5.559	1.259	.783186	.389196	.496939	.884978
7.270	1.321	.766039	.357793	.467070	.875236
8.981	1.381	.749484	.329353	.439440	.865727
10.691	1.439	.733312	.303272	.413565	.856336
12.402	1.496	.717400	.279179	.389154	.846995
14.112	1.553	.701672	.256828	.366022	.837659
15.823	1.610	.686080	.236039	.344040	.828299
17.533	1.666	.670588	.216677	.323115	.818894
19.244	1.723	.655174	.198633	.303176	.809428
20.955	1.780	.639823	.181818	.284170	.799889
22.665	1.838	.624523	.166155	.266051	.790268
24.376	1.896	.609259	.151567	.248772	.780551
26.086	1.956	.594045	.138009	.232321	.770743
27.797	2.016	.578868	.125417	.216658	.760834
29.507	2.077	.563732	.113739	.201761	.750821
31.218	2.139	.548638	.102927	.187604	.740701
32.929	2.203	.533587	.092933	.174166	.730470
34.639	2.268	.518585	.083712	.161425	.720128
36.350	2.335	.503635	.075223	.149360	.709672
38.060	2.403	.488743	.067423	.137951	.699102
39.771	2.473	.473915	.060272	.127178	.688415
38.044	2.544	.459338	.053808	.117143	.677745
36.315	2.617	.444812	.047894	.107673	.666942
34.585	2.692	.430367	.042506	.098767	.656023
32.856	2.770	.416011	.037610	.090406	.644989
31.126	2.850	.401754	.033174	.082572	.633841
29.397	2.933	.387605	.029165	.075245	.622579
27.668	3.018	.373568	.025554	.068405	.611202
25.938	3.107	.359655	.022310	.062033	.599712
24.209	3.199	.345872	.019407	.056109	.588108
22.480	3.295	.332229	.016816	.050614	.576393
20.751	3.395	.318733	.014511	.045528	.564564
19.022	3.498	.305395	.012470	.040833	.552626
17.292	3.607	.292223	.010669	.036509	.540577
15.563	3.720	.279223	.009085	.032536	.528415
13.834	3.839	.266409	.007698	.028897	.516149
12.104	3.963	.253789	.006490	.025573	.503775
10.375	4.094	.241372	.005442	.022547	.491297
8.646	4.231	.229167	.004537	.019799	.478714
6.917	4.376	.217183	.003760	.017314	.466029
5.188	4.529	.205430	.003096	.015073	.453244
3.458	4.691	.193916	.002533	.013060	.440359
1.729	4.864	.182652	.002057	.011260	.427378
0.000	5.047	.171645	.001657	.009656	.414301

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 5$ (valeur nominale)

$T_o = 3000$ K

θ (deg.)	M	T/T_o	P/P_o	ρ/ρ_o	a/a_o
0.470	1.001	.875199	.546361	.624270	.935520
2.349	1.124	.847182	.471642	.556718	.920425
4.228	1.202	.828688	.426960	.515224	.910323
6.107	1.271	.811973	.389549	.479756	.901096
7.986	1.336	.796102	.356502	.447810	.892245
9.864	1.398	.780706	.326635	.418384	.883576
11.743	1.459	.765602	.299319	.390959	.874987
13.622	1.518	.750680	.274168	.365226	.866418
15.501	1.577	.735873	.250921	.340984	.857830
17.380	1.635	.721136	.229388	.318093	.849197
19.259	1.694	.706440	.209423	.296448	.840500
21.138	1.752	.691761	.190906	.275971	.831722
23.017	1.811	.677090	.173742	.256600	.822855
24.896	1.870	.662420	.157846	.238287	.813892
26.775	1.930	.647740	.143137	.220979	.804823
28.654	1.990	.633045	.129541	.204631	.795641
30.533	2.051	.618331	.116991	.189205	.786340
32.412	2.113	.603596	.105426	.174663	.776915
34.291	2.176	.588844	.094788	.160974	.767362
36.170	2.240	.574073	.085022	.148103	.757676
38.049	2.306	.559290	.076075	.136021	.747857
39.928	2.373	.544494	.067895	.124694	.737899
41.807	2.441	.529686	.060432	.114090	.727795
43.686	2.511	.514890	.053647	.104191	.717558
41.785	2.582	.500237	.047543	.095041	.707275
39.884	2.654	.485594	.042012	.086517	.696845
37.984	2.729	.470971	.037014	.078591	.686273
36.083	2.806	.456368	.032508	.071232	.675550
34.181	2.885	.441791	.028457	.064413	.664673
32.281	2.967	.427253	.024827	.058109	.653646
30.382	3.051	.412762	.021584	.052292	.642466
28.482	3.139	.398318	.018695	.046935	.631125
26.582	3.229	.383943	.016131	.042015	.619631
24.683	3.323	.369637	.013863	.037505	.607978
22.783	3.421	.355404	.011863	.033379	.596157
20.884	3.522	.341271	.010108	.029619	.584184
18.986	3.628	.327247	.008574	.026200	.572055
17.090	3.739	.313344	.007238	.023100	.559771
15.192	3.855	.299541	.006078	.020290	.547303
13.293	3.977	.285870	.005076	.017756	.534668
11.394	4.105	.272342	.004215	.015476	.521864
9.495	4.240	.258971	.003479	.013433	.508892
7.596	4.383	.245768	.002853	.011608	.495750
5.697	4.533	.232747	.002324	.009984	.482439
3.798	4.693	.219928	.001879	.008545	.468965
1.899	4.863	.207308	.001508	.007273	.455311
0.000	5.045	.194917	.001200	.006156	.441494

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

pour $M_s = 6$ (valeur nominale)

le gaz étant considéré comme parfait.

θ (deg.)	M	T/T_0	P/P_0	ρ/ρ_0	a/a_0
0.457	1.001	.833000	.527543	.633304	.912688
2.283	1.126	.797514	.452986	.567997	.893036
4.109	1.207	.774219	.408341	.527423	.879897
5.935	1.279	.753350	.371098	.492597	.867957
7.761	1.347	.733697	.338306	.461097	.856561
9.587	1.412	.714783	.308753	.431953	.845449
11.413	1.476	.696370	.281799	.404669	.834488
13.239	1.539	.678318	.257050	.378951	.823601
15.065	1.603	.660544	.234237	.354613	.812739
16.891	1.666	.642992	.213167	.331523	.801868
18.717	1.729	.625625	.193686	.309589	.790965
20.543	1.793	.608419	.175675	.288740	.780012
22.369	1.858	.591359	.159030	.268923	.768999
24.195	1.924	.574434	.143661	.250092	.757914
26.021	1.991	.557636	.129488	.232208	.746751
27.847	2.059	.540958	.116432	.215233	.735498
29.673	2.129	.524413	.104438	.199151	.724164
31.499	2.200	.507995	.093434	.183928	.712737
33.325	2.273	.491708	.083363	.169538	.701219
35.151	2.348	.475557	.074167	.155957	.689606
36.977	2.424	.459546	.065789	.143160	.677898
38.803	2.503	.443681	.058176	.131122	.666094
40.629	2.585	.427968	.051279	.119820	.654193
42.455	2.668	.412415	.045048	.109229	.642196
40.612	2.754	.397219	.039501	.099443	.630253
38.766	2.842	.382164	.034505	.090287	.618194
36.919	2.934	.367288	.030028	.081755	.606043
35.073	3.029	.352601	.026031	.073826	.593802
33.227	3.128	.338109	.022475	.066473	.581472
31.381	3.230	.323821	.019323	.059671	.569052
29.535	3.337	.309743	.016539	.053395	.556546
27.689	3.449	.295885	.014091	.047622	.543953
25.843	3.565	.282254	.011946	.042325	.531275
23.998	3.687	.268859	.010077	.037481	.518516
22.152	3.814	.255705	.008454	.033063	.505672
20.306	3.948	.242801	.007053	.029049	.492749
18.460	4.089	.230156	.005849	.025413	.479746
16.614	4.237	.217778	.004820	.022133	.466667
14.768	4.393	.205671	.003946	.019184	.453510
12.922	4.559	.193849	.003207	.016545	.440283
11.076	4.734	.182316	.002588	.014193	.426985
9.230	4.921	.171079	.002071	.012106	.413618
7.384	5.119	.160147	.001644	.010264	.400184
5.538	5.332	.149525	.001293	.008645	.386685
3.692	5.559	.139221	.001007	.007232	.373123
1.846	5.803	.129240	.000776	.006005	.359500
0.000	6.066	.119591	.000591	.004946	.345819

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 6$ (valeur nominale)

$T_o = 1000$ K

θ (deg.)	M	T/T_o	P/P_o	ρ/ρ_o	a/a_o
0.470	1.001	.852402	.538012	.631172	.923256
2.351	1.126	.819380	.462395	.564323	.905196
4.232	1.207	.797615	.417221	.523086	.893093
6.113	1.278	.777991	.379468	.487753	.882038
7.994	1.345	.759397	.346166	.455844	.871434
9.875	1.410	.741401	.316113	.426372	.861047
11.756	1.473	.723787	.288668	.398830	.850757
13.637	1.536	.706428	.263437	.372914	.840493
15.518	1.598	.689249	.240157	.348432	.830210
17.399	1.660	.672191	.218622	.325238	.819872
19.280	1.723	.655238	.198705	.303257	.809468
21.160	1.786	.638359	.180274	.282402	.798974
23.041	1.849	.621543	.163227	.262616	.788380
24.922	1.914	.604780	.147475	.243850	.777676
26.803	1.979	.588065	.132939	.226062	.766854
28.684	2.046	.571398	.119546	.209216	.755908
30.565	2.114	.554779	.107228	.193281	.744835
32.446	2.183	.538211	.095922	.178224	.733629
34.327	2.254	.521701	.085569	.164018	.722289
36.208	2.327	.505253	.076109	.150636	.710812
38.089	2.402	.488875	.067489	.138049	.699196
39.970	2.479	.472573	.059654	.126232	.687440
41.851	2.558	.456364	.052555	.115161	.675547
43.732	2.640	.440238	.046136	.104798	.663504
41.833	2.724	.424415	.040422	.095242	.651471
39.931	2.811	.408676	.035276	.086318	.639278
38.029	2.900	.393061	.030666	.078019	.626946
36.127	2.993	.377583	.026551	.070319	.614478
34.225	3.090	.362250	.022891	.063191	.601872
32.324	3.191	.347074	.019648	.056611	.589130
30.423	3.296	.332071	.016787	.050553	.576256
28.522	3.406	.317242	.014272	.044987	.563242
26.619	3.521	.302595	.012070	.039888	.550086
24.718	3.641	.288165	.010154	.035238	.536810
22.816	3.768	.273942	.008493	.031003	.523394
20.915	3.901	.259952	.007061	.027165	.509855
19.014	4.042	.246199	.005834	.023695	.496184
17.113	4.190	.232698	.004787	.020571	.482388
15.211	4.348	.219461	.003900	.017770	.468467
13.310	4.515	.206501	.003153	.015269	.454424
11.408	4.693	.193829	.002529	.013046	.440261
9.507	4.883	.181459	.002010	.011079	.425980
7.606	5.086	.169402	.001583	.009347	.411585
5.704	5.304	.157671	.001235	.007832	.397078
3.803	5.539	.146277	.000953	.006513	.382461
1.902	5.793	.135234	.000726	.005372	.367741
0.000	6.069	.124548	.000547	.004392	.352913

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 6$ (valeur nominale)

$T_0 = 2000$ K

θ (deg.)	M	T/T_0	P/P_0	ρ/ρ_0	a/a_0
0.497	1.001	.868250	.542692	.625041	.931800
2.483	1.129	.837324	.464928	.555255	.915054
4.470	1.212	.816804	.418480	.512338	.903772
6.457	1.285	.798207	.379675	.475660	.893424
8.444	1.353	.780510	.345486	.442641	.883465
10.430	1.419	.763316	.314677	.412249	.873680
12.417	1.483	.746425	.286593	.383954	.863959
14.404	1.547	.729720	.260829	.357437	.854237
16.390	1.610	.713132	.237110	.332492	.844472
18.377	1.673	.696614	.215235	.308973	.834634
20.364	1.736	.680136	.195047	.286776	.824704
22.350	1.799	.663679	.176417	.265817	.814665
24.337	1.863	.647226	.159235	.246027	.804504
26.324	1.928	.630799	.143432	.227381	.794228
28.311	1.994	.614381	.128905	.209813	.783824
30.297	2.061	.597956	.115562	.193262	.773276
32.284	2.129	.581524	.103328	.177686	.762577
34.271	2.198	.565088	.092136	.163048	.751723
36.257	2.269	.548653	.081921	.149313	.740711
38.244	2.342	.532225	.072620	.136445	.729538
40.231	2.416	.515811	.064173	.124413	.718200
42.218	2.493	.499418	.056524	.113180	.706695
44.204	2.571	.483055	.049617	.102715	.695022
46.191	2.653	.466732	.043399	.092986	.683178
44.183	2.736	.450617	.037872	.084044	.671281
42.174	2.821	.434553	.032920	.075756	.659206
40.164	2.910	.418558	.028502	.068095	.646961
38.155	3.003	.402645	.024574	.061031	.634543
36.145	3.098	.386824	.021095	.054534	.621951
34.136	3.198	.371109	.018026	.048573	.609187
32.126	3.302	.355512	.015329	.043119	.596248
30.117	3.411	.340047	.012970	.038143	.583135
28.108	3.524	.324734	.010917	.033619	.569855
26.098	3.644	.309573	.009137	.029515	.556393
24.089	3.769	.294585	.007602	.025805	.542757
22.080	3.901	.279784	.006285	.022463	.528946
20.072	4.040	.265198	.005162	.019466	.514973
18.065	4.188	.250835	.004211	.016788	.500834
16.058	4.344	.236705	.003409	.014403	.486523
14.051	4.510	.222822	.002738	.012289	.472041
12.044	4.687	.209205	.002180	.010422	.457389
10.037	4.877	.195868	.001720	.008784	.442569
8.030	5.080	.182828	.001344	.007352	.427584
6.022	5.299	.170104	.001039	.006108	.412436
4.015	5.536	.157710	.000794	.005035	.397127
2.007	5.792	.145665	.000599	.004114	.381661
0.000	6.071	.133985	.000446	.003331	.366040

Caractéristiques le long de la paroi de la tuyère pour:

$M_s = 6$ (valeur nominale)

$T_0 = 3000$ K

θ (deg.)	M	T/T_0	P/P_0	ρ/ρ_0	a/a_0
0.516	1.001	.875199	.546361	.624270	.935520
2.582	1.132	.845195	.466671	.552145	.919345
4.648	1.216	.825260	.419063	.507794	.908438
6.714	1.291	.807166	.379292	.469905	.898424
8.780	1.361	.789928	.344273	.435828	.888779
10.846	1.429	.773162	.312752	.404510	.879296
12.912	1.494	.756676	.284061	.375407	.869871
14.978	1.559	.740358	.257788	.348194	.860441
17.044	1.623	.724144	.233657	.322666	.850966
19.110	1.688	.707976	.211441	.298656	.841413
21.176	1.752	.691837	.190998	.276073	.831767
23.242	1.816	.675703	.172186	.254825	.822012
25.308	1.882	.659568	.154897	.234847	.812138
27.374	1.947	.643415	.139021	.216067	.802131
29.440	2.014	.627254	.124478	.198450	.791994
31.506	2.082	.611070	.111171	.181928	.781710
33.572	2.150	.594850	.099009	.166444	.771265
35.638	2.221	.578615	.087934	.151974	.760668
37.704	2.292	.562363	.077869	.138468	.749908
39.770	2.365	.546096	.068745	.125884	.738983
41.836	2.440	.529821	.060496	.114183	.727888
43.902	2.517	.513543	.053061	.103323	.716619
45.968	2.596	.497271	.046378	.093266	.705175
48.034	2.677	.481012	.040391	.083972	.693551
45.946	2.760	.464960	.035103	.075496	.681880
43.853	2.846	.448892	.030377	.067671	.669994
41.769	2.935	.432929	.026198	.060513	.657974
39.675	3.027	.416938	.022482	.053922	.645707
37.587	3.122	.401047	.019216	.047914	.633283
35.498	3.221	.385224	.016348	.042437	.620664
33.410	3.324	.369494	.013842	.037462	.607861
31.321	3.432	.353856	.011660	.032952	.594858
29.232	3.544	.338323	.009769	.028875	.581655
27.143	3.662	.322915	.008139	.025204	.568256
25.054	3.786	.307646	.006740	.021909	.554658
22.967	3.917	.292539	.005547	.018962	.540869
20.880	4.054	.277600	.004535	.016336	.526878
18.792	4.200	.262841	.003681	.014004	.512680
16.705	4.355	.248281	.002965	.011941	.498278
14.616	4.519	.233931	.002368	.010125	.483664
12.528	4.695	.219826	.001876	.008534	.468856
10.440	4.882	.205967	.001472	.007146	.453836
8.352	5.084	.192379	.001143	.005942	.438611
6.264	5.301	.179083	.000878	.004904	.423182
4.176	5.536	.166096	.000667	.004014	.407549
2.088	5.792	.153442	.000500	.003257	.391716
0.000	6.070	.141136	.000369	.002617	.375681

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$Ms = 1.50234$

$To = 1000 \text{ K}$ (le gaz étant considéré comme parfait)

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.05	1.01	0.006	0.002	0.001	1.182	980.60
0.51	1.04	0.030	0.012	0.003	1.191	980.01
1.13	1.06	0.048	0.019	0.006	1.199	979.57
1.86	1.07	0.064	0.026	0.007	1.205	979.20
2.68	1.09	0.077	0.031	0.009	1.211	978.86
3.57	1.10	0.090	0.036	0.010	1.216	978.55
4.52	1.12	0.102	0.041	0.012	1.222	978.26
5.52	1.13	0.113	0.045	0.013	1.227	977.99
6.58	1.14	0.124	0.050	0.014	1.232	977.73
7.68	1.15	0.134	0.054	0.015	1.237	977.48
8.82	1.16	0.144	0.058	0.016	1.242	977.24
10.01	1.18	0.153	0.061	0.018	1.247	977.01
11.15	1.19	0.162	0.065	0.018	1.252	976.79
12.36	1.20	0.170	0.068	0.019	1.257	976.58
13.64	1.21	0.179	0.072	0.020	1.261	976.37
14.96	1.22	0.187	0.075	0.021	1.266	976.17
16.32	1.23	0.195	0.078	0.022	1.271	975.98
17.70	1.24	0.203	0.081	0.023	1.275	975.79
19.12	1.25	0.211	0.085	0.024	1.280	975.60
20.57	1.26	0.219	0.088	0.025	1.285	975.43
22.04	1.27	0.226	0.091	0.026	1.289	975.25
23.54	1.28	0.234	0.093	0.027	1.294	975.08
25.06	1.29	0.241	0.096	0.028	1.299	974.92
34.20	1.30	0.279	0.112	0.032	1.303	974.76
46.23	1.31	0.321	0.129	0.037	1.307	974.61
53.53	1.32	0.344	0.137	0.039	1.312	974.46
59.51	1.33	0.361	0.144	0.041	1.317	974.31
64.83	1.33	0.375	0.150	0.043	1.321	974.16
69.80	1.34	0.387	0.155	0.044	1.326	974.02
74.53	1.35	0.399	0.159	0.046	1.330	973.89
79.11	1.36	0.409	0.164	0.047	1.335	973.75
83.57	1.37	0.419	0.168	0.048	1.340	973.62
87.95	1.38	0.428	0.171	0.049	1.345	973.49
92.29	1.39	0.437	0.175	0.050	1.349	973.36
96.59	1.40	0.446	0.178	0.051	1.354	973.24
100.75	1.41	0.454	0.182	0.052	1.359	973.12
104.89	1.42	0.462	0.185	0.053	1.363	973.00
109.02	1.43	0.470	0.188	0.054	1.368	972.89
113.10	1.43	0.477	0.191	0.055	1.373	972.78
117.14	1.44	0.485	0.194	0.055	1.378	972.67
121.15	1.45	0.492	0.197	0.056	1.383	972.57
125.12	1.46	0.499	0.200	0.057	1.388	972.46
129.06	1.47	0.506	0.202	0.058	1.392	972.36
132.96	1.48	0.512	0.205	0.059	1.397	972.27
136.83	1.49	0.519	0.208	0.059	1.402	972.17
143.48	1.50	0.547	0.219	0.063	1.411	972.01

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$M_s = 1.50245$

$T_o = 1000 \text{ K}$

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	$b = T_p / T_e$	T_p (K)
0.05	1.01	0.006	0.002	0.001	1.181	1003.06
0.47	1.04	0.030	0.012	0.003	1.191	1003.27
1.09	1.06	0.048	0.019	0.006	1.198	1003.42
1.81	1.07	0.064	0.026	0.007	1.204	1003.56
2.63	1.09	0.078	0.031	0.009	1.210	1003.70
3.52	1.10	0.091	0.036	0.010	1.216	1003.82
4.46	1.12	0.103	0.041	0.012	1.221	1003.94
5.47	1.13	0.115	0.046	0.013	1.226	1004.06
6.52	1.14	0.126	0.050	0.014	1.231	1004.17
7.62	1.15	0.136	0.054	0.016	1.236	1004.29
8.77	1.16	0.146	0.058	0.017	1.241	1004.40
9.95	1.18	0.156	0.062	0.018	1.246	1004.51
10.97	1.19	0.163	0.065	0.019	1.251	1004.62
12.24	1.20	0.173	0.069	0.020	1.256	1004.73
13.52	1.21	0.181	0.073	0.021	1.260	1004.84
14.84	1.22	0.190	0.076	0.022	1.265	1004.95
16.20	1.23	0.198	0.079	0.023	1.270	1005.06
17.59	1.24	0.207	0.083	0.024	1.274	1005.16
19.01	1.25	0.215	0.086	0.025	1.279	1005.27
20.45	1.26	0.222	0.089	0.025	1.284	1005.38
21.93	1.27	0.230	0.092	0.026	1.288	1005.49
23.43	1.28	0.237	0.095	0.027	1.293	1005.60
24.57	1.29	0.243	0.097	0.028	1.296	1005.68
26.12	1.30	0.250	0.100	0.029	1.301	1005.79
44.00	1.30	0.320	0.128	0.037	1.305	1005.89
51.93	1.31	0.345	0.138	0.039	1.310	1006.00
58.15	1.32	0.363	0.145	0.042	1.314	1006.11
63.62	1.33	0.378	0.151	0.043	1.319	1006.22
68.67	1.34	0.391	0.157	0.045	1.323	1006.33
73.48	1.35	0.403	0.161	0.046	1.328	1006.43
78.12	1.36	0.414	0.166	0.047	1.333	1006.55
82.64	1.37	0.425	0.170	0.049	1.337	1006.66
87.07	1.38	0.434	0.174	0.050	1.342	1006.77
91.45	1.39	0.444	0.177	0.051	1.347	1006.88
95.79	1.40	0.452	0.181	0.052	1.351	1006.99
99.97	1.41	0.461	0.184	0.053	1.356	1007.11
104.13	1.41	0.469	0.188	0.054	1.361	1007.22
108.29	1.42	0.477	0.191	0.055	1.365	1007.33
112.42	1.43	0.485	0.194	0.055	1.370	1007.45
116.52	1.44	0.492	0.197	0.056	1.375	1007.56
120.58	1.45	0.500	0.200	0.057	1.380	1007.68
124.60	1.46	0.507	0.203	0.058	1.385	1007.80
128.59	1.47	0.514	0.206	0.059	1.389	1007.91
132.55	1.48	0.521	0.208	0.060	1.394	1008.03
136.48	1.48	0.528	0.211	0.060	1.399	1008.15
140.37	1.49	0.535	0.214	0.061	1.404	1008.26
141.35	1.50	0.537	0.215	0.061	1.405	1008.30
144.20	1.50	0.559	0.224	0.064	1.409	1008.38

caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$M_s = 1.50177$

$T_o = 2000 \text{ K}$

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.04	1.01	0.009	0.004	0.001	1.158	2003.70
0.45	1.04	0.044	0.017	0.005	1.166	2004.06
1.05	1.06	0.070	0.028	0.008	1.173	2004.34
1.76	1.07	0.093	0.037	0.011	1.178	2004.60
2.56	1.09	0.114	0.046	0.013	1.183	2004.85
3.43	1.10	0.133	0.053	0.015	1.188	2005.08
4.37	1.12	0.151	0.061	0.017	1.193	2005.31
5.36	1.13	0.168	0.067	0.019	1.198	2005.54
6.40	1.14	0.185	0.074	0.021	1.202	2005.76
7.49	1.15	0.200	0.080	0.023	1.207	2005.98
8.63	1.17	0.215	0.086	0.025	1.211	2006.21
9.80	1.18	0.229	0.092	0.026	1.215	2006.43
10.98	1.19	0.243	0.097	0.028	1.219	2006.65
12.22	1.20	0.256	0.102	0.029	1.223	2006.87
13.50	1.21	0.269	0.108	0.031	1.228	2007.10
14.82	1.22	0.282	0.113	0.032	1.232	2007.32
16.17	1.23	0.294	0.118	0.034	1.236	2007.54
17.54	1.24	0.306	0.123	0.035	1.240	2007.76
18.95	1.25	0.318	0.127	0.036	1.244	2007.99
20.39	1.26	0.330	0.132	0.038	1.248	2008.23
21.85	1.27	0.341	0.136	0.039	1.252	2008.45
23.34	1.28	0.352	0.141	0.040	1.256	2008.70
24.86	1.29	0.363	0.145	0.041	1.260	2008.92
34.20	1.30	0.422	0.169	0.048	1.264	2009.16
46.34	1.31	0.487	0.195	0.056	1.268	2009.39
53.68	1.32	0.521	0.208	0.060	1.272	2009.64
59.68	1.33	0.546	0.219	0.062	1.276	2009.88
65.03	1.34	0.568	0.227	0.065	1.280	2010.13
70.01	1.34	0.587	0.235	0.067	1.284	2010.38
74.76	1.35	0.604	0.241	0.069	1.288	2010.62
79.35	1.36	0.620	0.248	0.071	1.293	2010.86
83.85	1.37	0.635	0.254	0.073	1.297	2011.12
88.27	1.38	0.649	0.260	0.074	1.301	2011.38
92.64	1.39	0.663	0.265	0.076	1.305	2011.63
96.97	1.40	0.676	0.270	0.077	1.309	2011.89
101.24	1.41	0.688	0.275	0.079	1.313	2012.16
105.47	1.42	0.701	0.280	0.080	1.317	2012.41
109.65	1.43	0.712	0.285	0.081	1.321	2012.69
113.79	1.43	0.724	0.290	0.083	1.326	2012.97
117.89	1.44	0.735	0.294	0.084	1.330	2013.23
121.96	1.45	0.746	0.298	0.085	1.334	2013.51
125.98	1.46	0.756	0.303	0.086	1.338	2013.79
129.98	1.47	0.767	0.307	0.088	1.343	2014.06
133.95	1.48	0.777	0.311	0.089	1.347	2014.35
137.88	1.49	0.788	0.315	0.090	1.351	2014.64
141.77	1.50	0.799	0.320	0.091	1.356	2014.93
144.63	1.50	0.832	0.333	0.095	1.359	2015.15

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$M_s = 1.50148$

$T_c = 3000 \text{ K}$

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.05	1.01	0.011	0.005	0.001	1.147	3000.58
0.49	1.04	0.057	0.023	0.007	1.154	3000.74
1.15	1.06	0.092	0.037	0.011	1.160	3000.87
1.92	1.07	0.123	0.049	0.014	1.165	3001.00
2.79	1.09	0.150	0.060	0.017	1.170	3001.12
3.74	1.10	0.175	0.070	0.020	1.175	3001.24
4.75	1.12	0.198	0.079	0.023	1.179	3001.36
5.83	1.13	0.220	0.088	0.025	1.183	3001.48
6.95	1.14	0.241	0.096	0.028	1.187	3001.62
8.12	1.15	0.261	0.104	0.030	1.191	3001.74
9.34	1.17	0.280	0.112	0.032	1.195	3001.87
10.60	1.18	0.299	0.119	0.034	1.199	3002.00
11.65	1.19	0.313	0.125	0.036	1.203	3002.13
12.74	1.20	0.327	0.131	0.037	1.207	3002.27
13.94	1.21	0.342	0.137	0.039	1.210	3002.42
15.27	1.22	0.358	0.143	0.041	1.214	3002.55
16.59	1.23	0.373	0.149	0.043	1.218	3002.70
18.02	1.24	0.389	0.156	0.044	1.221	3002.84
19.47	1.25	0.404	0.162	0.046	1.225	3002.99
20.95	1.26	0.419	0.167	0.048	1.229	3003.16
22.47	1.27	0.433	0.173	0.050	1.232	3003.31
24.02	1.28	0.447	0.179	0.051	1.236	3003.47
25.61	1.29	0.461	0.185	0.053	1.240	3003.64
34.38	1.30	0.531	0.212	0.061	1.243	3003.81
46.43	1.31	0.611	0.245	0.070	1.247	3003.99
53.83	1.32	0.654	0.262	0.075	1.251	3004.15
59.92	1.33	0.687	0.275	0.078	1.254	3004.34
65.38	1.34	0.714	0.286	0.082	1.258	3004.52
70.48	1.35	0.738	0.295	0.084	1.262	3004.71
75.34	1.35	0.760	0.304	0.087	1.265	3004.91
80.05	1.36	0.780	0.312	0.089	1.269	3005.10
84.65	1.37	0.800	0.320	0.091	1.273	3005.31
89.19	1.38	0.818	0.327	0.093	1.276	3005.52
93.67	1.39	0.835	0.334	0.095	1.280	3005.72
98.13	1.40	0.852	0.341	0.097	1.284	3005.94
102.22	1.41	0.867	0.347	0.099	1.288	3006.16
106.26	1.42	0.882	0.353	0.101	1.291	3006.38
110.33	1.43	0.896	0.358	0.102	1.295	3006.60
114.49	1.43	0.910	0.364	0.104	1.299	3006.84
118.54	1.44	0.924	0.370	0.106	1.303	3007.06
122.66	1.45	0.938	0.375	0.107	1.306	3007.31
126.73	1.46	0.951	0.381	0.109	1.310	3007.55
130.77	1.47	0.965	0.386	0.110	1.314	3007.80
134.79	1.48	0.978	0.391	0.112	1.318	3008.05
138.79	1.49	0.991	0.397	0.113	1.322	3008.30
142.76	1.50	1.006	0.402	0.115	1.326	3008.58
145.68	1.50	1.047	0.419	0.120	1.329	3008.77

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$M_s = 2.00504$

$T_o = 1000 \text{ K}$ (le gaz étant considéré comme parfait)

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.03	1.02	0.008	0.003	0.001	1.185	980.39
0.30	1.07	0.045	0.018	0.005	1.202	979.37
0.68	1.10	0.073	0.029	0.008	1.215	978.63
1.15	1.13	0.096	0.038	0.011	1.227	978.00
1.66	1.15	0.117	0.047	0.013	1.238	977.45
2.23	1.18	0.137	0.055	0.016	1.249	976.93
2.84	1.20	0.155	0.062	0.018	1.259	976.46
3.48	1.23	0.172	0.069	0.020	1.270	976.02
4.17	1.25	0.188	0.075	0.022	1.280	975.61
4.88	1.27	0.204	0.081	0.023	1.290	975.22
5.62	1.29	0.219	0.087	0.025	1.300	974.85
6.39	1.31	0.233	0.093	0.027	1.311	974.50
7.18	1.33	0.246	0.099	0.028	1.321	974.17
8.00	1.35	0.260	0.104	0.030	1.331	973.86
8.84	1.38	0.273	0.109	0.031	1.342	973.56
9.72	1.40	0.285	0.114	0.033	1.352	973.28
10.62	1.42	0.298	0.119	0.034	1.363	973.01
11.54	1.44	0.310	0.124	0.035	1.374	972.76
12.48	1.46	0.321	0.129	0.037	1.385	972.52
13.45	1.47	0.333	0.133	0.038	1.396	972.30
14.43	1.49	0.344	0.137	0.039	1.407	972.09
15.44	1.51	0.354	0.142	0.040	1.418	971.89
16.47	1.53	0.365	0.146	0.042	1.429	971.70
22.94	1.55	0.420	0.168	0.048	1.441	971.53
31.97	1.57	0.481	0.193	0.055	1.452	971.38
37.87	1.59	0.514	0.206	0.059	1.464	971.23
42.94	1.61	0.539	0.215	0.062	1.476	971.09
47.64	1.63	0.559	0.224	0.064	1.488	970.97
52.17	1.65	0.577	0.231	0.066	1.500	970.86
56.62	1.67	0.594	0.237	0.068	1.512	970.76
61.06	1.69	0.609	0.244	0.070	1.525	970.67
65.50	1.71	0.623	0.249	0.071	1.538	970.59
70.00	1.73	0.637	0.255	0.073	1.551	970.53
74.55	1.75	0.650	0.260	0.074	1.564	970.47
79.18	1.77	0.663	0.265	0.076	1.577	970.42
83.85	1.79	0.675	0.270	0.077	1.591	970.39
88.59	1.81	0.687	0.275	0.079	1.604	970.37
93.37	1.83	0.699	0.279	0.080	1.618	970.35
98.21	1.85	0.710	0.284	0.081	1.633	970.35
103.10	1.87	0.721	0.288	0.082	1.647	970.36
108.05	1.89	0.732	0.293	0.084	1.662	970.39
113.07	1.91	0.743	0.297	0.085	1.677	970.42
118.15	1.93	0.754	0.301	0.086	1.692	970.46
123.31	1.95	0.765	0.306	0.087	1.708	970.51
128.53	1.97	0.776	0.310	0.089	1.723	970.57
133.82	1.99	0.788	0.315	0.090	1.739	970.64
137.81	2.01	0.856	0.342	0.098	1.752	970.71

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la
paroi de la tuyere pour :

$M_s = 2.00513$

$T_o = 1000 \text{ K}$

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.02	1.02	0.008	0.003	0.001	1.185	1003.14
0.29	1.07	0.046	0.018	0.005	1.201	1003.50
0.67	1.10	0.074	0.030	0.008	1.214	1003.79
1.13	1.13	0.099	0.039	0.011	1.226	1004.05
1.64	1.16	0.121	0.048	0.014	1.237	1004.31
2.21	1.18	0.141	0.056	0.016	1.248	1004.55
2.82	1.20	0.160	0.064	0.018	1.259	1004.80
3.46	1.23	0.177	0.071	0.020	1.269	1005.04
4.14	1.25	0.194	0.078	0.022	1.279	1005.28
4.86	1.27	0.210	0.084	0.024	1.290	1005.52
5.60	1.29	0.226	0.090	0.026	1.300	1005.77
6.37	1.32	0.241	0.096	0.027	1.310	1006.01
7.15	1.34	0.255	0.102	0.029	1.321	1006.25
7.97	1.36	0.268	0.107	0.031	1.331	1006.50
8.82	1.38	0.282	0.113	0.032	1.341	1006.75
9.69	1.40	0.295	0.118	0.034	1.352	1007.01
10.59	1.42	0.308	0.123	0.035	1.362	1007.26
11.51	1.44	0.320	0.128	0.037	1.373	1007.52
12.45	1.46	0.332	0.133	0.038	1.384	1007.78
13.42	1.48	0.344	0.138	0.039	1.395	1008.04
14.41	1.50	0.356	0.142	0.041	1.406	1008.31
15.42	1.52	0.367	0.147	0.042	1.417	1008.58
16.45	1.54	0.378	0.151	0.043	1.428	1008.85
22.98	1.56	0.436	0.174	0.050	1.439	1009.12
32.05	1.57	0.499	0.200	0.057	1.451	1009.40
37.98	1.59	0.532	0.213	0.061	1.463	1009.68
43.10	1.61	0.558	0.223	0.064	1.474	1009.96
47.87	1.63	0.579	0.232	0.066	1.486	1010.25
52.47	1.65	0.598	0.239	0.068	1.498	1010.54
57.00	1.67	0.615	0.246	0.070	1.511	1010.83
61.51	1.69	0.631	0.252	0.072	1.523	1011.13
66.04	1.71	0.646	0.258	0.074	1.536	1011.43
70.63	1.73	0.660	0.264	0.075	1.549	1011.73
75.28	1.75	0.674	0.269	0.077	1.562	1012.04
80.02	1.77	0.687	0.275	0.078	1.575	1012.35
84.80	1.79	0.699	0.280	0.080	1.588	1012.66
89.65	1.81	0.712	0.285	0.081	1.602	1012.98
94.56	1.83	0.724	0.290	0.083	1.616	1013.30
99.53	1.85	0.736	0.294	0.084	1.630	1013.62
104.57	1.87	0.747	0.299	0.085	1.644	1013.95
109.68	1.89	0.759	0.303	0.087	1.659	1014.28
114.86	1.91	0.770	0.308	0.088	1.674	1014.61
120.12	1.93	0.781	0.312	0.089	1.689	1014.95
125.45	1.95	0.793	0.317	0.091	1.704	1015.30
130.86	1.97	0.805	0.322	0.092	1.720	1015.64
136.35	1.99	0.818	0.327	0.093	1.736	1015.99
140.50	2.01	0.892	0.357	0.102	1.748	1016.26

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$M_s = 2.0042$

$T_o = 2000 \text{ K}$

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.02	1.02	0.012	0.005	0.001	1.161	2003.83
0.29	1.07	0.069	0.028	0.008	1.176	2004.50
0.67	1.10	0.112	0.045	0.013	1.187	2005.04
1.13	1.13	0.149	0.060	0.017	1.198	2005.55
1.65	1.16	0.182	0.073	0.021	1.208	2006.05
2.21	1.18	0.213	0.085	0.024	1.217	2006.55
2.82	1.21	0.241	0.096	0.028	1.227	2007.05
3.47	1.23	0.268	0.107	0.031	1.236	2007.55
4.15	1.25	0.294	0.117	0.034	1.245	2008.06
4.87	1.27	0.318	0.127	0.036	1.254	2008.59
5.63	1.30	0.342	0.137	0.039	1.264	2009.12
6.42	1.32	0.365	0.146	0.042	1.273	2009.67
7.22	1.34	0.387	0.155	0.044	1.282	2010.22
8.07	1.36	0.409	0.163	0.047	1.291	2010.79
8.95	1.38	0.430	0.172	0.049	1.301	2011.37
9.86	1.40	0.450	0.180	0.051	1.310	2011.97
10.75	1.42	0.469	0.188	0.054	1.319	2012.57
11.64	1.44	0.487	0.195	0.056	1.329	2013.18
12.59	1.46	0.506	0.202	0.058	1.339	2013.81
13.55	1.48	0.523	0.209	0.060	1.348	2014.45
14.53	1.50	0.541	0.216	0.062	1.358	2015.10
15.54	1.52	0.558	0.223	0.064	1.368	2015.78
16.58	1.54	0.574	0.230	0.066	1.378	2016.46
23.10	1.56	0.662	0.265	0.076	1.388	2017.15
32.22	1.58	0.758	0.303	0.087	1.398	2017.86
38.21	1.60	0.809	0.324	0.092	1.409	2018.59
43.38	1.62	0.847	0.339	0.097	1.419	2019.34
48.21	1.64	0.880	0.352	0.101	1.430	2020.10
52.87	1.66	0.908	0.363	0.104	1.441	2020.87
57.48	1.67	0.934	0.374	0.107	1.452	2021.65
62.07	1.69	0.958	0.383	0.109	1.463	2022.46
66.70	1.71	0.981	0.392	0.112	1.475	2023.28
71.39	1.73	1.002	0.401	0.115	1.486	2024.12
76.17	1.75	1.023	0.409	0.117	1.498	2024.98
81.06	1.77	1.043	0.417	0.119	1.510	2025.85
85.99	1.79	1.063	0.425	0.121	1.522	2026.74
91.03	1.81	1.082	0.433	0.124	1.534	2027.65
96.11	1.83	1.100	0.440	0.126	1.547	2028.56
101.25	1.85	1.118	0.447	0.128	1.559	2029.51
106.41	1.87	1.136	0.454	0.130	1.572	2030.46
111.60	1.89	1.153	0.461	0.132	1.585	2031.43
116.94	1.91	1.170	0.468	0.134	1.599	2032.42
122.34	1.93	1.188	0.475	0.136	1.612	2033.43
127.82	1.95	1.205	0.482	0.138	1.626	2034.45
133.40	1.97	1.223	0.489	0.140	1.640	2035.48
139.07	1.99	1.243	0.497	0.142	1.654	2036.54
143.37	2.00	1.362	0.545	0.156	1.665	2037.36

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

Ms= 2.00405

To= 3000 K

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.02	1.02	0.015	0.006	0.002	1.149	3000.64
0.29	1.07	0.088	0.035	0.010	1.163	3000.95
0.69	1.10	0.143	0.057	0.016	1.174	3001.21
1.16	1.13	0.190	0.076	0.022	1.183	3001.49
1.69	1.16	0.232	0.093	0.027	1.192	3001.78
2.28	1.18	0.271	0.109	0.031	1.201	3002.08
2.91	1.21	0.308	0.123	0.035	1.210	3002.39
3.58	1.23	0.342	0.137	0.039	1.218	3002.71
4.28	1.26	0.375	0.150	0.043	1.227	3003.07
5.02	1.28	0.406	0.162	0.046	1.235	3003.43
5.78	1.30	0.436	0.174	0.050	1.244	3003.81
6.58	1.32	0.465	0.186	0.053	1.252	3004.22
7.38	1.34	0.492	0.197	0.056	1.260	3004.64
8.17	1.36	0.517	0.207	0.059	1.269	3005.09
9.00	1.38	0.542	0.217	0.062	1.277	3005.55
9.86	1.40	0.567	0.227	0.065	1.286	3006.04
10.76	1.42	0.591	0.236	0.068	1.294	3006.55
11.69	1.44	0.615	0.246	0.070	1.303	3007.07
12.65	1.46	0.638	0.255	0.073	1.312	3007.64
13.63	1.48	0.661	0.264	0.076	1.320	3008.22
14.63	1.50	0.683	0.273	0.078	1.329	3008.82
15.66	1.52	0.705	0.282	0.081	1.338	3009.45
16.71	1.54	0.726	0.290	0.083	1.347	3010.10
23.14	1.56	0.835	0.334	0.095	1.357	3010.77
32.32	1.58	0.956	0.382	0.109	1.366	3011.48
38.37	1.60	1.020	0.408	0.117	1.375	3012.22
43.61	1.62	1.069	0.428	0.122	1.385	3012.99
48.50	1.64	1.110	0.444	0.127	1.395	3013.76
53.24	1.66	1.146	0.458	0.131	1.405	3014.59
57.92	1.68	1.179	0.471	0.135	1.415	3015.44
62.59	1.70	1.209	0.484	0.138	1.425	3016.32
67.29	1.72	1.238	0.495	0.141	1.435	3017.22
72.05	1.73	1.265	0.506	0.145	1.445	3018.16
76.89	1.75	1.291	0.517	0.148	1.456	3019.15
81.83	1.77	1.317	0.527	0.150	1.467	3020.15
86.81	1.79	1.341	0.536	0.153	1.478	3021.18
91.78	1.81	1.364	0.546	0.156	1.489	3022.24
96.84	1.83	1.387	0.555	0.159	1.500	3023.35
101.98	1.85	1.409	0.564	0.161	1.511	3024.48
107.21	1.87	1.432	0.573	0.164	1.523	3025.65
112.53	1.89	1.453	0.581	0.166	1.535	3026.85
117.94	1.91	1.475	0.590	0.169	1.547	3028.10
123.44	1.93	1.497	0.599	0.171	1.559	3029.37
129.04	1.95	1.519	0.608	0.174	1.571	3030.69
134.73	1.97	1.542	0.617	0.176	1.584	3032.04
140.51	1.99	1.567	0.627	0.179	1.597	3033.42
144.88	2.00	1.718	0.687	0.196	1.606	3034.51

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la
paroi de la tuyere pour :

$M_s = 3.00826$

$T_o = 1000 \text{ K}$ (le gaz étant considéré comme parfait)

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.03	1.03	0.019	0.008	0.002	1.190	980.11
0.34	1.10	0.158	0.063	0.018	1.216	978.57
0.81	1.15	0.255	0.102	0.029	1.238	977.46
1.37	1.20	0.337	0.135	0.039	1.258	976.52
2.00	1.24	0.412	0.165	0.047	1.277	975.71
2.69	1.28	0.480	0.192	0.055	1.297	974.98
3.44	1.32	0.544	0.218	0.062	1.316	974.33
4.25	1.36	0.605	0.242	0.069	1.336	973.74
5.09	1.40	0.662	0.265	0.076	1.355	973.20
5.99	1.44	0.717	0.287	0.082	1.375	972.72
6.92	1.48	0.769	0.308	0.088	1.396	972.29
7.90	1.51	0.820	0.328	0.094	1.417	971.91
8.91	1.55	0.869	0.348	0.099	1.438	971.57
9.97	1.59	0.916	0.366	0.105	1.461	971.27
11.06	1.62	0.962	0.385	0.110	1.483	971.02
12.19	1.66	1.006	0.402	0.115	1.506	970.80
13.36	1.70	1.049	0.420	0.120	1.530	970.63
14.57	1.73	1.091	0.436	0.125	1.555	970.51
15.81	1.77	1.131	0.452	0.129	1.580	970.42
17.09	1.81	1.170	0.468	0.134	1.606	970.37
18.41	1.85	1.208	0.483	0.138	1.633	970.35
19.76	1.89	1.245	0.498	0.142	1.661	970.38
21.15	1.92	1.281	0.512	0.146	1.690	970.45
30.32	1.96	1.457	0.583	0.166	1.719	970.55
44.64	2.00	1.646	0.658	0.188	1.749	970.69
55.19	2.04	1.744	0.698	0.199	1.781	970.88
65.10	2.08	1.817	0.727	0.208	1.813	971.09
75.03	2.12	1.877	0.751	0.215	1.846	971.34
85.29	2.16	1.930	0.772	0.221	1.881	971.63
96.04	2.20	1.977	0.791	0.226	1.917	971.95
107.41	2.25	2.020	0.808	0.231	1.954	972.31
119.52	2.29	2.060	0.824	0.235	1.992	972.71
132.47	2.33	2.099	0.839	0.240	2.032	973.14
146.36	2.38	2.135	0.854	0.244	2.073	973.60
161.29	2.42	2.170	0.868	0.248	2.116	974.10
177.31	2.47	2.205	0.882	0.252	2.160	974.63
194.40	2.51	2.238	0.895	0.256	2.206	975.20
212.64	2.56	2.271	0.908	0.259	2.254	975.79
232.14	2.61	2.303	0.921	0.263	2.303	976.42
253.00	2.65	2.335	0.934	0.267	2.355	977.08
275.32	2.70	2.368	0.947	0.271	2.408	977.77
299.24	2.75	2.401	0.960	0.274	2.464	978.50
324.89	2.81	2.435	0.974	0.278	2.522	979.25
352.42	2.86	2.471	0.988	0.282	2.582	980.03
381.97	2.91	2.510	1.004	0.287	2.645	980.83
405.57	2.95	2.542	1.017	0.291	2.694	981.46
413.72	2.97	2.555	1.022	0.292	2.710	981.67
439.05	3.01	3.011	1.204	0.344	2.761	982.31

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$M_s = 3.01414$

$T_o = 1000 \text{ K}$

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b= T_p/T_e	T_p (K)
0.02	1.03	0.020	0.008	0.002	1.189	1003.23
0.34	1.10	0.169	0.067	0.019	1.216	1003.82
0.80	1.15	0.274	0.109	0.031	1.237	1004.31
1.35	1.20	0.363	0.145	0.041	1.258	1004.77
1.98	1.25	0.444	0.178	0.051	1.277	1005.23
2.68	1.29	0.518	0.207	0.059	1.296	1005.68
3.43	1.33	0.588	0.235	0.067	1.316	1006.14
4.23	1.37	0.653	0.261	0.075	1.335	1006.61
5.08	1.40	0.716	0.286	0.082	1.355	1007.08
5.98	1.44	0.775	0.310	0.089	1.375	1007.57
6.91	1.48	0.833	0.333	0.095	1.396	1008.07
7.89	1.52	0.888	0.355	0.101	1.417	1008.57
8.90	1.55	0.941	0.376	0.108	1.438	1009.09
9.96	1.59	0.992	0.397	0.113	1.460	1009.62
11.05	1.63	1.042	0.417	0.119	1.483	1010.16
12.18	1.66	1.091	0.436	0.125	1.506	1010.71
13.35	1.70	1.138	0.455	0.130	1.530	1011.28
14.56	1.74	1.183	0.473	0.135	1.554	1011.86
15.80	1.78	1.227	0.491	0.140	1.579	1012.45
17.08	1.81	1.270	0.508	0.145	1.605	1013.05
18.39	1.85	1.312	0.525	0.150	1.632	1013.67
19.74	1.89	1.352	0.541	0.155	1.660	1014.30
21.13	1.93	1.391	0.556	0.159	1.688	1014.94
30.36	1.97	1.583	0.633	0.181	1.718	1015.60
44.78	2.01	1.788	0.715	0.204	1.748	1016.26
55.52	2.04	1.895	0.758	0.217	1.779	1016.93
65.66	2.08	1.974	0.790	0.226	1.811	1017.62
75.87	2.12	2.039	0.816	0.233	1.844	1018.31
86.47	2.17	2.096	0.838	0.240	1.879	1019.02
97.62	2.21	2.147	0.859	0.245	1.914	1019.74
109.46	2.25	2.193	0.877	0.251	1.951	1020.48
122.12	2.29	2.237	0.895	0.256	1.989	1021.22
135.71	2.33	2.278	0.911	0.260	2.029	1021.98
150.34	2.38	2.317	0.927	0.265	2.070	1022.75
166.12	2.42	2.355	0.942	0.269	2.113	1023.53
183.10	2.47	2.392	0.957	0.273	2.157	1024.32
201.29	2.51	2.428	0.971	0.278	2.203	1025.12
220.79	2.56	2.464	0.986	0.282	2.251	1025.92
241.70	2.61	2.499	1.000	0.286	2.300	1026.75
264.14	2.66	2.534	1.014	0.290	2.352	1027.57
288.26	2.71	2.569	1.028	0.294	2.406	1028.41
314.20	2.76	2.606	1.042	0.298	2.461	1029.25
342.12	2.81	2.643	1.057	0.302	2.520	1030.11
372.20	2.86	2.682	1.073	0.307	2.580	1030.97
404.61	2.92	2.725	1.090	0.311	2.644	1031.84
439.58	2.97	2.775	1.110	0.317	2.710	1032.72
467.56	3.01	3.298	1.319	0.377	2.761	1033.38

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$M_s = 3.01297$

$T_o = 2000 \text{ K}$

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.02	1.03	0.031	0.012	0.004	1.165	2004.01
0.34	1.10	0.274	0.110	0.031	1.189	2005.11
0.82	1.16	0.445	0.178	0.051	1.208	2006.07
1.40	1.21	0.592	0.237	0.068	1.226	2007.03
2.05	1.25	0.723	0.289	0.083	1.244	2008.01
2.77	1.29	0.845	0.338	0.097	1.262	2009.01
3.54	1.33	0.958	0.383	0.110	1.279	2010.06
4.37	1.37	1.066	0.426	0.122	1.297	2011.14
5.25	1.41	1.168	0.467	0.133	1.315	2012.28
6.17	1.45	1.266	0.506	0.145	1.333	2013.45
7.13	1.49	1.360	0.544	0.155	1.352	2014.68
8.14	1.53	1.450	0.580	0.166	1.371	2015.97
9.11	1.56	1.531	0.613	0.175	1.390	2017.31
10.17	1.60	1.614	0.646	0.184	1.410	2018.70
11.25	1.64	1.693	0.677	0.194	1.431	2020.14
12.38	1.67	1.771	0.708	0.202	1.452	2021.65
13.55	1.71	1.847	0.739	0.211	1.474	2023.21
14.77	1.75	1.921	0.768	0.220	1.496	2024.84
16.02	1.79	1.993	0.797	0.228	1.519	2026.52
17.32	1.82	2.063	0.825	0.236	1.543	2028.28
18.66	1.86	2.131	0.852	0.244	1.567	2030.10
20.03	1.90	2.197	0.879	0.251	1.593	2031.97
21.44	1.94	2.261	0.905	0.258	1.619	2033.91
30.58	1.98	2.567	1.027	0.293	1.646	2035.92
45.25	2.02	2.899	1.160	0.331	1.673	2037.98
56.30	2.06	3.071	1.228	0.351	1.702	2040.11
66.83	2.09	3.198	1.279	0.366	1.732	2042.31
77.51	2.14	3.303	1.321	0.377	1.763	2044.58
88.64	2.18	3.394	1.358	0.388	1.794	2046.90
100.42	2.22	3.475	1.390	0.397	1.827	2049.32
112.99	2.26	3.550	1.420	0.406	1.862	2051.77
126.48	2.30	3.619	1.448	0.414	1.897	2054.31
141.02	2.34	3.685	1.474	0.421	1.934	2056.91
156.74	2.39	3.748	1.499	0.428	1.972	2059.56
173.76	2.43	3.809	1.523	0.435	2.012	2062.31
191.99	2.48	3.867	1.547	0.442	2.053	2065.09
211.69	2.52	3.924	1.570	0.449	2.096	2067.97
232.85	2.57	3.981	1.592	0.455	2.140	2070.89
255.60	2.62	4.037	1.615	0.461	2.187	2073.88
280.13	2.66	4.092	1.637	0.468	2.235	2076.93
306.58	2.71	4.149	1.660	0.474	2.285	2080.05
335.11	2.76	4.207	1.683	0.481	2.337	2083.22
365.93	2.81	4.267	1.707	0.488	2.391	2086.46
399.30	2.86	4.331	1.732	0.495	2.448	2089.76
435.40	2.92	4.400	1.760	0.503	2.508	2093.11
474.47	2.97	4.480	1.792	0.512	2.570	2096.53
505.84	3.01	5.368	2.147	0.614	2.618	2099.14

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la
paroi de la tuyere pour :

$M_s = 3.01255$

$T_o = 3000 \text{ K}$

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.02	1.04	0.040	0.016	0.005	1.153	3000.71
0.34	1.11	0.357	0.143	0.041	1.175	3001.25
0.81	1.16	0.579	0.232	0.066	1.193	3001.81
1.38	1.21	0.771	0.308	0.088	1.210	3002.40
2.02	1.25	0.943	0.377	0.108	1.226	3003.05
2.74	1.30	1.102	0.441	0.126	1.243	3003.77
3.50	1.34	1.251	0.500	0.143	1.259	3004.57
4.33	1.38	1.392	0.557	0.159	1.275	3005.44
5.20	1.42	1.526	0.610	0.174	1.292	3006.39
6.11	1.46	1.655	0.662	0.189	1.308	3007.44
7.07	1.49	1.778	0.711	0.203	1.326	3008.56
8.07	1.53	1.897	0.759	0.217	1.343	3009.79
9.11	1.57	2.012	0.805	0.230	1.361	3011.12
10.16	1.61	2.120	0.848	0.242	1.380	3012.55
11.26	1.65	2.226	0.891	0.254	1.398	3014.08
12.41	1.68	2.330	0.932	0.266	1.418	3015.72
13.59	1.72	2.430	0.972	0.278	1.438	3017.49
14.81	1.76	2.528	1.011	0.289	1.458	3019.38
16.08	1.80	2.624	1.049	0.300	1.480	3021.38
17.38	1.83	2.716	1.086	0.310	1.501	3023.50
18.71	1.87	2.806	1.122	0.321	1.524	3025.78
20.09	1.91	2.893	1.157	0.331	1.547	3028.17
21.50	1.95	2.977	1.191	0.340	1.571	3030.72
30.82	1.99	3.384	1.354	0.387	1.596	3033.39
45.72	2.03	3.818	1.527	0.436	1.622	3036.20
57.00	2.07	4.043	1.617	0.462	1.648	3039.14
67.78	2.11	4.208	1.683	0.481	1.676	3042.24
78.75	2.15	4.344	1.738	0.496	1.704	3045.48
90.23	2.19	4.462	1.785	0.510	1.733	3048.91
102.41	2.23	4.568	1.827	0.522	1.763	3052.48
115.44	2.27	4.664	1.866	0.533	1.795	3056.19
129.47	2.31	4.754	1.902	0.543	1.828	3060.09
144.61	2.35	4.839	1.935	0.553	1.862	3064.14
161.02	2.40	4.920	1.968	0.562	1.897	3068.38
178.83	2.44	4.998	1.999	0.571	1.933	3072.79
198.13	2.48	5.074	2.029	0.580	1.971	3077.35
218.86	2.53	5.147	2.059	0.588	2.011	3082.11
241.22	2.58	5.219	2.088	0.597	2.052	3087.01
265.36	2.62	5.291	2.116	0.605	2.095	3092.13
291.41	2.67	5.363	2.145	0.613	2.139	3097.38
319.58	2.72	5.436	2.174	0.621	2.186	3102.84
350.04	2.77	5.511	2.204	0.630	2.234	3108.44
383.00	2.82	5.588	2.235	0.639	2.285	3114.25
418.69	2.87	5.669	2.268	0.648	2.337	3120.20
457.35	2.92	5.758	2.303	0.658	2.392	3126.35
499.26	2.97	5.862	2.345	0.670	2.449	3132.66
532.94	3.01	7.036	2.815	0.804	2.494	3137.50

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$M_s = 4.01672$

$T_o = 1000 \text{ K}$ (le gaz étant considéré comme parfait)

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp(K)
0.01	1.04	0.050	0.020	0.006	1.192	979.95
0.15	1.12	0.310	0.124	0.035	1.225	978.09
0.35	1.19	0.500	0.200	0.057	1.252	976.77
0.59	1.24	0.663	0.265	0.076	1.278	975.67
0.87	1.30	0.810	0.324	0.093	1.304	974.74
1.17	1.35	0.945	0.378	0.108	1.329	973.92
1.51	1.40	1.072	0.429	0.122	1.356	973.20
1.86	1.45	1.191	0.476	0.136	1.382	972.58
2.24	1.50	1.305	0.522	0.149	1.410	972.03
2.64	1.55	1.414	0.566	0.162	1.438	971.57
3.06	1.60	1.519	0.608	0.174	1.467	971.19
3.49	1.65	1.620	0.648	0.185	1.498	970.88
3.95	1.70	1.717	0.687	0.196	1.529	970.64
4.43	1.74	1.811	0.724	0.207	1.562	970.48
4.93	1.79	1.902	0.761	0.217	1.596	970.38
5.45	1.84	1.990	0.796	0.227	1.631	970.35
5.98	1.90	2.076	0.830	0.237	1.668	970.40
6.54	1.95	2.158	0.863	0.247	1.706	970.51
7.11	2.00	2.239	0.895	0.256	1.746	970.68
7.71	2.05	2.316	0.926	0.265	1.788	970.92
8.32	2.10	2.391	0.956	0.273	1.832	971.23
8.96	2.16	2.463	0.985	0.282	1.878	971.60
9.61	2.21	2.533	1.013	0.290	1.926	972.04
14.09	2.27	2.856	1.142	0.326	1.976	972.54
21.69	2.33	3.192	1.277	0.365	2.028	973.09
27.85	2.39	3.361	1.344	0.384	2.082	973.71
34.07	2.44	3.484	1.394	0.398	2.140	974.38
40.71	2.51	3.583	1.433	0.410	2.200	975.12
47.97	2.57	3.668	1.467	0.419	2.263	975.91
56.01	2.63	3.743	1.497	0.428	2.329	976.75
65.00	2.70	3.810	1.524	0.435	2.399	977.65
75.08	2.76	3.872	1.549	0.443	2.473	978.61
86.45	2.83	3.931	1.572	0.449	2.550	979.61
99.28	2.90	3.986	1.594	0.455	2.632	980.67
113.82	2.97	4.038	1.615	0.462	2.718	981.77
130.27	3.05	4.089	1.636	0.467	2.809	982.92
148.79	3.12	4.139	1.655	0.473	2.906	984.11
169.66	3.20	4.187	1.675	0.479	3.008	985.35
193.23	3.28	4.235	1.694	0.484	3.116	986.63
219.88	3.37	4.284	1.713	0.490	3.230	987.94
250.06	3.45	4.333	1.733	0.495	3.352	989.30
284.31	3.54	4.384	1.754	0.501	3.481	990.69
323.25	3.64	4.439	1.775	0.507	3.618	992.11
367.61	3.73	4.497	1.799	0.514	3.764	993.56
418.26	3.83	4.562	1.825	0.521	3.920	995.04
476.21	3.94	4.642	1.857	0.531	4.086	996.54
460.97	3.91	4.620	1.848	0.528	4.044	996.17
525.16	4.02	5.738	2.295	0.656	4.219	997.69

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$M_s = 4.02815$

$T_o = 1000 \text{ K}$

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.01	1.04	0.054	0.022	0.006	1.192	1003.29
0.14	1.12	0.342	0.137	0.039	1.225	1004.02
0.34	1.19	0.553	0.221	0.063	1.252	1004.64
0.59	1.25	0.735	0.294	0.084	1.278	1005.24
0.86	1.30	0.898	0.359	0.103	1.303	1005.84
1.17	1.35	1.050	0.420	0.120	1.329	1006.45
1.50	1.40	1.191	0.477	0.136	1.355	1007.07
1.85	1.45	1.325	0.530	0.151	1.381	1007.71
2.23	1.50	1.453	0.581	0.166	1.408	1008.37
2.63	1.55	1.575	0.630	0.180	1.437	1009.05
3.05	1.60	1.693	0.677	0.193	1.466	1009.75
3.48	1.65	1.806	0.723	0.206	1.495	1010.46
3.94	1.70	1.916	0.766	0.219	1.527	1011.20
4.42	1.75	2.022	0.809	0.231	1.559	1011.97
4.91	1.79	2.124	0.850	0.243	1.592	1012.75
5.43	1.84	2.224	0.890	0.254	1.627	1013.56
5.97	1.89	2.320	0.928	0.265	1.664	1014.39
6.52	1.95	2.414	0.965	0.276	1.702	1015.24
7.09	2.00	2.504	1.002	0.286	1.741	1016.12
7.68	2.05	2.592	1.037	0.296	1.782	1017.01
8.30	2.10	2.677	1.071	0.306	1.826	1017.93
8.93	2.16	2.759	1.103	0.315	1.871	1018.86
9.58	2.21	2.838	1.135	0.324	1.918	1019.83
14.05	2.27	3.202	1.281	0.366	1.967	1020.80
21.68	2.32	3.579	1.431	0.409	2.019	1021.79
27.93	2.38	3.769	1.507	0.431	2.073	1022.80
34.28	2.44	3.906	1.562	0.446	2.129	1023.83
41.11	2.50	4.017	1.607	0.459	2.189	1024.88
48.62	2.56	4.111	1.644	0.470	2.251	1025.94
56.99	2.62	4.194	1.678	0.479	2.317	1027.02
66.39	2.69	4.269	1.708	0.488	2.386	1028.12
76.99	2.76	4.339	1.735	0.496	2.459	1029.22
88.99	2.82	4.403	1.761	0.503	2.537	1030.35
102.61	2.89	4.464	1.786	0.510	2.618	1031.49
118.12	2.97	4.523	1.809	0.517	2.704	1032.64
135.74	3.04	4.579	1.832	0.523	2.795	1033.81
155.69	3.12	4.634	1.854	0.530	2.892	1034.98
178.30	3.20	4.688	1.875	0.536	2.994	1036.16
203.96	3.28	4.742	1.897	0.542	3.103	1037.36
233.13	3.36	4.796	1.918	0.548	3.218	1038.56
266.36	3.45	4.851	1.941	0.554	3.341	1039.76
304.28	3.54	4.909	1.963	0.561	3.472	1040.97
347.64	3.64	4.970	1.988	0.568	3.612	1042.18
397.33	3.74	5.035	2.014	0.575	3.761	1043.40
454.42	3.84	5.109	2.044	0.584	3.921	1044.62
502.84	3.92	5.175	2.070	0.591	4.099	1045.83
520.16	3.95	5.200	2.080	0.594	4.093	1045.83
576.03	4.03	6.498	2.599	0.743	4.230	1046.75

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la
paroi de la tuyere pour :

Ms= 4.02635

To= 2000 K

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.01	1.04	0.090	0.036	0.010	1.167	2004.11
0.15	1.13	0.585	0.234	0.067	1.197	2005.49
0.35	1.19	0.953	0.381	0.109	1.221	2006.76
0.60	1.25	1.271	0.508	0.145	1.245	2008.05
0.88	1.31	1.556	0.622	0.178	1.268	2009.39
1.19	1.36	1.820	0.728	0.208	1.291	2010.78
1.53	1.41	2.067	0.827	0.236	1.315	2012.28
1.90	1.46	2.301	0.920	0.263	1.339	2013.84
2.28	1.51	2.524	1.010	0.289	1.364	2015.50
2.69	1.56	2.738	1.095	0.313	1.390	2017.25
3.12	1.61	2.944	1.178	0.336	1.416	2019.11
3.57	1.66	3.143	1.257	0.359	1.444	2021.06
4.03	1.71	3.332	1.333	0.381	1.472	2023.12
4.50	1.76	3.511	1.404	0.401	1.502	2025.28
4.99	1.81	3.687	1.475	0.421	1.533	2027.54
5.51	1.86	3.859	1.543	0.441	1.565	2029.93
6.04	1.91	4.026	1.611	0.460	1.599	2032.42
6.60	1.96	4.190	1.676	0.479	1.634	2035.02
7.18	2.01	4.348	1.739	0.497	1.670	2037.75
7.78	2.06	4.502	1.801	0.515	1.708	2040.59
8.40	2.12	4.651	1.860	0.532	1.749	2043.55
9.04	2.17	4.796	1.918	0.548	1.791	2046.62
9.69	2.23	4.935	1.974	0.564	1.835	2049.82
14.15	2.28	5.561	2.224	0.636	1.881	2053.13
21.95	2.34	6.211	2.484	0.710	1.929	2056.55
28.45	2.40	6.537	2.615	0.747	1.979	2060.07
35.14	2.45	6.772	2.709	0.774	2.033	2063.72
42.40	2.51	6.961	2.784	0.796	2.088	2067.47
50.45	2.58	7.121	2.848	0.814	2.147	2071.35
59.51	2.64	7.262	2.905	0.830	2.209	2075.33
69.74	2.70	7.389	2.955	0.844	2.275	2079.43
81.38	2.77	7.505	3.002	0.858	2.344	2083.64
94.64	2.84	7.613	3.045	0.870	2.417	2087.96
109.81	2.91	7.716	3.086	0.882	2.495	2092.38
127.19	2.98	7.814	3.126	0.893	2.576	2096.90
147.04	3.05	7.909	3.164	0.904	2.663	2101.52
169.59	3.13	8.001	3.200	0.914	2.755	2106.21
195.30	3.21	8.091	3.236	0.925	2.853	2111.00
224.72	3.29	8.181	3.272	0.935	2.956	2115.88
258.38	3.37	8.272	3.309	0.945	3.067	2120.84
296.98	3.46	8.365	3.346	0.956	3.185	2125.87
341.31	3.55	8.463	3.385	0.967	3.311	2130.98
392.33	3.64	8.566	3.426	0.979	3.446	2136.16
451.18	3.74	8.679	3.471	0.992	3.590	2141.39
519.23	3.84	8.806	3.523	1.006	3.745	2146.67
598.10	3.94	8.965	3.586	1.025	3.911	2152.00
665.50	4.03	11.352	4.541	1.297	4.043	2156.03

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$M_s = 3.99594$

$T_o = 3000 \text{ K}$

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.01	1.04	0.119	0.048	0.014	1.155	3000.77
0.15	1.13	0.786	0.314	0.090	1.183	3001.48
0.35	1.20	1.280	0.512	0.146	1.206	3002.22
0.60	1.26	1.705	0.682	0.195	1.227	3003.08
0.88	1.31	2.089	0.836	0.239	1.248	3004.05
1.19	1.37	2.443	0.977	0.279	1.270	3005.16
1.53	1.42	2.776	1.110	0.317	1.292	3006.40
1.89	1.47	3.091	1.236	0.353	1.314	3007.79
2.28	1.52	3.392	1.357	0.388	1.337	3009.36
2.68	1.57	3.681	1.472	0.421	1.361	3011.09
3.11	1.62	3.959	1.584	0.452	1.385	3012.99
3.56	1.67	4.228	1.691	0.483	1.411	3015.09
4.02	1.72	4.484	1.794	0.513	1.437	3017.39
4.51	1.77	4.733	1.893	0.541	1.464	3019.90
5.01	1.82	4.975	1.990	0.569	1.493	3022.63
5.53	1.87	5.210	2.084	0.595	1.522	3025.59
6.07	1.92	5.438	2.175	0.622	1.553	3028.77
6.63	1.97	5.660	2.264	0.647	1.585	3032.21
7.22	2.02	5.875	2.350	0.671	1.619	3035.90
7.82	2.08	6.084	2.433	0.695	1.654	3039.85
8.44	2.13	6.285	2.514	0.718	1.691	3044.07
9.08	2.18	6.480	2.592	0.741	1.730	3048.56
9.74	2.24	6.669	2.668	0.762	1.771	3053.34
14.26	2.29	7.514	3.006	0.859	1.813	3058.39
22.19	2.35	8.383	3.353	0.958	1.858	3063.71
28.85	2.41	8.816	3.526	1.007	1.904	3069.31
35.75	2.46	9.126	3.650	1.043	1.953	3075.21
43.27	2.52	9.375	3.750	1.071	2.005	3081.40
51.66	2.58	9.585	3.834	1.095	2.060	3087.91
61.12	2.65	9.769	3.908	1.116	2.117	3094.73
71.87	2.71	9.935	3.974	1.135	2.177	3101.86
84.13	2.77	10.086	4.035	1.153	2.241	3109.29
98.16	2.84	10.227	4.091	1.169	2.309	3117.02
114.25	2.91	10.360	4.144	1.184	2.381	3125.08
132.74	2.98	10.487	4.195	1.198	2.457	3133.44
153.94	3.05	10.608	4.243	1.212	2.537	3142.12
178.16	3.12	10.726	4.291	1.226	2.622	3151.07
205.85	3.20	10.842	4.337	1.239	2.713	3160.30
237.56	3.28	10.958	4.383	1.252	2.810	3169.85
273.91	3.36	11.074	4.429	1.266	2.912	3179.65
315.69	3.45	11.193	4.477	1.279	3.022	3189.74
363.84	3.53	11.317	4.527	1.293	3.139	3200.10
419.37	3.62	11.448	4.579	1.308	3.264	3210.72
483.56	3.72	11.592	4.637	1.325	3.398	3221.58
557.92	3.82	11.754	4.702	1.343	3.542	3232.68
644.28	3.92	11.956	4.782	1.366	3.696	3243.99
718.20	4.00	15.104	6.042	1.726	3.820	3252.61

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$M_s = 5.0448$

$T_o = 1000 \text{ K}$ (le gaz étant considéré comme parfait)

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.01	1.05	0.080	0.032	0.009	1.194	979.84
0.08	1.14	0.615	0.246	0.070	1.231	977.78
0.18	1.21	0.993	0.397	0.113	1.262	976.32
0.31	1.28	1.318	0.527	0.151	1.292	975.13
0.46	1.34	1.611	0.644	0.184	1.322	974.13
0.62	1.40	1.881	0.752	0.215	1.353	973.27
0.79	1.45	2.134	0.854	0.244	1.384	972.53
0.98	1.51	2.374	0.950	0.271	1.417	971.91
1.18	1.57	2.602	1.041	0.297	1.450	971.41
1.39	1.63	2.821	1.129	0.322	1.485	971.00
1.62	1.68	3.032	1.213	0.347	1.521	970.69
1.85	1.74	3.235	1.294	0.370	1.559	970.49
2.10	1.80	3.431	1.372	0.392	1.599	970.38
2.36	1.86	3.621	1.448	0.414	1.641	970.36
2.63	1.92	3.805	1.522	0.435	1.685	970.43
2.91	1.98	3.982	1.593	0.455	1.731	970.60
3.20	2.04	4.155	1.662	0.475	1.779	970.86
3.51	2.10	4.321	1.728	0.494	1.830	971.22
3.82	2.17	4.482	1.793	0.512	1.884	971.66
4.15	2.23	4.638	1.855	0.530	1.941	972.19
4.49	2.30	4.788	1.915	0.547	2.001	972.80
4.84	2.37	4.933	1.973	0.564	2.064	973.50
5.21	2.44	5.073	2.029	0.580	2.131	974.28
7.76	2.51	5.684	2.274	0.650	2.202	975.14
12.39	2.58	6.303	2.521	0.720	2.276	976.08
16.43	2.65	6.606	2.642	0.755	2.355	977.09
20.75	2.73	6.821	2.728	0.780	2.439	978.17
25.60	2.81	6.991	2.796	0.799	2.528	979.33
31.16	2.89	7.133	2.853	0.815	2.623	980.55
37.62	2.98	7.257	2.903	0.829	2.724	981.84
45.17	3.07	7.367	2.947	0.842	2.832	983.20
54.03	3.16	7.467	2.987	0.853	2.947	984.61
64.47	3.25	7.559	3.023	0.864	3.069	986.09
76.82	3.35	7.645	3.058	0.874	3.201	987.62
91.46	3.45	7.726	3.090	0.883	3.342	989.20
108.81	3.55	7.804	3.122	0.892	3.493	990.82
129.31	3.66	7.879	3.152	0.900	3.656	992.49
153.60	3.78	7.952	3.181	0.909	3.831	994.21
182.43	3.90	8.025	3.210	0.917	4.020	995.95
216.77	4.02	8.098	3.239	0.926	4.224	997.73
257.79	4.15	8.173	3.269	0.934	4.445	999.55
306.98	4.29	8.251	3.301	0.943	4.685	1001.38
366.19	4.43	8.335	3.334	0.953	4.946	1003.24
437.77	4.58	8.427	3.371	0.963	5.229	1005.11
524.70	4.74	8.534	3.414	0.975	5.540	1006.99
630.85	4.91	8.670	3.468	0.991	5.879	1008.87
725.93	5.04	10.972	4.389	1.254	6.155	1010.30

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

Ms= 5.04661

To= 1000 K

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.01	1.05	0.087	0.035	0.010	1.193	1003.33
0.07	1.14	0.672	0.269	0.077	1.230	1004.14
0.18	1.21	1.091	0.436	0.125	1.261	1004.86
0.31	1.28	1.452	0.581	0.166	1.291	1005.56
0.45	1.34	1.777	0.711	0.203	1.321	1006.26
0.61	1.40	2.077	0.831	0.237	1.351	1006.99
0.79	1.45	2.359	0.943	0.270	1.382	1007.73
0.97	1.51	2.625	1.050	0.300	1.414	1008.49
1.17	1.57	2.880	1.152	0.329	1.446	1009.29
1.39	1.62	3.125	1.250	0.357	1.481	1010.11
1.61	1.68	3.360	1.344	0.384	1.516	1010.96
1.84	1.74	3.587	1.435	0.410	1.554	1011.84
2.09	1.79	3.806	1.523	0.435	1.592	1012.75
2.35	1.85	4.019	1.608	0.459	1.633	1013.69
2.61	1.91	4.225	1.690	0.483	1.676	1014.67
2.89	1.97	4.425	1.770	0.506	1.721	1015.67
3.18	2.03	4.618	1.847	0.528	1.768	1016.70
3.48	2.09	4.806	1.922	0.549	1.818	1017.76
3.80	2.16	4.987	1.995	0.570	1.870	1018.85
4.12	2.22	5.163	2.065	0.590	1.925	1019.96
4.46	2.28	5.333	2.133	0.609	1.983	1021.11
4.80	2.35	5.497	2.199	0.628	2.045	1022.28
5.16	2.42	5.655	2.262	0.646	2.110	1023.48
7.69	2.49	6.344	2.538	0.725	2.179	1024.70
12.29	2.56	7.038	2.815	0.804	2.251	1025.94
16.34	2.64	7.378	2.951	0.843	2.328	1027.20
20.70	2.71	7.619	3.048	0.871	2.410	1028.48
25.62	2.79	7.809	3.124	0.892	2.497	1029.78
31.30	2.87	7.968	3.187	0.911	2.589	1031.10
37.93	2.95	8.106	3.243	0.926	2.688	1032.43
45.70	3.04	8.229	3.292	0.940	2.793	1033.78
54.88	3.13	8.340	3.336	0.953	2.906	1035.15
65.73	3.22	8.443	3.377	0.965	3.027	1036.53
78.62	3.32	8.538	3.415	0.976	3.156	1037.92
89.88	3.39	8.607	3.443	0.984	3.260	1038.97
107.40	3.50	8.695	3.478	0.994	3.407	1040.37
128.20	3.61	8.779	3.512	1.003	3.565	1041.78
152.95	3.72	8.861	3.544	1.013	3.736	1043.20
182.46	3.84	8.942	3.577	1.022	3.921	1044.61
217.78	3.96	9.024	3.609	1.031	4.122	1046.03
260.17	4.09	9.107	3.643	1.041	4.340	1047.44
311.27	4.23	9.193	3.677	1.051	4.577	1048.85
373.09	4.38	9.285	3.714	1.061	4.836	1050.25
448.25	4.53	9.386	3.754	1.073	5.119	1051.65
540.06	4.69	9.501	3.800	1.086	5.430	1053.03
652.84	4.86	9.643	3.857	1.102	5.773	1054.40
684.94	4.91	9.688	3.875	1.107	5.864	1054.73
792.18	5.05	12.390	4.956	1.416	6.151	1055.75

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$M_s = 5.04626$

$T_o = 2000 \text{ K}$

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.01	1.05	0.153	0.061	0.017	1.169	2004.17
0.08	1.14	1.222	0.489	0.140	1.202	2005.76
0.18	1.22	1.989	0.795	0.227	1.230	2007.24
0.31	1.28	2.649	1.060	0.303	1.257	2008.75
0.46	1.34	3.246	1.298	0.371	1.284	2010.35
0.62	1.40	3.798	1.519	0.434	1.312	2012.06
0.80	1.46	4.316	1.726	0.493	1.340	2013.89
0.99	1.52	4.808	1.923	0.550	1.369	2015.81
1.20	1.58	5.279	2.111	0.603	1.399	2017.89
1.41	1.64	5.730	2.292	0.655	1.430	2020.10
1.64	1.69	6.166	2.466	0.705	1.463	2022.44
1.88	1.75	6.587	2.635	0.753	1.497	2024.93
2.13	1.81	6.989	2.796	0.799	1.533	2027.58
2.38	1.87	7.372	2.949	0.843	1.571	2030.36
2.65	1.93	7.747	3.099	0.885	1.610	2033.29
2.93	1.99	8.114	3.246	0.927	1.652	2036.39
3.22	2.05	8.471	3.388	0.968	1.696	2039.64
3.52	2.11	8.818	3.527	1.008	1.742	2043.04
3.84	2.17	9.155	3.662	1.046	1.790	2046.61
4.17	2.23	9.482	3.793	1.084	1.842	2050.36
4.50	2.30	9.798	3.919	1.120	1.896	2054.24
4.85	2.37	10.104	4.042	1.155	1.954	2058.30
5.21	2.43	10.400	4.160	1.189	2.015	2062.53
7.73	2.50	11.658	4.663	1.332	2.080	2066.90
12.43	2.58	12.924	5.169	1.477	2.148	2071.40
16.66	2.65	13.539	5.416	1.547	2.221	2076.05
21.28	2.72	13.972	5.589	1.597	2.298	2080.86
26.57	2.80	14.313	5.725	1.636	2.380	2085.81
32.73	2.88	14.597	5.839	1.668	2.468	2090.90
39.99	2.97	14.842	5.937	1.696	2.562	2096.13
48.61	3.05	15.059	6.024	1.721	2.663	2101.50
58.86	3.14	15.255	6.102	1.743	2.771	2106.99
71.11	3.23	15.436	6.174	1.764	2.886	2112.61
85.80	3.33	15.604	6.242	1.783	3.011	2118.34
103.44	3.43	15.764	6.306	1.802	3.145	2124.18
124.62	3.53	15.916	6.366	1.819	3.289	2130.10
149.95	3.64	16.063	6.425	1.836	3.445	2136.12
180.37	3.75	16.207	6.483	1.852	3.613	2142.22
217.00	3.87	16.350	6.540	1.869	3.797	2148.38
261.27	4.00	16.495	6.598	1.885	3.996	2154.60
314.93	4.13	16.644	6.658	1.902	4.213	2160.87
380.25	4.27	16.801	6.721	1.920	4.450	2167.18
460.11	4.41	16.971	6.788	1.940	4.709	2173.51
558.19	4.57	17.160	6.864	1.961	4.995	2179.86
679.31	4.73	17.382	6.953	1.986	5.309	2186.21
829.76	4.91	17.671	7.068	2.019	5.656	2192.53
966.73	5.05	23.060	9.224	2.635	5.941	2197.26

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

Ms= 5.04485

To= 3000 K

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.01	1.05	0.219	0.088	0.025	1.157	3000.79
0.08	1.14	1.792	0.717	0.205	1.188	3001.62
0.18	1.22	2.913	1.165	0.333	1.214	3002.54
0.31	1.29	3.880	1.552	0.443	1.239	3003.62
0.46	1.35	4.754	1.902	0.543	1.264	3004.85
0.62	1.41	5.565	2.226	0.636	1.290	3006.28
0.80	1.47	6.327	2.531	0.723	1.316	3007.92
1.00	1.53	7.051	2.821	0.806	1.343	3009.78
1.20	1.59	7.744	3.098	0.885	1.371	3011.89
1.42	1.65	8.411	3.364	0.961	1.400	3014.25
1.65	1.71	9.054	3.622	1.035	1.431	3016.87
1.89	1.77	9.676	3.870	1.106	1.463	3019.79
2.14	1.83	10.274	4.110	1.174	1.496	3023.00
2.40	1.88	10.853	4.341	1.240	1.531	3026.53
2.67	1.94	11.416	4.566	1.305	1.568	3030.38
2.95	2.01	11.963	4.785	1.367	1.607	3034.57
3.25	2.07	12.494	4.998	1.428	1.648	3039.15
3.56	2.13	13.009	5.203	1.487	1.691	3044.07
3.87	2.19	13.508	5.403	1.544	1.737	3049.37
4.20	2.26	13.991	5.596	1.599	1.785	3055.07
4.54	2.32	14.458	5.783	1.652	1.837	3061.16
4.90	2.39	14.909	5.964	1.704	1.891	3067.69
5.26	2.46	15.344	6.138	1.754	1.948	3074.60
7.82	2.53	17.184	6.873	1.964	2.010	3081.93
12.65	2.60	19.011	7.604	2.173	2.074	3089.64
17.06	2.67	19.892	7.957	2.273	2.143	3097.77
21.93	2.75	20.507	8.203	2.344	2.216	3106.30
27.56	2.83	20.988	8.395	2.399	2.294	3115.30
34.18	2.91	21.386	8.555	2.444	2.377	3124.69
42.05	2.99	21.728	8.691	2.483	2.466	3134.52
51.45	3.07	22.029	8.812	2.518	2.562	3144.75
62.73	3.16	22.300	8.920	2.549	2.665	3155.40
76.29	3.25	22.548	9.019	2.577	2.775	3166.48
92.66	3.35	22.778	9.111	2.603	2.894	3177.90
112.46	3.45	22.995	9.198	2.628	3.022	3189.74
136.38	3.55	23.202	9.281	2.652	3.160	3201.93
165.20	3.66	23.400	9.360	2.674	3.310	3214.46
200.03	3.77	23.594	9.438	2.696	3.472	3227.32
242.27	3.89	23.787	9.515	2.718	3.648	3240.50
293.64	4.01	23.981	9.592	2.741	3.840	3253.97
356.31	4.14	24.181	9.672	2.764	4.049	3267.70
433.07	4.27	24.391	9.756	2.788	4.279	3281.66
527.50	4.42	24.618	9.847	2.814	4.530	3295.84
644.26	4.57	24.873	9.949	2.843	4.807	3310.19
789.33	4.73	25.172	10.069	2.877	5.113	3324.67
970.65	4.91	25.565	10.226	2.922	5.451	3339.27
1136.69	5.04	33.268	13.307	3.802	5.729	3350.26

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la
 _ paroi de la tuyere pour :

$M_s = 6.06555$

$T_o = 1000 \text{ K}$ (le gaz étant considéré comme parfait)

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.01	1.05	0.187	0.075	0.021	1.195	979.76
0.08	1.15	1.526	0.610	0.174	1.235	977.57
0.19	1.23	2.469	0.988	0.282	1.269	976.02
0.32	1.30	3.280	1.312	0.375	1.303	974.78
0.47	1.36	4.011	1.604	0.458	1.336	973.73
0.64	1.43	4.686	1.874	0.536	1.370	972.85
0.82	1.49	5.319	2.128	0.608	1.405	972.12
1.01	1.56	5.920	2.368	0.677	1.442	971.52
1.22	1.62	6.493	2.597	0.742	1.480	971.05
1.45	1.68	7.043	2.817	0.805	1.520	970.70
1.68	1.75	7.573	3.029	0.865	1.562	970.47
1.93	1.81	8.084	3.233	0.924	1.606	970.36
2.19	1.87	8.577	3.431	0.980	1.653	970.37
2.46	1.94	9.055	3.622	1.035	1.702	970.49
2.74	2.01	9.518	3.807	1.088	1.754	970.72
3.04	2.08	9.966	3.986	1.139	1.809	971.06
3.35	2.15	10.400	4.160	1.189	1.867	971.52
3.68	2.22	10.819	4.328	1.236	1.929	972.07
4.01	2.29	11.225	4.490	1.283	1.995	972.74
4.36	2.37	11.617	4.647	1.328	2.065	973.51
4.73	2.44	11.995	4.798	1.371	2.139	974.38
5.10	2.52	12.359	4.944	1.412	2.218	975.35
5.49	2.61	12.711	5.084	1.453	2.303	976.41
8.29	2.69	14.180	5.672	1.621	2.392	977.57
13.62	2.78	15.633	6.253	1.787	2.488	978.80
18.55	2.87	16.328	6.531	1.866	2.590	980.12
24.06	2.96	16.812	6.725	1.921	2.699	981.53
30.50	3.05	17.188	6.875	1.964	2.817	983.01
38.19	3.15	17.498	6.999	2.000	2.943	984.58
47.44	3.26	17.764	7.105	2.030	3.079	986.20
58.66	3.36	17.996	7.198	2.057	3.226	987.90
72.33	3.48	18.204	7.282	2.080	3.384	989.65
89.05	3.59	18.393	7.357	2.102	3.555	991.47
109.58	3.72	18.568	7.427	2.122	3.741	993.33
134.88	3.85	18.732	7.493	2.141	3.942	995.25
166.08	3.98	18.887	7.555	2.159	4.162	997.20
204.52	4.12	19.035	7.614	2.175	4.401	999.19
252.04	4.28	19.179	7.672	2.192	4.663	1001.22
311.04	4.43	19.320	7.728	2.208	4.950	1003.27
384.64	4.60	19.462	7.785	2.224	5.265	1005.33
476.92	4.78	19.608	7.843	2.241	5.613	1007.41
593.29	4.97	19.759	7.904	2.258	5.997	1009.50
741.10	5.17	19.923	7.969	2.277	6.424	1011.59
930.13	5.39	20.105	8.042	2.298	6.900	1013.67
1173.87	5.62	20.321	8.128	2.322	7.431	1015.75
1490.97	5.87	20.606	8.242	2.355	8.027	1017.81
1792.33	6.07	26.267	10.507	3.002	8.524	1019.34

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$M_s = 6.06913$

$T_o = 1000 \text{ K}$

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.01	1.05	0.203	0.081	0.023	1.195	1003.35
0.08	1.15	1.661	0.664	0.190	1.234	1004.24
0.18	1.23	2.696	1.078	0.308	1.268	1005.01
0.31	1.30	3.588	1.435	0.410	1.301	1005.78
0.46	1.36	4.393	1.757	0.502	1.333	1006.56
0.63	1.43	5.138	2.055	0.587	1.367	1007.37
0.81	1.49	5.838	2.335	0.667	1.401	1008.20
1.01	1.55	6.502	2.601	0.743	1.437	1009.06
1.21	1.61	7.136	2.854	0.816	1.474	1009.96
1.43	1.68	7.746	3.098	0.885	1.513	1010.90
1.67	1.74	8.333	3.333	0.952	1.554	1011.86
1.91	1.80	8.901	3.560	1.017	1.597	1012.87
2.17	1.87	9.450	3.780	1.080	1.642	1013.91
2.44	1.93	9.982	3.993	1.141	1.690	1014.98
2.72	2.00	10.498	4.199	1.200	1.740	1016.09
3.02	2.06	10.998	4.399	1.257	1.793	1017.24
3.32	2.13	11.483	4.593	1.312	1.850	1018.43
3.64	2.20	11.952	4.781	1.366	1.909	1019.64
3.97	2.27	12.407	4.963	1.418	1.972	1020.90
4.32	2.35	12.846	5.139	1.468	2.040	1022.19
4.67	2.42	13.271	5.309	1.517	2.111	1023.50
5.04	2.50	13.681	5.473	1.564	2.187	1024.85
5.43	2.58	14.077	5.631	1.609	2.269	1026.23
8.17	2.66	15.730	6.292	1.798	2.355	1027.63
13.43	2.75	17.358	6.943	1.984	2.447	1029.04
18.32	2.83	18.137	7.255	2.073	2.546	1030.48
23.83	2.92	18.677	7.471	2.135	2.652	1031.95
30.30	3.02	19.098	7.639	2.183	2.765	1033.43
38.04	3.12	19.445	7.778	2.222	2.887	1034.93
47.42	3.22	19.741	7.896	2.256	3.019	1036.44
58.83	3.32	20.000	8.000	2.286	3.161	1037.97
72.78	3.43	20.233	8.093	2.312	3.315	1039.51
89.92	3.55	20.444	8.178	2.336	3.482	1041.06
111.04	3.67	20.639	8.256	2.359	3.664	1042.61
137.18	3.80	20.822	8.329	2.380	3.861	1044.17
169.55	3.94	20.995	8.398	2.399	4.077	1045.73
209.62	4.08	21.160	8.464	2.418	4.313	1047.28
259.39	4.23	21.320	8.528	2.437	4.573	1048.83
321.51	4.39	21.478	8.591	2.455	4.858	1050.37
399.42	4.56	21.637	8.655	2.473	5.174	1051.90
497.69	4.74	21.799	8.719	2.491	5.524	1053.41
622.45	4.93	21.968	8.787	2.511	5.913	1054.91
781.97	5.14	22.151	8.861	2.532	6.347	1056.39
987.58	5.36	22.356	8.942	2.555	6.834	1057.85
1254.96	5.60	22.598	9.039	2.583	7.383	1059.27
1606.15	5.86	22.920	9.168	2.619	8.004	1060.67
1942.89	6.07	29.518	11.807	3.373	8.524	1061.70

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la
paroi de la tuyere pour :

Ms= 6.07111

To= 2000 K

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.00	1.05	0.370	0.148	0.042	1.170	2004.22
0.08	1.15	3.129	1.252	0.358	1.206	2005.94
0.19	1.23	5.097	2.039	0.583	1.236	2007.56
0.32	1.30	6.798	2.719	0.777	1.266	2009.25
0.47	1.37	8.336	3.334	0.953	1.295	2011.05
0.64	1.44	9.761	3.904	1.116	1.326	2012.98
0.82	1.50	11.102	4.441	1.269	1.357	2015.06
1.02	1.56	12.377	4.951	1.414	1.390	2017.29
1.23	1.63	13.597	5.439	1.554	1.424	2019.67
1.46	1.69	14.770	5.908	1.688	1.460	2022.22
1.70	1.75	15.903	6.361	1.818	1.498	2024.96
1.95	1.82	16.999	6.800	1.943	1.537	2027.87
2.21	1.88	18.059	7.223	2.064	1.579	2030.96
2.47	1.94	19.062	7.625	2.179	1.623	2034.24
2.75	2.01	20.044	8.018	2.291	1.669	2037.69
3.05	2.08	21.003	8.401	2.400	1.719	2041.35
3.36	2.15	21.936	8.775	2.507	1.771	2045.19
3.68	2.22	22.844	9.138	2.611	1.826	2049.24
4.01	2.29	23.725	9.490	2.711	1.885	2053.47
4.36	2.36	24.578	9.831	2.809	1.948	2057.91
4.71	2.44	25.404	10.162	2.903	2.015	2062.54
5.08	2.51	26.203	10.481	2.995	2.087	2067.37
5.47	2.59	26.974	10.790	3.083	2.163	2072.38
8.19	2.67	30.129	12.052	3.443	2.245	2077.57
13.56	2.76	33.224	13.290	3.797	2.332	2082.91
18.67	2.84	34.693	13.877	3.965	2.425	2088.43
24.51	2.93	35.706	14.282	4.081	2.526	2094.11
31.48	3.03	36.490	14.596	4.170	2.634	2099.97
39.93	3.12	37.132	14.853	4.244	2.750	2105.97
50.28	3.22	37.679	15.072	4.306	2.876	2112.12
63.02	3.33	38.157	15.263	4.361	3.012	2118.41
78.77	3.44	38.583	15.433	4.409	3.160	2124.83
98.33	3.55	38.970	15.588	4.454	3.321	2131.36
122.68	3.67	39.327	15.731	4.495	3.496	2138.00
153.13	3.80	39.662	15.865	4.533	3.687	2144.73
191.23	3.94	39.979	15.991	4.569	3.896	2151.55
238.79	4.08	40.282	16.113	4.604	4.126	2158.42
298.49	4.23	40.577	16.231	4.637	4.378	2165.34
373.78	4.38	40.869	16.348	4.671	4.657	2172.29
469.22	4.55	41.164	16.465	4.704	4.967	2179.26
590.91	4.73	41.467	16.587	4.739	5.310	2186.24
747.11	4.93	41.788	16.715	4.776	5.694	2193.19
949.13	5.13	42.138	16.855	4.816	6.124	2200.11
1212.60	5.36	42.534	17.013	4.861	6.609	2206.97
1559.46	5.60	43.010	17.204	4.915	7.157	2213.76
2020.96	5.86	43.659	17.464	4.990	7.780	2220.46
2468.76	6.07	57.867	23.147	6.613	8.305	2225.41

Caracteristiques de la couche limite laminaire le long de la paroi de la tuyere pour :

$M_s = 6.07007$

$T_o = 3000 \text{ K}$

x (mm)	M	δ' (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	b=Tp/Te	Tp (K)
0.01	1.05	0.617	0.247	0.071	1.158	3000.82
0.08	1.15	4.791	1.916	0.548	1.191	3001.74
0.19	1.24	7.790	3.116	0.890	1.220	3002.77
0.32	1.31	10.380	4.152	1.186	1.247	3003.99
0.47	1.38	12.727	5.091	1.454	1.275	3005.44
0.64	1.45	14.904	5.962	1.703	1.303	3007.11
0.83	1.51	16.955	6.782	1.938	1.333	3009.05
1.03	1.58	18.908	7.563	2.161	1.363	3011.27
1.24	1.64	20.780	8.312	2.375	1.395	3013.80
1.47	1.70	22.582	9.033	2.581	1.428	3016.66
1.71	1.77	24.323	9.729	2.780	1.464	3019.84
1.96	1.83	26.009	10.403	2.972	1.500	3023.41
2.22	1.90	27.624	11.050	3.157	1.539	3027.35
2.49	1.96	29.203	11.681	3.337	1.581	3031.69
2.78	2.03	30.735	12.294	3.513	1.624	3036.44
3.08	2.10	32.224	12.890	3.683	1.670	3041.66
3.39	2.17	33.669	13.468	3.848	1.719	3047.30
3.71	2.24	35.070	14.028	4.008	1.771	3053.42
4.05	2.31	36.428	14.571	4.163	1.827	3060.03
4.40	2.38	37.740	15.096	4.313	1.886	3067.11
4.76	2.46	39.009	15.604	4.458	1.949	3074.72
5.13	2.54	40.234	16.093	4.598	2.017	3082.82
5.52	2.62	41.415	16.566	4.733	2.089	3091.47
8.28	2.70	46.191	18.476	5.279	2.167	3100.58
13.79	2.78	50.820	20.328	5.808	2.249	3110.19
19.14	2.87	52.992	21.197	6.056	2.338	3120.27
25.33	2.96	54.478	21.791	6.226	2.433	3130.89
32.80	3.05	55.617	22.247	6.356	2.536	3142.00
41.96	3.15	56.545	22.618	6.462	2.647	3153.62
53.29	3.25	57.329	22.931	6.552	2.767	3165.72
67.38	3.35	58.009	23.204	6.630	2.898	3178.32
84.95	3.46	58.612	23.445	6.699	3.040	3191.34
106.94	3.57	59.157	23.663	6.761	3.194	3204.86
134.54	3.69	59.657	23.863	6.818	3.362	3218.74
169.32	3.82	60.122	24.049	6.871	3.547	3233.04
213.15	3.95	60.561	24.224	6.921	3.749	3247.68
268.40	4.09	60.980	24.392	6.969	3.971	3262.66
338.31	4.24	61.386	24.554	7.016	4.216	3277.93
427.20	4.39	61.788	24.715	7.061	4.487	3293.48
540.77	4.56	62.193	24.877	7.108	4.788	3309.22
686.75	4.74	62.611	25.044	7.155	5.123	3325.14
875.66	4.93	63.052	25.221	7.206	5.499	3341.21
1121.98	5.14	63.535	25.414	7.261	5.920	3357.34
1445.96	5.36	64.086	25.635	7.324	6.396	3373.50
1876.21	5.60	64.755	25.902	7.401	6.936	3389.65
2453.80	5.86	65.678	26.271	7.506	7.552	3405.71
3018.81	6.07	87.111	34.844	9.956	8.072	3417.66