الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Mécanique



Mémoire de Master

Option : Energétique

THEME

SIMULATION BIDIMENTIONNELLE D'UN JET DE PLASMA THERMIQUE D'ARGON DECHARGEANT DANS L'AIR AMBIANT

Proposé et dirigé par :

Pr. ANNOUN Mohamed

Fait par :

M. KHELFI Anouar Abd El Djalil

M. BAYAH Mohamed

AnnéeUniversitaire 2017/2018

ملخص

الهدف من هذه الدراسة، العمل على تطوير محاكاة لتدفق بلازما الأرقون الحرارية في الهواء, باستعمال برنامج الحساب بالأحجام المنتهية ANSYS, قمنا باستعمال نموذج الاضطراب SST. دراسة تأثير تغيير بعض العوامل على انتشار الحرارة و السرعة في الفضاء على طول القذف. نتائج المحاكاة تتوافق مع نتائج قياس الحرارة مخبريا.

كلمات مفتاحية: تدفق بلازما الحرارية, Ansys, تدفق مضطرب, نموذج SST

Résumé

Le but de notre travail se concentre sur le développement d'une simulation numérique en 2D d'un jet de plasma thermique d'argon déchargeant dans l'air ambiant par le moyen de calcul par volume finis (ANSYS) en utilisant le model de turbulence SST. L'influence des paramètres opératoires sur la distribution de la température et de la vitesse spatiale le long du jet a été examinée. Les résultats de la simulation sont très cohérents avec les mesures de températures expérimentales de la littérature.

mots clés: Jet de plasma thermique, Ansys, jet turbulent, model SST,

Abstract

This work focuses on developing a 2D numerical simulation of an argon thermal plasma jet discharging into the ambient air using a finite volume computation code (ANSYS) based on SST turbulence model. The influence of operating parameters on the behavior of temperature and velocity throughout the jet is investigated. The results of the simulation are very consistent with the experimental measurements.

Keywords: Thermal plasma jet, Ansys, turbulent jet, SST model

Dédicaces

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut pour une décidas assez et le compte pour exprimer ce qu'il faut exprimer.

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leurs soutiens et leurs prières depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Puisse Dieu, le Tous Puissant, vous préserver et vous accorder santé et longue vie pleine de foi et de joie

Mes chers frères et sœurs ainsi leurs familles que je leur exprime mes sincères sentiments de fraternité et d'amour

Mon binôme **BAYAH Mohamed** ainsi à tous mes chers **Amis** qui étaient toujours à mes côtés par leurs aides et encouragements dont je leur souhaite un Avenir plein de Succès et de Bonheur.

KHELFI Anouar Abd El Djalil

Dédicaces

A mes Très chers Parents

Je dédie ce mémoire à mes parents, pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, leurs

Encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes études.

Aucun mot, aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération, et mon

Amour pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon instruction et mon bien-être.

Trouvez ici, chère mère et cher père, dans ce modeste travail, le fruit de tant de dévouements et de

sacrifices ainsi que l'expression de ma gratitude et de mon profond amour.

Puisse Dieu leur accorder santé, bonheur, prospérité et longue vie afin que je puisse un jour

combler de joie leurs vieux jours. Mon petit Frère et mes sœurs

Je leur dédie ce travail pour tous les sacrifices qu'ils n'ont cessé de m'apporter tout au long

de mes années d'études.

Remerciements

Notre premier et dernier Merci est pour « **Allah** » qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail parce que sans Lui nous ne pouvons et pourrons rien faire.

Ensuite, nous tenons à remercier grandement notre Directeur de recherche Monsieur le Professeur **Mohamed ANNOUN** de nous avoir proposé notre présent thème et honoré d'être notre encadreur. Tout en lui souhaitant un prompt rétablissement et un retour en force.

(In challah)

Sons oublier Monsieur le Docteur **Rédha REBHI** pour leur soutien et surtout leur disponibilité.

Nos remerciements s'étendent pour l'ensemble des enseignants du département du Génie Mécanique (Université de Médéa) de la qualité de leur formation donnée et pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à notre Famille de nous avoir accompagné, soutenu et encouragé tout au long des années de nos études, à nos Amis et à toute Personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de notre travail de recherche.

KHELFI Anouar Abd El Djalil

TABLE DES MATIERES

Page

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

Chapitre I : généralité sur les plasmas

I.1 introduction :..... 2

I.2 Qu'est-ce qu'un plasma?..... 2

I.3 Classification des plasmas :..... 3

I.3.1 Plasmas froids hors équilibre thermodynamique :..... 3

I.3.2 Plasmas thermiques..... 4

I.3.3 Plasmas chauds..... 4

I.4 approfondissement sur les plasmas thermiques..... 4

I-5 Notions fondamentales sur les plasmas thermiques..... 5

I.5.1 Degré d'ionisation d'un plasma..... 5

1.5.2 Température des espèces..... 5

1.5.3 Pression..... 6

I.5.4 Densité..... 6

I.5.5 Viscosité..... 6

I.5.6 Chaleur spécifique..... 7

I.6 Techniques de production des plasmas thermiques..... 8

I.6.1 Torches à arcs soufflés..... 9

I.6.2 torche à arc libre..... 9

I.7 Méthodes de mesure de la température d'un jet de plasma..... 10

I.7.1 Techniques intrusives..... 10

I.7.1.1 Les thermocouples :..... 11

I.7.1.2 Les sondes enthalpiques..... 12

I.7.2 techniques non-intrusives :..... 12

I.7.2.1 les méthodes basées sur la diffusion laser..... 13

I.7.2.2 les méthodes optiques basées sur l'indice de réfraction du plasma :..... 13

I.7.2.2.1l'interférométrie..... 13

I.7.2.2.2 l'ombrosocopie..... 13

I.7.2.2.3 la strioscopie..... 13

I.7.2.3 la spectroscopie optique d'émission..... 14

I.8 Applications des plasmas..... 14

I.8.1 Projection thermique : **14**
I.8.2Traitement des polluants gazeux : **15**
I.8.3 Métallurgie **15**
I.8.3.1la première catégorie **15**
I.8.3.2 la deuxième catégorie **15**
I.8.4 Découpe à l'arc **16**
I.9 Fonctionnement de torche DC **16**
I.10 Conclusion **18**

Chapitre II : description et simulation d'un jet de plasma thermique

II.1 Introduction **19**
II.2 Description du jet **19**
II.3 Modélisation du jet de plasma thermique. **21**
II.3 Modèle analytique d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air **21**
II.3.1 expressions de la vitesse **21**
II.3.2 Expression de la température du jet **22**
II.4 Modélisation de l'écoulement du jet de plasma : **22**
II.4.1Hypothèses **23**
II.4.2 Formulation mathématique du jet de plasma, équations de conservation [48] **23**
II.4.3 Turbulence **25**
II.5 Travaux antérieurs **26**
II.6 Conclusion **30**

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1 Introduction **31**
III.2 démarche de calcul par ANSYS **31**
III.2.1 Présentation du code de calcul ANSYS **31**
III.2.2 Démarche pour l'exécution du projet **31**
III.3 Température et vitesse à la buse (Conditions aux limites) **34**
III.4 Résultats **38**
III.5 Validation de notre simulation **39**
III.6 Effet des conditions opératoires sur la température et la vitesse axiale du jet **41**

III.6.1 Effet de la puissance effective 41
III.6.1 Effet du débit 43
III.6.1 Effet du diamètre de la buse 44
III.7 Evolution radiale de la température et de la vitesse le long du jet 45
Conclusion générale 46

Bibliographie

ANNEXE

List des figures et List des tableaux

CHAPITRE I

FIGURE I. 1 :LES PHASES DE LA MATIERE 3
FIGURE I. 2 :EVOLUTIONS AVEC LA PRESSION DE LA TEMPERATURE DU GAZ ET DES ELECTRONS A COURANT CONSTANT [6] 4
FIGURE I. 3 :L'EFFET DE PRESSION SUR LES PARTICULES DE PLASMA THERMIQUE 6
FIGURE I. 4: VISCOSITE DE PLASMA AR ET AR-H2 A LA PRESSION ATMOSPHERIQUE [17] 7
FIGURE I. 5 : CAPACITE CALORIFIQUE DE PLASMA D'ARGON, D'HYDROGENE ET D'HELIUM EN FONCTION DE LA TEMPERATURE P= 1ATM [17] 8
FIGURE I. 6: SCHEMA D'UNE TORCHE A ARC SOUFFLE [21] 10
FIGURE I. 7 : SCHEMA D'UN ARC LIBRE [21] 11
FIGURE I. 8: PRINCIPE DE LA PROJECTION PLASMA [35] 15
FIGURE I. 9 : SOUDURE MMA 16
FIGURE I. 10 : SOUDURE TIG 16
FIGURE I. 11 : DECOUPE A L'ARC ELECTRIQUE. [36] 17
FIGURE I. 12 : VUE EN COUPE D'UNE TORCHE A PLASMA COURANT CONTINU(DC) 18

CHAPITREII

FIGURE II. 1 : STRUCTURE D'UN JET [46] 19
FIGURE II. 2 : PROFIL DE TEMPERATURE DU JET DECHARGEANT DANS L'AIR (D=8MM,QAR =40L/MN P= 3000WATTS) 20
FIGURE II. 3 : PROFILE DE TEMPERATURE DU JET DECHARGEANT DANS L'AIR (D= 8 MM, Q_{AR}=40 L/MIN, P=3000W) 20
FIGURE II. 4 : PROFILE DE TEMPERATURE AXIALE D'UN JET DE PLASMA D'ARGON DECHARGEANT DANS L'AIR POUR PLUSIEURS PUISSANCES [47] 27
FIGURE II. 5 : CONCENTRATION AXIAL D'ARGON [51] 28
FIGURE II. 6 : TEMPERATURE AXIALE DU JET DE PLASMA D'ARGON [25] 28
FigureII.7 :concentration radiale d'argon[25]…..……...29

FIGURE II. 8 : VARIATION DE LA TEMPERATURE LE LONG DE L'AXE DU PLASMA D'ARGON POUR DIFFERENT PUISSANCES [47]. 30

CHAPTRE III

FIGURE III. 1 : LES ETAPES PRINCIPALES POUR LE CALCUL PAR ELEMENT FINIS 30
FIGURE III. 2 : LA GEOMETRIE POUR NOTRE ETUDE 31
FIGURE III. 3 : MAILLAGE DE DOMAINE DE CALCULE 32
FIGURE III. 4 : ENTRE DE LA BUSE DANS LA GEOMETRIE 32

FIGURE III. 6 : TEMPS PRIS POUR TERMINER LE CALCUL 33
FIGURE III. 5 : VALEURS DE TEMPERATURE ET DE LA VITESSE UTILISEE DANS NOTRE SIMULATION 33
FIGURE III. 7 : TEMPERATURE T_0 EN FONCTION DE P [51] 35
FIGURE III. 8 : VITESSE U_0 EN FONCTION DE P [51] 35
FIGURE III. 9 : VARIATION DE T_0 EN FONCTION DE P POUR DIVERSES VALEURS DU DEBIT D'ARGON Q [51] 36
FIGURE III. 10 : VARIATION DE T_0 EN FONCTION DE P POUR DIFFERENTES VALEURS DE DIAMETRE DE BUSE D [51] 36
FIGURE III. 11 : CHAMP DE TEMPERATURE D'UN JET DE PLASMA D'ARGON DECHARGEANT DANS L'AIR 37
FIGURE III. 12 : CHAMP VITESSE D'UN JET DE PLASMA D'ARGON DECHARGEANT DANS L'AIR .. 37
FIGURE III. 13 : DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE AXIALE DU JET DE PLASMA D'ARGON (P. SNABRE ET SIMULATION) P=1130W Q = 8L/MN, D = 3 MM 39
FIGURE III. 14 : DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE AXIALE DU JET DE PLASMA D'ARGON (P. SNABRE ET SIMULATION) P=850 W Q = 8L/MN, D = 3 MM..... 39
FIGURE III. 15 : DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE AXIALE DU JET DE PLASMA D'ARGON (P. SNABRE ET SIMULATION) P = 533W Q = 8L/MN, D = 3 MM 40
FIGURE III. 16 :L'EFFET DE LA PUISSANCE SUR LA TEMPERATURE AXIAL..... 41
FIGURE III. 17: L'EFFET DE PUISSANCE EFFECTIVE SUR VITESSE AXIALE..... 41
FIGURE III. 18 : L'EFFET DE DEBITE SUR LA TEMPERATURE 42
FIGURE III. 19 : EFFET DU DIAMETRE DE LA BUSE SUR LA TEMPERATURE DU JET..... 43
FIGURE III. 20 : TEMPERATURE RADIALE LE LONG DU JET A DIFFERENTES VALEURS X P=3000W, Q=40 L/M, D=8MM 44
FIGURE III. 21 : TEMPERATURE RADIALE LE LONG DU JET A DIFFERENTES VALEURS X P=4000W, Q=40 L/M, D=8MM 44

List de tableaux

Tableau II.1- Propriétés des thermocouples pour les hautes températures [24]……..11

Tableau III.1 : données d'entrées T_0 et U_0 pour Q = 8.4 l/mn et D= 3mm……39

NOMENCLATURE

Te : température des électrons

Tn : température des neutres

Ti : température des ions

α_i : degré d'ionisation

n_e : densités électronique et des électrons

n_N : densités électronique et des neutres

U_0 : Vitesse du jet à la buse (sortie du jet)

r_i : le rayon du cœur.

r_5 : le rayon où la vitesse u est la moitié de sa valeur sur l'axe du jet.

$\vec{V}$: Masse volumique (kg.m-3)

τ: Tenseur de contrainte de cisaillement ($N.m^{-2}$)

P: Pression statique (Pa)

F_{em}: Force de Lorentz ($N.m^{-3}$)

$\hat{h}$: Enthalpie ($d\hat{h} = C_p dt$)

Q_{em}: Chaleur fournie par effet Joule (J)

$\vec{A}$: Vecteur potentiel (T.m)

μ_0: Perméabilité électrique ($\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ $H.m^{-1}$)

σ: Conductivité électrique ($\Omega.^{-1}m^{-1}$)

E: champ électrique ($V.m^{-1}$)

$\vec{H}$: Champ électromagnétique (T)

$\overline{V}_x$: Composante moyenne de la vitesse dans la direction x

V'_x: Fluctuant composante de vitesse dans la direction

G : terme de production.

Γ : terme de diffusivité

Y : terme de dissipation.

S : terme source.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Très souvent dans le domaine de la mécanique spécialement celui de la construction, on est amené à chercher des solutions pour protéger les surfaces des matériaux employés dans des conditions sévères dans lesquelles apparaissent les chocs thermiques et les contraintes chimiques (corrosion). Parmi les solutions préconisées et connues comme étant efficaces, on cite le procédé de revêtement par projection plasma thermique. Cependant, l'obtention d'une bonne qualité de revêtement répondant aux exigences de qualité en matière d'efficacité et de sécurité repose sur la maitrise des procédés de plasma thermique. Alors que dans ces procédés, le milieu précurseur des particules solides est constitué d'un jet de plasma thermique issu d'une torche se déchargeant dans un réacteur.

La génération de jets de plasma est un processus compliqué et sa simulation représente un intérêt évident qui doit précéder l'application industrielle. Cette simulation peut être effectuée expérimentalement en laboratoire par des équipements qui sont lourds à mettre en œuvre et par conséquent très couteux. C'est pourquoi, la simulation numérique offre un avantage économique en simulant les jets dans des conditions opératoires différentes et collecte des informations qui sont difficiles à atteindre expérimentalement.

Notre travail a pour objectif de simuler en 2D d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air ambiant par utilisation du code de calcul ANSYS et étudier l'effet des conditions opératoires à savoir la puissance effective fournie au gaz, le débit de gaz plasmagène et le diamètre de la buse sur les profils de température et de vitesse le long du jet .

Ce travail s'articule autour de trois chapitres :

Dans le premier, nous allons présenter des généralités sur les plasmas thermiques. Nous exposons également les différents procédés les plus utilisés pour la génération des plasmas thermiques et les techniques de mesures de température les plus employées.

Nous présentons dans le deuxième les équations de la convection gouvernante les jets de plasma thermique tout en présentant quelques travaux relatifs aux mesures de températures.

Le dernier chapitre sera consacré à la méthodologie, aux étapes de la simulation par ANSYS et à la présentation des résultats obtenus. Notre travail s'achève par une conclusion générale dans laquelle nous synthétisons tout ce qui a été abordé dans notre étude.

Chapitre I :

Généralités sur les plasmas

I.1 introduction :

Le plasma est un milieu constitué d'un mélange de molécules d'atomes et d'ions le plus souvent dans des états excités, ainsi que d'électrons, l'ensemble étant électriquement neutre et les particules ayant dans la majorité des cas une grande énergie cinétique. Si l'on excepte les lasers et les ondes de choc, la génération d'un plasma peut être schématiquement divisée en trois éléments fondamentaux : une source de puissance électrique, un couplage assurant le contact et une décharge ionisant l'atmosphère. D'une manière générale, la source de puissance peut être soit un générateur électrique à courant continu ou alternatif, soit un générateur radiofréquence, soit un générateur micro-onde. [F. K et P. F], dans cette partie, nous donnons les notions sur les plasmas et ces types et nous focusons sur le plasma thermique et comment elle est généré et ces applications

I.2 Qu'est-ce qu'un plasma?

Le plasma est défini comme étant le quatrième état de la matière, en suivant les états «solide-liquide-gaz » **Figure I.1** et défini aussi comme étant un gaz partiellement ou totalement ionisé. Ce terme a été introduit pour la première fois pour expliquer un état de la matière contenant des espèces chargées positivement ou négativement, mais globalement neutre la première expérience fut sur les plasmas est réalisé en 1813 par sir **« HUMPHRY DAVY »,** (inventeur et chimiste anglais) qui découvert la décharge inductive, et ne fut réalisé que tardivement par **« JOHAN WIHLEN HITTORF »** (physicien et chimiste allemand). nous ne pouvons pas dire que tout gaz ionisé est un plasma puisque tous les gaz ont un faible degré d'ionisation [1]

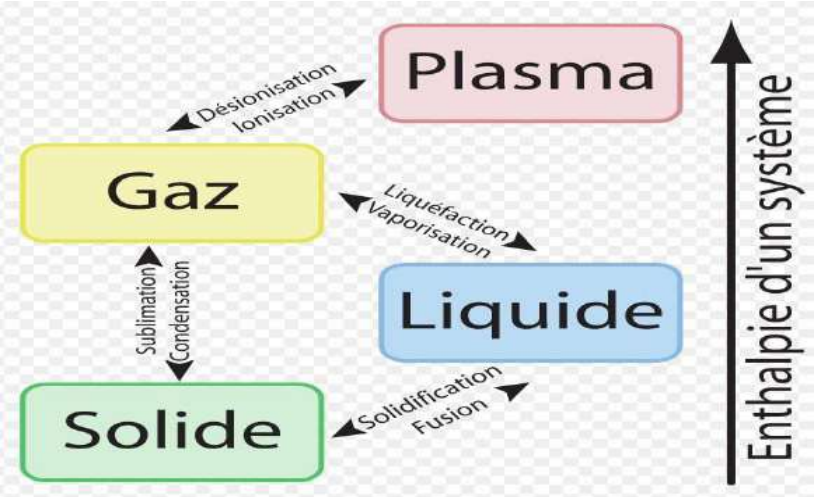


Figure I. 1 les phases de la matière

I.3 Classification des plasmas :

I.3.1 Plasmas froids hors équilibre thermodynamique :

C'est un plasma froid ou faiblement ionisé qui n'est en équilibre thermodynamique et dont seuls les électrons sont chauffés. Ces plasmas induits électriquement sont appelés «décharges» et à cause de leurs basses températures, ils sont quelquefois assimilés aux plasmas froids. Dans le plasma froid, le degré d'ionisation est inférieur à 10^{-4} [2].

Ces plasmas non thermiques sont naturellement caractérisés par plusieurs températures. La température des électrons T_e est très grande devant celle de gaz T_g (**Figure I.2**) qui reste assez proche de la température ambiante, il y a également une température des ions qui peut être assez grande par rapport à celle du gaz surtout à basse pression ainsi qu'une température propre aux états excitées notamment les états vibrationnels qui sont un réservoir d'énergie souvent à l'origine de la dynamique du gaz provoquée au sein de ces plasmas froids non-thermiques. $T_e >> T_n$ et $T_e > T_i > T_n$.

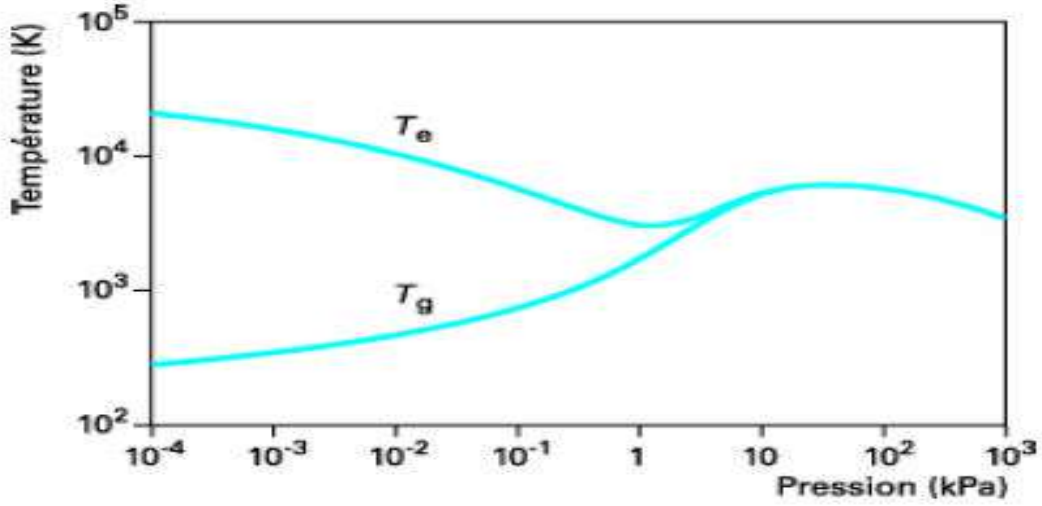


Figure I. 2 Evolutions avec la pression de la température du gaz et des électrons à courant constant [6]

I.3.2 Plasmas thermiques

Les plasmas produit dans les arcs électriques ou dans des étincelles et des flammes se trouvent dans un état très proche de l'équilibre thermodynamique local, on peut l'appelé aussi les plasmas thermiques. Le gaz est chauffé à une température suffisamment élevée pour une ionisation partielle ou complète. Les espèces présentes sont alors en équilibre thermique les unes avec les autres [3], telles que : $T_e \sim T_i \sim T_n$ Les plasmas thermiques sont caractérisés par une seule température de gaz Tg, les autres températures des électrons Te, des ions Ti et des neutres T_n étant proches, voire égale à celle de gaz.

I.3.3 Plasmas chauds

Les plasmas de fusion thermonucléaire sont totalement ionisés, formé uniquement d'ions et d'électrons dont la température peut atteindre plusieurs dizaines de millions de degrés. Ils peuvent atteindre un état très proche de l'équilibre thermodynamique local, les plasmas utilisés dans les réacteurs à fusion sont du type thermique. L'un des désavantages des plasmas thermiques est leur caractère destructif par leur température élevée au contact des matériaux [2].

Ce plasma se caractérise par le comportement collectif de ses composantes électriquement chargées, sous l'effet des forces d'interaction coulombiennes à longue portée. Ces phénomènes collectifs se traduisent notamment par l'apparition de comportements électrostatiques oscillatoires et instables. Par exemple, les plasmas magnétisés comme ceux que l'on trouve largement dans l'univers ou que l'on crée dans les expériences de fusion magnétique [4]. Et pour les plasmas chauds de laboratoire on peut parler aussi sur les tokamaks, le confinement du plasma est obtenu par de forts champs magnétiques dont les lignes de courant s'entourent sur un tore [5].

I.4 approfondissement sur les plasmas thermiques

Les plasmas thermiques sont en général en équilibre thermodynamique complet ou local. L'état d'équilibre thermodynamique est vérifié lorsque le nombre de collisions est assez important et lorsque chaque processus qui se produit dans le plasma est équilibré par son processus inverse. Si le gaz est à haute pression (voisine ou supérieure à la pression

atmosphérique), il est assez fortement ionisé bien qu'il subsiste des atomes et des molécules neutres et les collisions entre toutes les particules qui le composent sont nombreuses, ce qui tend à homogénéiser la température des électrons, ions et neutres à un niveau de l'ordre de $5x10^3$ à $5x10^4$ °K (l'énergie cinétique est bien répartie entre toutes les particules et la température est dite unique)[7]. Les plasmas thermiques peuvent être créés par une décharge continue (arc), par une décharge à haute fréquence ou par laser. Ils peuvent également être créés par onde de choc à une pression suffisamment élevée pour que la fréquence des collisions conduise à l'équipartition de l'énergie entre les diverses sortes de particules qui le composent [8]. Les plasmas thermiques dont la puissance varie de quelques kilowatts à quelques mégawatts nécessitent la mise en jeu de courants importants et des pressions au dessus de 10 Torrs comme l'indique la **figure (I.2)** [9], [10], [11].

I-5 Notions fondamentales sur les plasmas thermiques

il existe plusieurs paramètres caractérisant le plasma notamment : degré d'ionisation la température des espèces, la viscosité, la densité, la pression et la concentration. [12].

I.5.1 Degré d'ionisation d'un plasma

Le degré d'ionisation d'un plasma est un paramètre fondamental :

$$\alpha_i = \frac{n_e}{n_e + n_N} \qquad \text{(I.1)}$$

Où n_e et n_N sont respectivement les densités électronique et de neutres, si $\alpha << 1$ alors le plasma sera dit «faiblement ionisé» et si $\alpha \approx 1$ alors il est dit «fortement» ionisé. Le degré d'ionisation peut varier de $10^{-7} – 10^{-4}$ pour les milieux faiblement ionisés, à $10^1 – 10^2$ pour les plasmas fortement ionisés. Pour les plasmas de décharge, il est compris entre 10^4 et 10^{-2}.

1.5.2 Température des espèces

En distinguant deux températures T_e et T_i différentes caractérisent le plasma [13, 14], la première est celle des électrons et la deuxième celle des espèces lourdes (ions). Les électrons, particules très légères par rapport aux ions et aux neutres, sont fortement accélérés par les champs électriques et/ou magnétiques et jouent un rôle tout particulier.

1.5.3 Pression

La description des plasmas s'inspire de la physique des gaz et de la mécanique des fluides, et utilise des grandeurs macroscopiques. La figure suivante représente l'effet de la pression sur un type de plasma. [15]

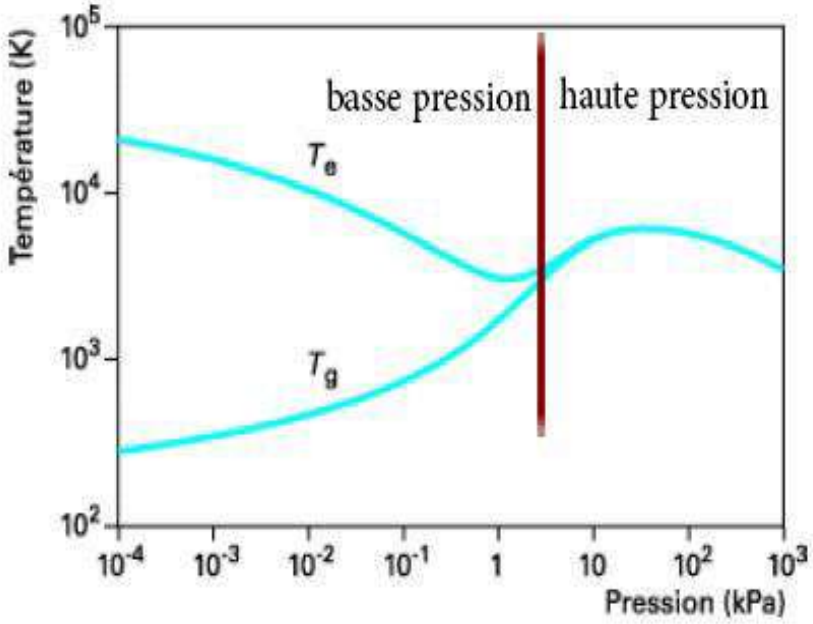


Figure I. 3 :l'effet de pression sur les particules de plasma thermique

I.5.4 Densité

La densité **n** est définie comme le nombre de particules par unité de volume, et ce pour chaque espèce (électrons, ions, neutres). La neutralité du plasma implique $\mathbf{n_e = n_p}$, en supposant que la densité d'ions négatifs est quasiment nulle [16].

I.5.5 Viscosité

Peut être définie comme l'ensemble des phénomènes de résistance à l'écoulement se qui fait apparaitre un gradient de vitesse dans le milieu plasma la figure montre la viscosité d'un plasma argon-hydrogène s'élever avec la température et montre un maximum correspondant à la température d'ionisation du gaz plasmagène.

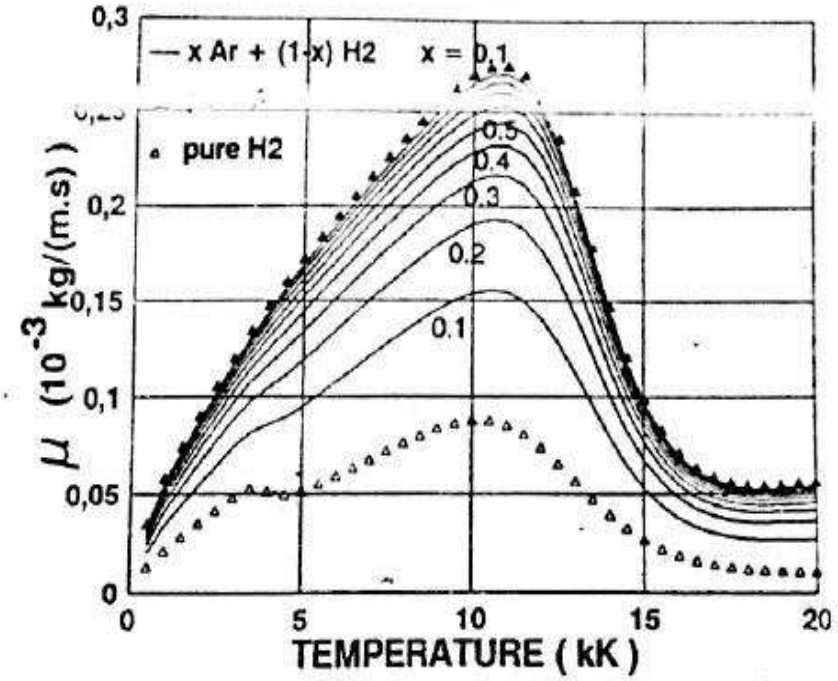


Figure I. 4: Viscosité de plasma Ar et Ar-H2 a la pression atmosphérique [17]

I.5.6 Chaleur spécifique

la Figure I.6 est présentée l'évolution de la chaleur spécifique de quelque gaz plasmagène en fonction de la température. L'analyse de cette figure montre que la chaleur spécifique est constante pour les gaz plasmagène argon et hélium jusqu'à des températures proches de 14000 °K. En revanche la chaleur spécifique de l'hydrogène est très sensible à la température. En effet on note dans la figure l'existence de deux pics, le premier à 4000 °K, correspond à la dissociation de l'hydrogène moléculaire et le second à 15000°K, correspond à l'ionisation des atomes.

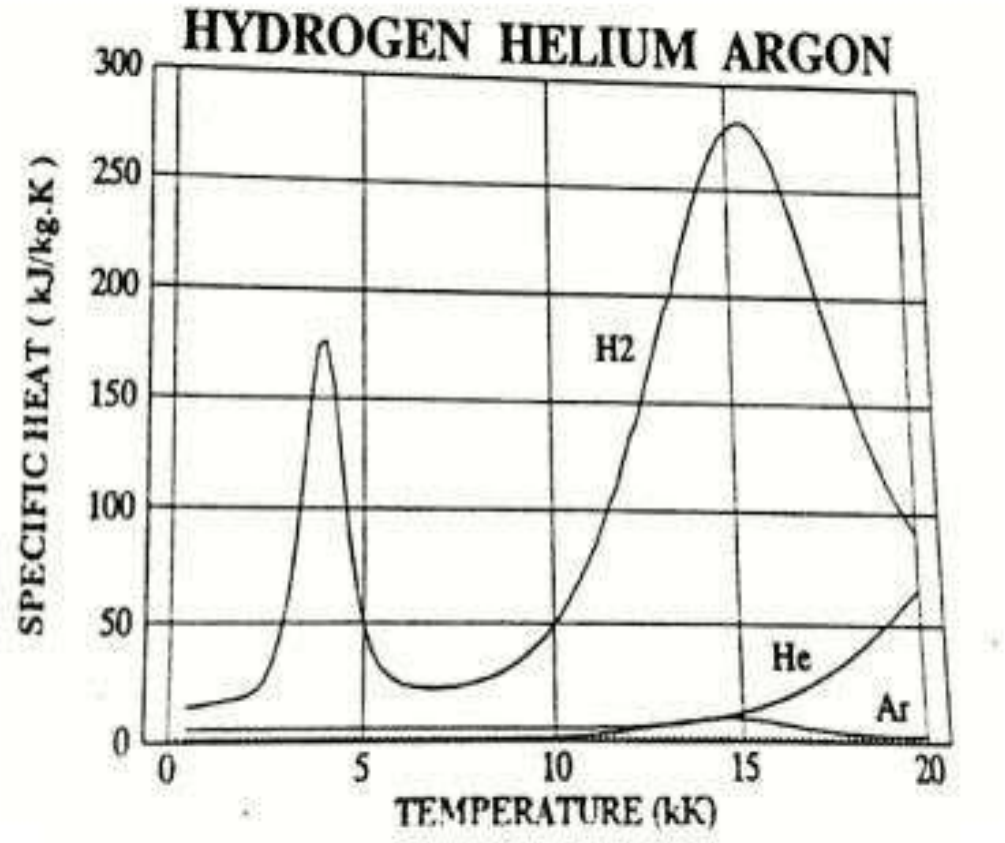


Figure I. 5 : Capacité calorifique de plasma d'argon, d'hydrogène et d'hélium en fonction de la température p= 1atm [17]

I.6 Techniques de production des plasmas thermiques

La génération des plasmas thermiques se fait par le passage d'un courant électrique dans un volume gazeux [19], deux grandes techniques existantes pour produire les plasmas thermiques a la pression atmosphérique ou a son voisinage : les arcs à courant continu (DC en anglais direct current) soit soufflés soit transférés ou les torches radiofréquence RF [20].nous allons intéresser aux torches à courant continu

I.6.1 Torches à arcs soufflés

Les torches à arc soufflé présentent une gamme de puissance allant de 0.5 kW à 8 MW, elles sont surtout utilisées pour les opérations de traitement de surfaces. Les torches à arc soufflé comportent 3 éléments essentiels : la cathode, l'anode, qui sert en général de tuyère et la chambre d'injection des gaz. Le schéma de ce type de torche est présenté sur la figureI.6

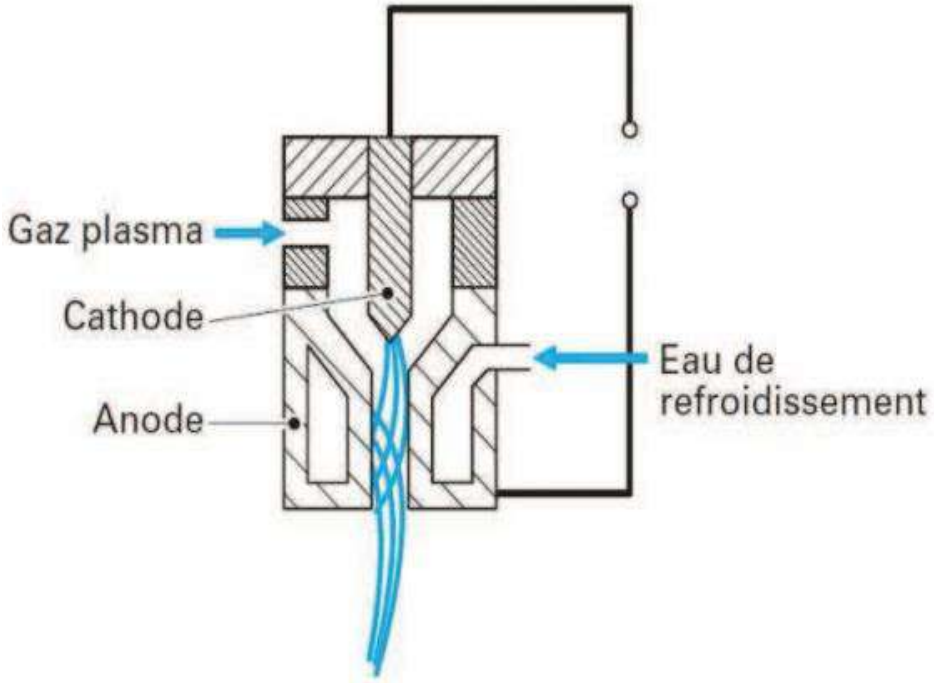


Figure I. 6: Schéma d'une torche à arc soufflé [21]

I.6.2 torche à arc libre

Les torches à arc libre comportent 3 éléments essentiels : la cathode, l'anode et la buse. Le schéma de ce type de torche est présenté sur la figureI.7. Ce type de torche est appelé communément en industrie TIG (Tungstène Inert Gas). Il est utilisé pour le soudage de pièces métalliques. La buse, dans la majorité des cas est en céramique, a pour objectif de gainer le gaz plasmagène.

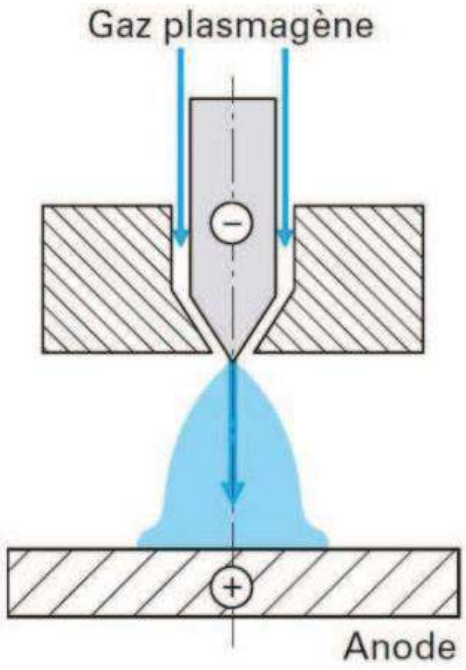


Figure I. 7 : Schéma d'un arc libre [21]

I.7 Méthodes de mesure de la température d'un jet de plasma

Les mesures de températures en plasma thermique sont difficiles.il ya plusieurs technique utilisé pour mesurer la température dans un jet de plasma [22], et elles peuvent être classées on deux catégories :

- Techniques intrusives
- Technique optique (non intrusives)

I.7.1 Techniques intrusives

Utilisent une sonde (électrostatique ou d'enthalpie) placée localement dans un jet plasma, le point négative de ces mesures est que l'emploie de la sonde perturbe l'écoulement, les sondes électrostatiques permet de mesurer la température et la densité volumique des électrons, T_e et n_e (sonde de Langmuir), ou encore le nombre de Mach (sonde de Mach) du plasma [23]

Les sondes d'enthalpie permettent quant à elles d'obtenir l'enthalpie et la vitesse locales d'un écoulement de plasma. Lorsqu'elles sont couplées à un spectromètre de masse, elles permettent même d'identifier la composition du plasma.

I.7.1.1 Les thermocouples :

Les thermocouples sont très souvent utilisés pour mesurer les températures de plasma thermique. Le principe consiste à introduire le couple dans le plasma ayant une température T. Au contact avec le gaz chaud le couple s'échauffe et prend une température Tc. Le couple délivre un courant proportionnel à Tc. La technique consiste à lier Tc à T (la température de plasma) en effectuant un bilan thermique autour du couple. Il est à noter qu'il faut choisir le matériau constituant le thermocouple qui résiste aux conditions chimiques et thermiques de l'écoulement. Le tableau II.1 donne un aperçu des thermocouples les plus employés dans les plasmas thermiques [24]

Tableau II.1- Propriétés des thermocouples pour les hautes températures [24].

Matériaux de la soudure chaude	T_{max}(K)	Environnement chimique adapté	Commentaires
Platine-6 % rhodium Platine-30 % rhodium	2050	Oxydant réducteur	Solide Stable
Iridium Iridium-40 % Rhodium	2250	Inerte Oxydant (courte périodes)	Cassant en atmosphère réductrice Gross taille
Iridium Tungstène	2550	Neutre	Cassant en atmosphère réductrice
Tungstène Tungstène-26%rhénium	3050	Neutre réducteur	Inutilisable en atmosphère oxydante

Tungstène-5% rhénium Tungstène-26% rhénium	3050	Neutre Hydrogène	Inutilisable en atmosphère oxydante

I.7.1.2 Les sondes enthalpiques

Les sondes enthalpique ont été utilisées pour les mesures des températures des plasmas thermiques entre 2000 et 10000° K. Leurs principe de fonctionnement consiste à aspirer le gaz et le refroidir au moyen d'un réfrigérant, généralement de l'eau. La sonde enthalpique se comporte dans ces conditions comme étant un échangeur de chaleur. En effectuant un bilan thermique entre les deux fluides (gaz chaud et eau de refroidissement) on peut accéder à l'enthalpie du gaz plasma à l'entrée de la sonde. Un analyseur associe à la sonde permet d'évaluer la composition du plasma aspiré. Cette analyse conduit à la détermination de la capacité thermique du mélange gazeux et en déduire la température du plasma thermique. [25]

I.7.2 techniques non-intrusives :

Les techniques optiques ont l'avantage de ne pas perturber l'écoulement plasma. Cependant, elles sont de façon générale beaucoup plus lourdes à mettre en œuvre, autant au niveau de l'équipement requis que de l'analyse des mesures recueillies. Ainsi, plusieurs hypothèses et calculs sont nécessaires afin de passer d'une mesure d'intensité de rayonnement à une valeur caractérisant le plasma, comme une température ou une densité volumique [26].

Les techniques optiques passives : sont la spectroscopique d'émission (OES, *Optical Emission Spectroscopy*) [27] et la spectroscopie d'absorption [28], qui demandent de capter une certaine partie de l'énergie émise par le plasma. La caractérisation du rayonnement recueilli permet alors d'obtenir différentes températures du plasma et la densité électronique (OES), ou de quantifier l'état fondamental d'un atome ainsi que divers états métastables (spectroscopie d'absorption).

Techniques optiques actives : ont pour objectif d'exciter puis d'observer des atomes et/ou des molécules spécifiques du plasma par une source laser. La spectroscopie au laser comprend plusieurs techniques, comme (Laser Induced Fluorescence) (LIF) [29], (*Coherent Anti-Raman Spectroscopy*)(CARS) ou (Laser Doppler Anemometry) (LDA) [30], qui ont l'avantage de ne

pas invoquer l'hypothèse du LTE. Le LIF et le CARS permettent de quantifier les populations d'atomes (état fondamental, états métastables, niveau énergétique distinct) alors que le LDA utilise l'effet Doppler pour obtenir la vitesse de l'écoulement.

I.7.2.1 les méthodes basées sur la diffusion laser

Deux techniques sont particulièrement utilisées : la diffusion Rayleigh Thomson et la technique du CARS : Coherent Anti-Stockes Raman Spectroscopy. Ces techniques sont chères à mettre en place et nécessitent des modèles complexes pour interpréter les données.

I.7.2.2 les méthodes optiques basées sur l'indice de réfraction du plasma :

Ces méthodes sont utilisées sur des plasmas dont la température est comprise entre la température ambiante et 4500 K. Plusieurs techniques existent :

I.7.2.2.1l'interférométrie

Permet de mesurer l'indice de réfraction d'un milieu en étudiant la différence de chemin optique de faisceaux lumineux provenant d'un laser. L'un est appelé faisceau sonde car il traverse le milieu à étudier et l'autre est appelé faisceau référence. À partir de l'indice de réfraction il est possible de déterminer la température du plasma [31].

I.7.2.2.2 l'ombrosocopie

Est une technique simple qui consiste à éclairer par un faisceau lumineux un milieu présentant des gradients d'indices de réfraction causés par des gradients thermiques et à observer le résultat sur un écran. Le principe de l'ombroscopie repose sur une modification de la répartition de l'éclairement sur l'écran, modification provoquée par la convergence ou la divergence des faisceaux de lumière. L'intensité lumineuse recueillie sur l'écran sera d'autant plus importante que les gradients d'indice seront élevés [32]. Cette technique de mesure donne uniquement des résultats qualitatifs.

I.7.2.2.3 la strioscopie

Est similaire en tout point à celle de l'ombroscopie. Cependant, plutôt que de s'intéresser à l'intensité lumineuse relative, la technique consiste à porter son attention sur l'angle de déflection des rayons lumineux ayant traversé un milieu contenant un gradient d'indice. À partir de la déviation des rayons lumineux, il est possible d'accéder à la température du milieu étudié [33].

I.7.2.3 la spectroscopie optique d'émission

Cette technique, basée sur l'émission lumineuse des éléments constituants le plasma a l'avantage d'être non intrusive et de pouvoir être utilisée pour mesurer la température d'un plasma sur de larges gammes.

I.8 Applications des plasmas

Les plasmas sont impliqués dans des applications industrielles qui n'ont cessé de se multiplier et de se diversifier touchant notamment la micro-optoélectronique, la métallurgie, la sidérurgie, l'automobile, l'aéronautique, l'emballage et l'industrie textile et en métallurgie dans le cas de la projection plasma pour le revêtement des surfaces des matériaux et aussi dans l'environnement pour le traitement des déchets solides ou gazeux qui sont nuisibles à l'environnement.

I.8.1 Projection thermique :

C'est un procédé qui modifie les caractéristiques d'une surface en y projetant un matériau qui la recouvre en formant un dépôt. Le but de cette opération est habituellement de marier des matériaux dissimilaires afin d'obtenir un de l'érosion ou de l'abrasion ensemble plus résistant face aux effets néfastes de la chaleur, de la corrosion, de la friction, Cependant, la projection thermique permet également de restaurer des surfaces endommagées, d'en modifier les propriétés électriques, optiques et magnétiques, d'obtenir des implants biocompatibles ou encore des membranes céramiques pour la filtration osmotique et 1'ultrafiltration [34].

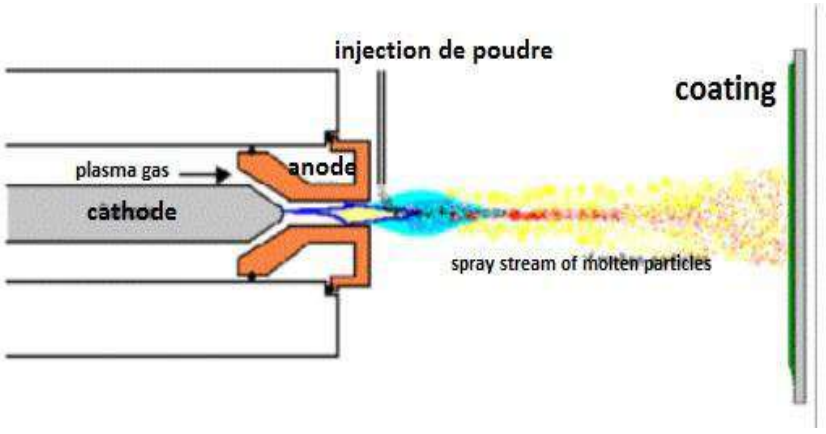


Figure I. 8: Principe de la projection plasma [35]

I.8.2Traitement des polluants gazeux :

La pollution atmosphérique est un phénomène qui inquiète les scientifiques depuis quelques décennies. Les principales conséquences de la pollution en basse atmosphère sont l'acidification des eaux de pluie (due à certains composés chimiques tels que SO2, NO, NO2, NH3), l'eutrophisation (perturbation de l'équilibre biologique des sols et des eaux due à un excès d'azote), la pollution photochimique et l'effet de serre. Pour traiter l'air, on a plusieurs méthodes :

-Ajout de fragrances dans l'air

- Traitement chimique de l'air

-Traitement des polluants par plasmas froids

I.8.3 Métallurgie

La soudure à l'arc : La soudure à l'arc est actuellement très utilisée dans le domaine de la métallurgie [34]. Un arc électrique, établi entre une électrode et les pièces métalliques à souder, génère un plasma de très haute température pour fusionner et unifier les pièces à souder, on distingue plusieurs variantes de la soudure à l'arc pouvant être classées en deux catégories :

I.8.3.1la première catégorie

regroupe les soudures avec des électrodes enrobées connues aussi sous le nom de SMAW (Shielded Metal Arc Welding) ou MMA (Manual Metal Arc)(FigI.9).

I.8.3.2 la deuxième catégorie

Comprend les soudures avec des électrodes non fusibles comme le procédé TIG (Tungstène Inert Gas), illustré sur la figure I.10, et le PAW (Plasma Arc Welding)

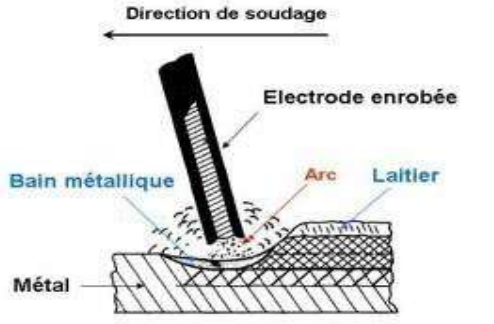


Figure I. 9 : soudure MMA

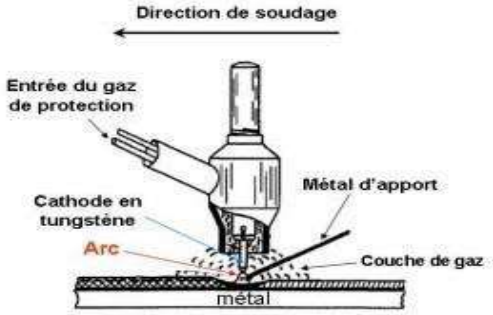


Figure I. 10 : soudure TIG

I.8.4 Découpe à l'arc

La découpe par plasma est surtout utilisée dans l'industrie métallurgique comme la fabrication de pièces pour l'automobile, l'aéronautique ou les matériaux de construction. Elle permet de découper des pièces pouvant atteindre 70 mm d'épaisseur avec une précision de l'ordre de 0.2 mm et une saignée très fine. La découpe par plasma représente un compromis entre la qualité, la productivité et le coût d'opération ce qui le rend très compétitif par rapport aux autres techniques de coupage thermique (oxycoupage, découpe par laser) [36]. Ce procédé consiste à produire une fusion localisée sur la zone à découper au moyen d'un plasma d'arc 3 électrique. La partie fondue est ensuite chassée de la pièce par le soufflage du jet de plasma confiné, la figure I.11 illustre le principe général d'une découpe à l'arc électrique.

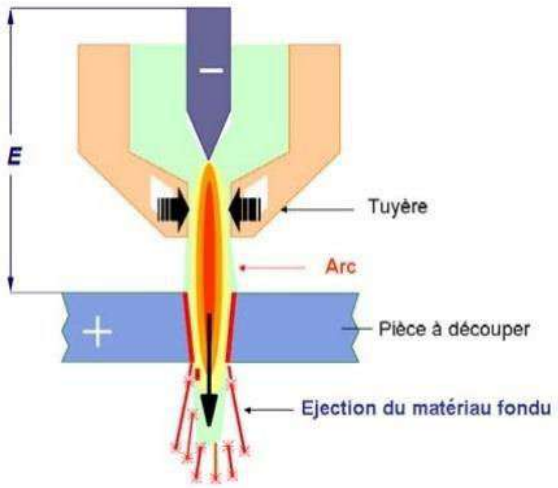


Figure I. 11 : Découpe à l'arc électrique. [36]

I.9 Fonctionnement de torche DC

La torche DC, illustrée à la figure I.13, est la torche plasma la plus utilisée en industrie. Introduite vers la fin des années 1950 [37], c'est encore aujourd'hui le point de départ du développement de plusieurs nouveaux procèdes en projection plasma [38]. Elle se compose de deux électrodes concentriques entre lesquelles est force un écoulement de gaz. Le design

de la torche DC, et particulièrement la forme de 1'anode-tuyère, occasionne des vitesses élevées du plasma expulse formant un jet relativement peu volumineux. Dans une torche DC conventionnelle, l'électrode centrale est la cathode, habituellement faite de tungstène thorié, alors que l'anode qui l'entoure est en cuivre électrolytique. Toutes deux sont refroidies a l'eau pressurisée afin d'éviter leur destruction lors de l'opération de la torche. En effet, l'arc électrique maintenu entre les électrodes par l'application d'une différence de potentiel peut atteindre des températures avoisinant les 30000 K au point d'attachement de l'arc sur la pointe de la cathode; le flux thermique qui en résulte est très important. Cet arc électrique maintenu entre les électrodes concentriques est spatialement et temporellement instable : les phénomènes physiques qui s'y rattachent sont donné tridimensionnels et instationnaires [39].

Le gaz souffle dans la torche allonge l'arc et en modifie les caractéristiques électromagnétiques, allant jusqu'a l'éteindre. Mais puisque le gaz ionise entre les électrodes est un bon conducteur d'électricité et que la puissance électrique est appliquée en continu, un nouvel arc est presqu'instantanément réamorce. Le mouvement de l'arc permet de maintenir l'intégrité physique de l'anode et est généralement accru de façon volontaire par une injection tangentielle (swirl). Le processus répétitif d'amorçage-extinction de l'arc dans la torche occasionne des fluctuations temporelles de la puissance électrique transmise au plasma, ce qui se répercute par une inhomogénéité des champs de concentration, de vitesse et de température de celui-ci.

II existe trois modes d'opération de la torche DC, nommes respectivement (steady, takeover et restrike en anglais) [40]. Le passage d'un mode à l'autre se fait, pour l'ordre dans lequel ils sont présents, par la diminution du courant de l'arc ou par l'augmentation du débit de gaz. Le premier mode (steady) est a éviter parce que l'érosion de l'anode y est trop rapide. Le second mode (takeover) présente des fluctuations régulières d'intensité moyenne; c'est le mode d'opération le plus utilise. Le dernier mode (restrike) est caractérisé par de grandes oscillations irrégulières des variables du plasma.

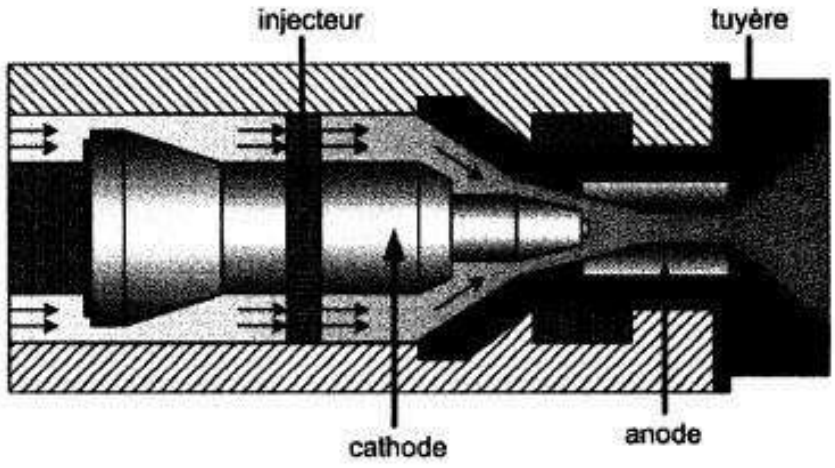


Figure I. 12 : vue en coupe d'une torche à plasma courant continu(DC)

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur les plasmas, leurs types et leurs propriétés et nous avons cité la technologie de plasma .Aussi, nous avons cité quelques techniques pour produire un plasma thermique dans les arcs électriques et enfin nous avons présenté quelques applications de plasma. Dans ce qui suit une description analytique et simulation numérique est fête sur un jet d'argon déchargeant dans l'air.

Chapitre II :

Description et simulation d'un jet de plasma thermique

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu la description des jets issue d'une buse et déchargeant dans l'atmosphère et ce pour comprendre leur structure et visualiser la variation spatial et de la vitesse et de la température du fluide le long du jet. Dans la deuxième partie nous exposons les équations analytiques et numériques gouvernants les phénomènes de transports des jets de plasma thermique. Dans la dernière partie, on cite quelques travaux expérimentales de la littérature relative à la mesure de la température dans les jets de plasmas thermique déchargeant dans l'air ambiant. Ces données vont être exploitées pour la validation de la simulation numérique que nous avons mis œuvre en utilisant le logiciel de calcul ANSYS.

II.2 Description du jet

Sur la base des études expérimentales préalablement décrites dans la littérature [45] les jets déchargeant dans l'air sont composés de deux régions distinctes comme le montre la Figure II.1:

- En sortie de la buse, la température et la vitesse du jet sont constantes. Cette région est appelé le cœur du jet, le rayon extérieur de cette région diminue lorsque on s'éloigne de la buse est au-delà de ce rayon ri les propriétés du jet ne son plus constantes.

- Just après apparait la région développée dans laquelle la vitesse et la température varient axialement et radialement le long du jet.

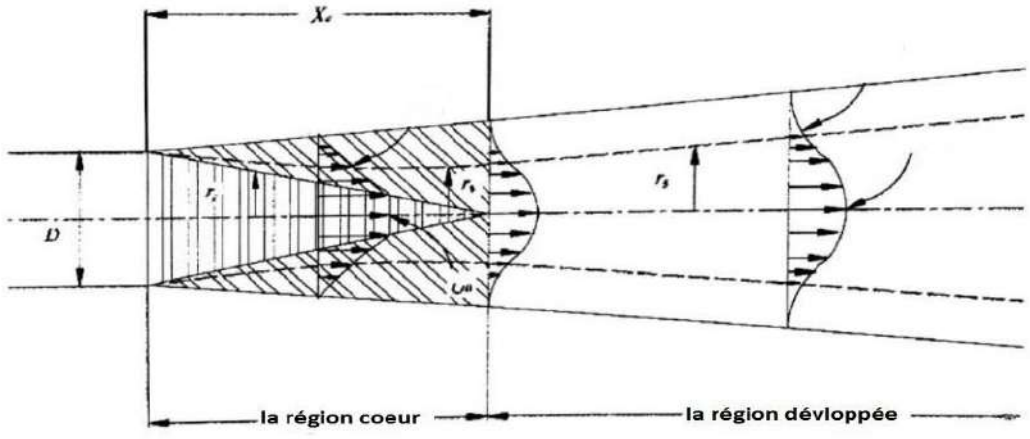


Figure II. 1 : Structure d'un jet [46]

Sur la Figure II.2 et Figure II.3 nous avons présenté les résultats de la simulation en 2D réalisé avec l'logiciel d'ANSYS CFX R15.0 d'un jet de plasma Ar déchargeant dans l'air ambiant. Ces figures illustre l'évolution spatial de la température et de la vitesse du jet de plasma le long du jet dans laquelle on voie l'existence de deux régions la région Cœur (en rouge) ou la température et la vitesse est de l'ordre de T_0=5431.963 K et U_0=239.893 m/s la région développée (en rouge et bleu dégradé) où la température et la vitesse varie le long du jet jusque atteignent T=299.004K et U=145.008 m/s pour des conditions opératoire imposées (D: 8 mm diamètre de la buse, Q_{Ar}: 40 l/min débit d'argon et P:3000w Puissance effective fournie à la torche)

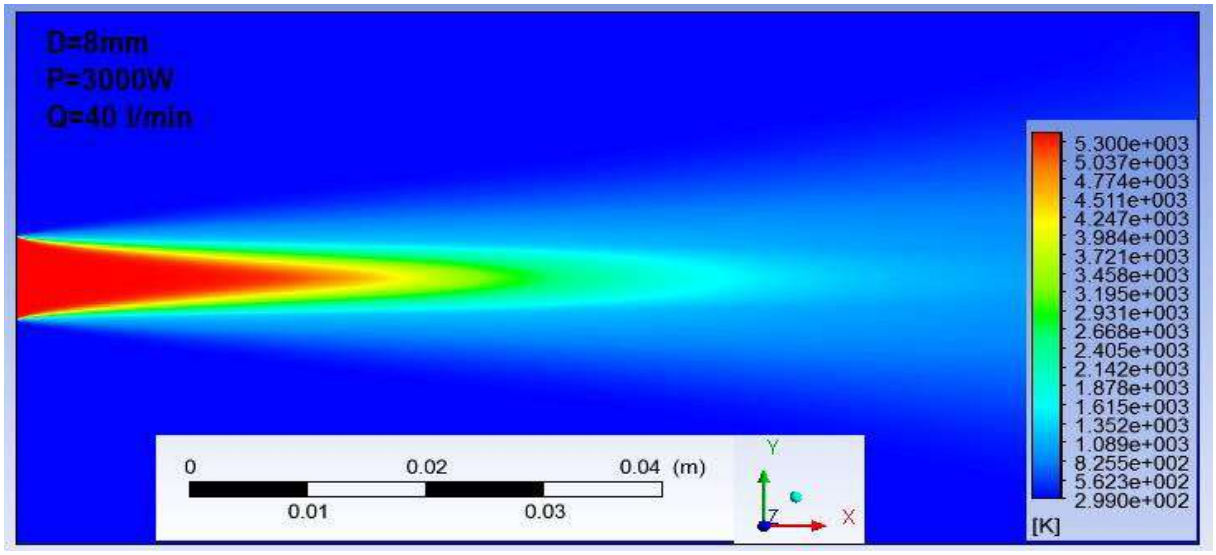


Figure II. 2 : profil de température du jet déchargeant dans l'air (D=8 mm, Q_{Ar} =40 l/mn P= 3000 Watts)

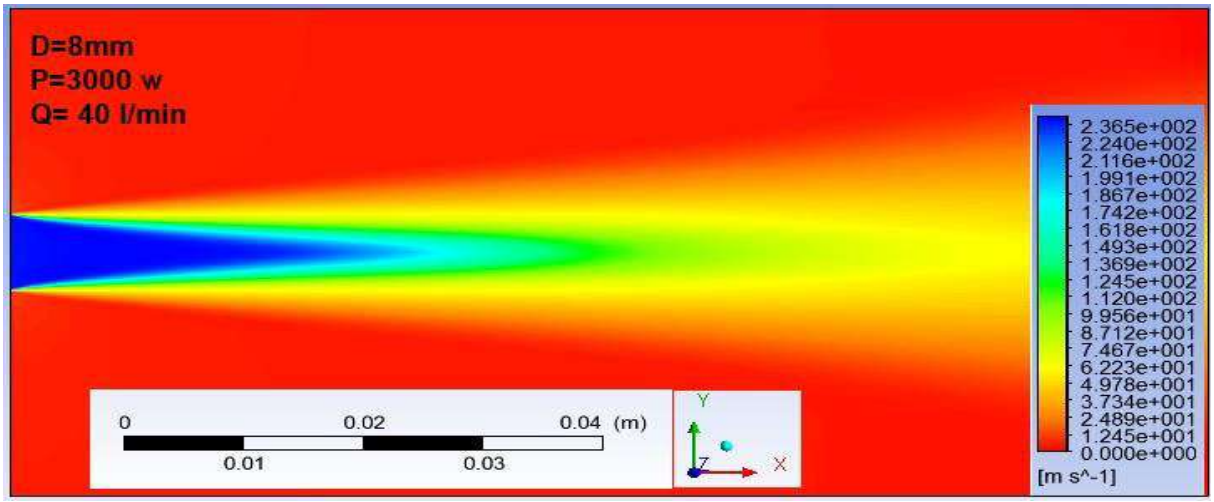


Figure II. 3 : profile de vitesse du jet déchargeant dans l'air (d= 8 mm, Q_{Ar}=40 l/min, P=3000w)

II.3 Modélisation du jet de plasma thermique.

Comme nous l'avons déjà signalé dans le chapitre précédent il existe plusieurs techniques expérimentales pour la mesure de la température du plasma thermique et chacune d'elle présente des avantages et des inconvenants; par exemple les techniques optiques sont utilisées dans des plages de température très élevée alors que les techniques intrusive telles que les thermocouples et sondes enthapiques sont utilisées dans les zones de plasma thermique moins chaud. Cependant pour explorer toute la zone du jet il est demandé de combiner plusieurs méthodes qui de point de vu technique sont beaucoup plus lourdes à mettre en œuvre, autant au niveau de l'équipement requis que de l'analyse des mesures recueillies qui du point économique sont très couteuse. C'est pourquoi le recours à la modélisation mathématique des jets est très sollicité et présente un avantage économique et pratique (on peut avoir des informations sur le jet dans des zones qu'on ne peut pas accéder expérimentalement).

II.3 Modèle analytique d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air

WARREN et CROCCO proposent suit à ce que nous avons présenté sur la structure du jet (figure II.1) des expressions pour estimé la vitesse et la température local dans un jet plasma [46] :

II.3.1 expressions de la vitesse

Warren propose deux profiles de vitesses respectivement pour la région cœur et la région développer

- Pour la région cœur : $\overline{u} = \overline{u}_0 e^{-\lambda\left(\frac{r^2-r_i^2}{r_5^2-r_i^2}\right)}$ (II.1)
- Pour la région développée : $\overline{u}=\overline{u}_c e^{-\lambda\left(\frac{r}{r_5}\right)^2}$ (II.2)

Avec

U_0 : Vitesse du jet à la buse (sortie du jet)

r_i : le rayon du cœur.

r_5 : le rayon où la vitesse u est la moitié de sa valeur sur l'axe du jet.

$\lambda=\ln 2$.

II.3.2 Expression de la température du jet

L'application du théorème de CROCCO est utilisée pour déterminer la température du jet. Ce théorème est déduit des équations de la couche limite qui stipule que pour un écoulement bidimensionnel et des nombre de PRANDTL et SCHMIDT proches de un l'enthalpie h et la vitesse U des gaz vérifient les relations suivantes :

- $h + \frac{U^2}{2} = A.U + B$ (II.3)

- $X + \mathrm{C}.U = \mathrm{D}$ (II.4)

Avec :

X : fraction d'un constituant de l'écoulement (air ou argon)

A, B, C et D : constantes déduites des conditions aux limites. (Z=0 à la buse et Z=∞ loin de la buse).

La température du gaz est déduite de l'enthalpie

Ce modèle a été présenté et utilisé dans les jets froids par Donaldson et appliqué sur les jets de plasma d'argon par Brahimi [47].

II.4 Modélisation de l'écoulement du jet de plasma :

Les jets de plasma thermique est un fluide très complexe qui fait apparaître une multitude des phénomènes physiques. Il est donc nécessaire d'effectuer de nombreuses simplifications tant au niveau de la géométrie du problème que des phénomènes physiques, et ces difficultés pousse plusieurs chercheurs à modéliser mathématiquement les écoulements de plasma afin d'obtenir des informations sur leur propriétés et caractéristiques thermo-physiques de l'écoulement. Les équations de la convection en régime turbulent appliquée au jet de plasma thermique déchargeant dans l'air ambiant sont très complexes. En effet, elle englobe l'équation de continuité, les équations de Navier Stokes, les équations de la conservation des espèces chimiques et l'équation de la conservation de l'énergie, et l'expérimentation sur les plasmas coutant cher, et du fait de la complexité des problèmes rencontrés dans la physique des plasmas, car la plage de la température est très étendue, par exemple comme pour le cas de plasma Ar (voir figure II.2) de T= 299K jusqu'à T=12190K,

il est indispensable de modéliser et simuler les jet de plasma thermique par utilisation du code de calcul ANSYS que nous disposons au niveau de l'université.

II.4.1Hypothèses

- L'écoulement plasma est turbulent et les échauffements visqueux négligeables
- Le régime est stationnaire
- Le plasma est à l'équilibre thermodynamique local : modèle à une seule température
- Le plasma considéré est un plasma d'argon pur

II.4.2 Formulation mathématique du jet de plasma, équations de conservation [48]

L'entourage plasmagène est modélisé en résolvant les différentes lois de conservation qui caractérisent l'écoulement à savoir : conservation de l'énergie, conservation de la masse, conservation de la quantité de mouvement, et enfin les équations de Maxwell pour l'électromagnétisme. Ces dernières lois s'expriment de la façon suivante :

- Conservation de l'énergie :

$$\rho.\overrightarrow{V}.\overrightarrow{grad}\hat{h} = -div(\vec{q}_{cond}) - div(\vec{q}_{ray}) + div(\overrightarrow{\bar{\bar{\tau}}.V}) + Q_{em} \qquad (II.5)$$

Cette équation résume les types de transfert de chaleur existences dans le plasma (conduction, convection, rayonnement). L'apport d'énergie par effet joule, Q_{em}, est exprimé en fonction du champ électrique par la relation suivante :

$$Q_{em} = \vec{J}_{él}.\vec{E} = \sigma.E^2 \qquad (II.6)$$

- Conservation de mass :

$$\text{div } \rho\vec{V} = 0 \qquad (II.7)$$

- Conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho.\overrightarrow{V}.\overrightarrow{\overrightarrow{grad}\vec{V}} = \overrightarrow{div}\bar{\bar{\tau}} - \overrightarrow{grad}P + \vec{F}_{em}+\rho.\vec{g} \qquad \text{(II.8)}$$

Ces deux dernières équations concernent les caractéristiques hydrodynamiques de l'écoulement plasma.

Équations de Maxwell :

$$\Delta\vec{A} = \mu_0.\sigma.\left(\frac{\delta\vec{A}}{\delta t}\right) \qquad \text{II.9)}$$

Cette relation prend en compte les forces électromagnétiques présentes dans la décharge. Par ailleurs, le champ électromagnétique fait apparaître des forces de Lorentz, responsables d'un apport de quantité de mouvement, qui sont exprimées par l'équation suivante :

$$\vec{F}_{em}=\mu_0.j_{em}\wedge\vec{H} \qquad \text{(II.10)}$$

$\vec{V}$: Masse volumique (kg.m^{-3})

τ: Tenseur de contrainte de cisaillement (N.m^{-2})

P: Pression statique (Pa)

F_{em}: Force de Lorentz (N.m^{-3})

$\hat{h}$: Enthalpie ($d\hat{h}=C_p dt$)

Q_{em}: Chaleur fournie par effet Joule (J)

$\vec{A}$: Vecteur potentiel (T.m)

μ_0: Perméabilité électrique ($\mu_0=4\pi.10^{-7}$ H.m^{-1})

σ: Conductivité électrique ($\Omega.^{-1}$m^{-1})

E: champ électrique (V.m^{-1})

$\vec{H}$: Champ électromagnétique (T)

II.4.3 Turbulence

Turbulence est synonyme d'agitation, désordre, chaos. L'évolution spatiale ou temporelle de nombreux phénomènes est caractérisée par une absence apparente d'ordre [**49**], l'écoulement peut être turbulent si les effets inertiels sont assez grands par rapport aux effets visqueux, veut dire que la vitesse instantanée est fluctuante en tout point dans l'espace d'écoulement, alors la vitesse est exprimée en termes de valeur moyenne et une composante fluctuante :

$$V_x = \overline{V}_x + V'_x \qquad \text{(II.11)}$$

$\overline{V}_x$: Composante moyenne de la vitesse dans la direction x

V'_x: Fluctuant composante de vitesse dans la direction

Au cours de l'étude, on peut utiliser divers modèles de turbulence.

- Modèle Standard k-ε

- Modèle Standard k-ω
- Zero Equation Model
- SST - (Shear Stress Transport Model)

Nous avons employé le modèle de SST où est un nouveau modèle, qui comporte un avantage certain en ayant les avantages de k-oméga en proche paroi et de K-epsilon loin du corps mais qui n'a pas la même notoriété que k-oméga. Il comporte également un terme supplémentaire de diffusion dans l'équation de transport de la dissipation pour que la prédiction dans les zones transitoires (à la fois prêt de la paroi et dans la zone 'far-field') soit bonne.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+G_k-Y_k+S_k \qquad \text{(II.11)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho \omega u_j\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right)+G_\omega-Y_\omega+D_\omega+S_\omega \qquad \text{(II.12)}$$

Avec :
G : terme de production.
Γ : terme de diffusivité
Y : terme de dissipation.
S : terme source.

II.5 Travaux antérieurs

Les travaux existants dans la littérature concernant la détermination de la température locale des jets de plasma thermiques, par voie expérimentale ou par modélisation, des jets de plasma thermique déchargeant dans l'air ambiant sont nombreux mais celles qui explorent tout le jet en fonction des conditions opératoires différentes sont rares. Parmi ces travaux nous retenons les plus importantes pour notre travail :

A. Brahimi [50] a appliqué le modèle analytique développé par Donaldson pour la détermination spatial de la température et de la vitesse du jet de plasma d'argon déchargeant

dans l'air ambiant. Ce modèle se base sur deux paramètres K et n qui désigne respectivement le taux de mélange du gaz chaud (plasma) avec l'air ambiant et le profil de vitesse à de l'écoulement du gaz chaud (plasma) à la sortie de la buse. Il a étudié l'effet des conditions opératoires (du diamètre de la buse, le débit du gaz plasmagène et la puissance électrique) sur l'évolution spatiale de la température, de la vitesse et de la concentration des espèces (Ar, O_2 et N_2) le long du jet. Toutefois, il a signalé la difficulté quant aux choix des valeurs des paramètres K et n qui donnent des résultats fiables en bon accord avec l'expérience. Ce modèle aussi est appliqué pour l'argon pur mais il est très limité pour d'autre gaz plasmagène tel que Ar-H_2 et He. La Figure II.4 illustre la variation de la température axiale le long du jet obtenue par ce modèle pour différentes valeurs de puissance effective, un débit d'argon Q_{Ar} = 23,6 l/min et un diamètre de buse D = 8 mm. L'analyse de cette figure indique que le jet est composé de deux régions : région cœur définie par un palier (température constante) et la région développée caractérisée par un profil de température décroissant le long du jet.

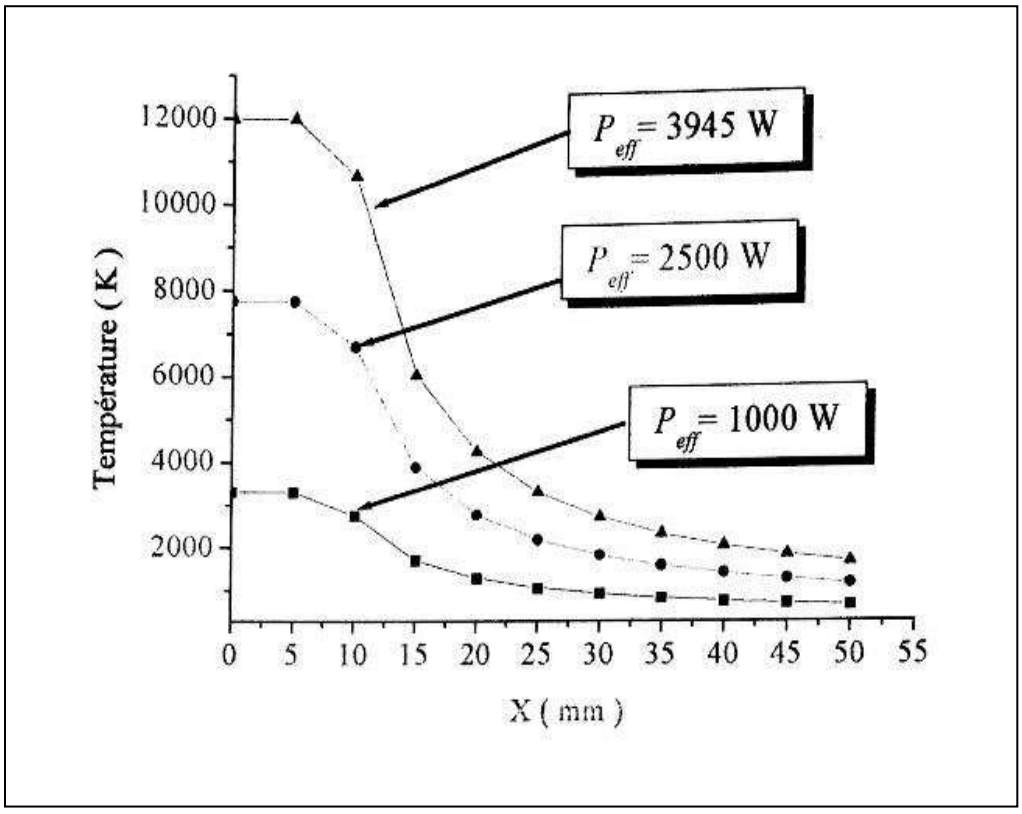


Figure II. 4 : profile de température axiale d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air pour plusieurs puissances [47]

Pfender, au moyen d'une sonde enthalpique, a pu déterminer la composition et la température du jet de plasma d'argon déchargeant dans l'atmosphère à différentes position axiales et radiales [50] de la région développée (loin de la buse). Les Figures II.5, Figure II.6 et Figure II.6 illustrent les résultats de mesures obtenues les conditions opératoires imposées (débit d'argon et intensité du courant). Les résultats obtenus montrent que la température et la concentration de l'argon le long du jet croient avec l'intensité du courant mais elles diminuent avec l'augmentation du débit d'argon.

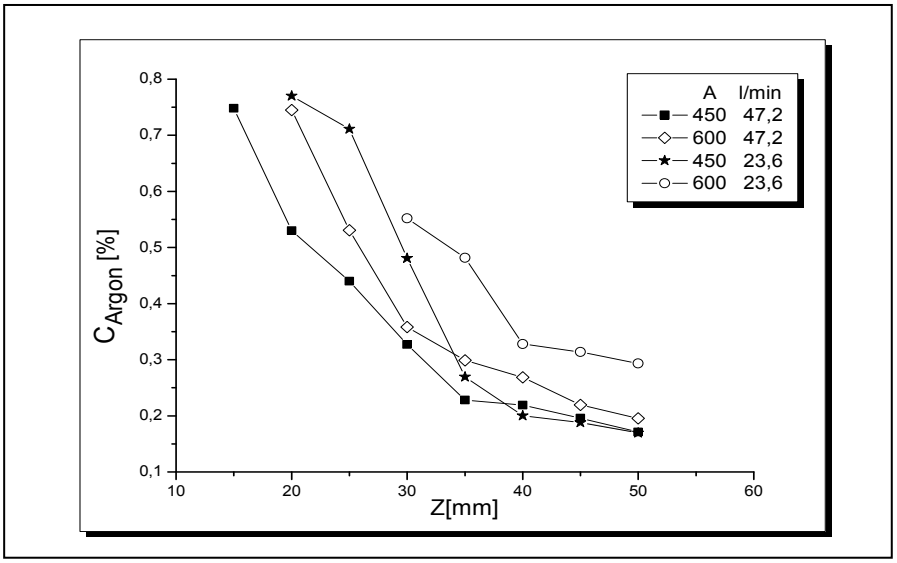


Figure II. 5 : Concentration axial d'Argon [51]

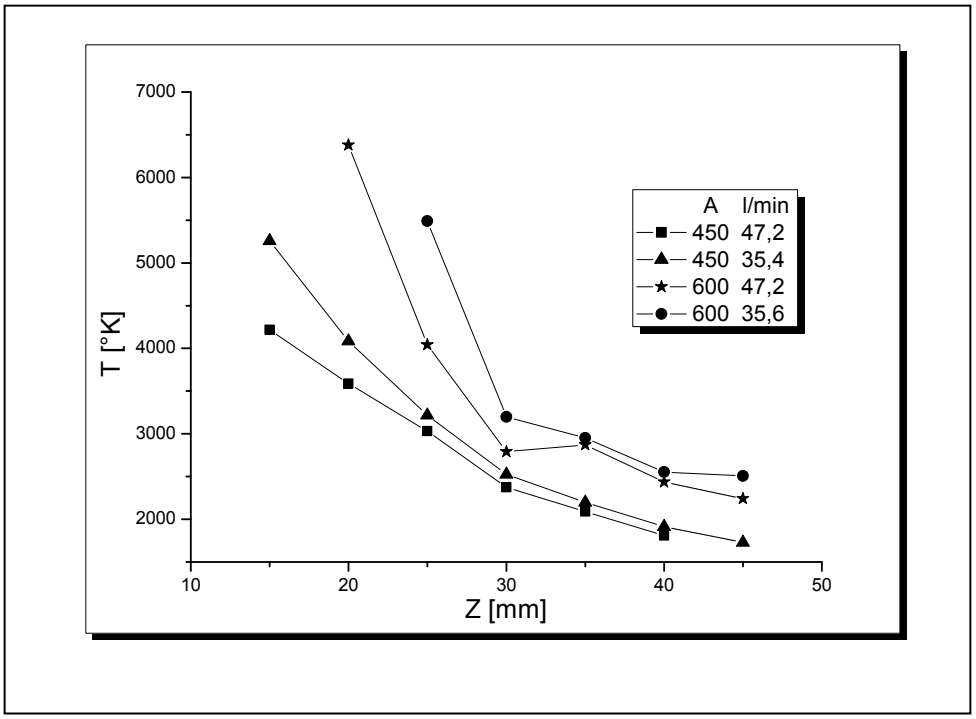


Figure II. 6 : Température axiale du jet de plasma d'argon [25]

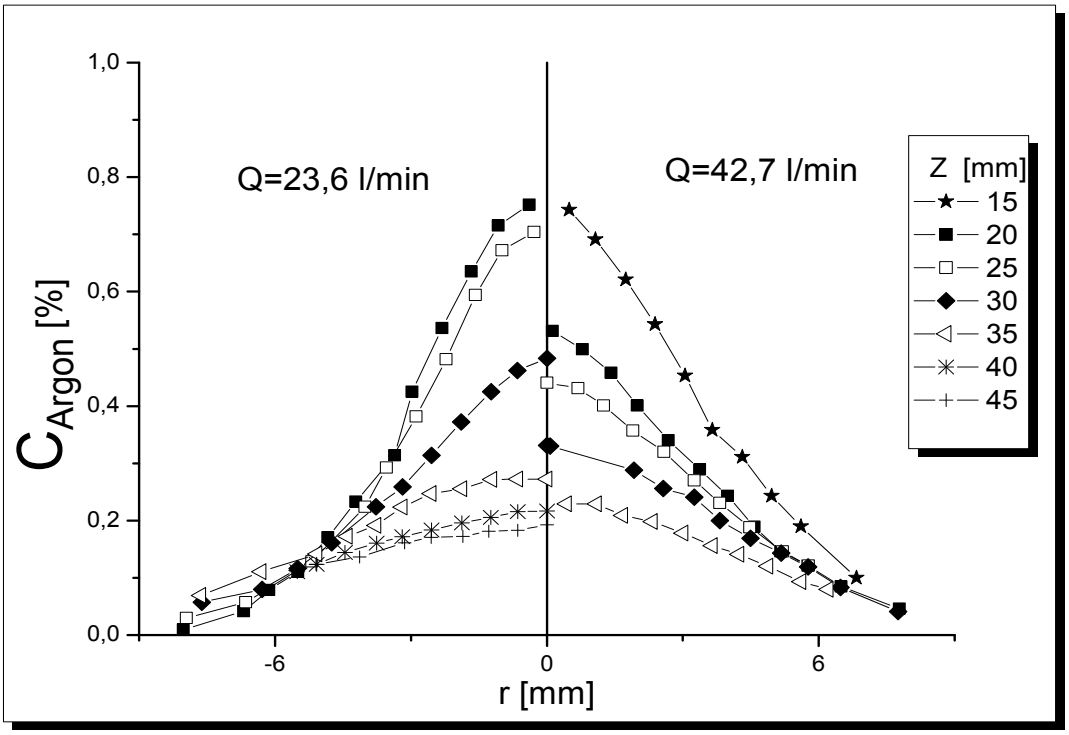


Figure II. 7 : concentration radiale d'argon [25]

M ANNOUN et *al.* Ont pu mesurer la composition centrale du jet d'un plasma d'argon issue d'une buse de diamètre D et déchargeant dans l'air ambiant par prélèvement local de gaz au moyen d'une sonde. Les résultats de l'analyse du prélèvement du gaz, au moyen d'un spectromètre de masse, sont associe à un calcul itératif à partir d'un code de calcul thermodynamique impliquant les espèces argon et air [O_2, N_2, O, N, NO] en tout point du jet permet d'accéder à la température axial du jet [47]. La Figure II.8 représente l'évolution axiale de la température du plasma thermique pour une buse de 3 mm, un débit d'argon de 8.4 l/min pour différentes valeurs de puissance effective.

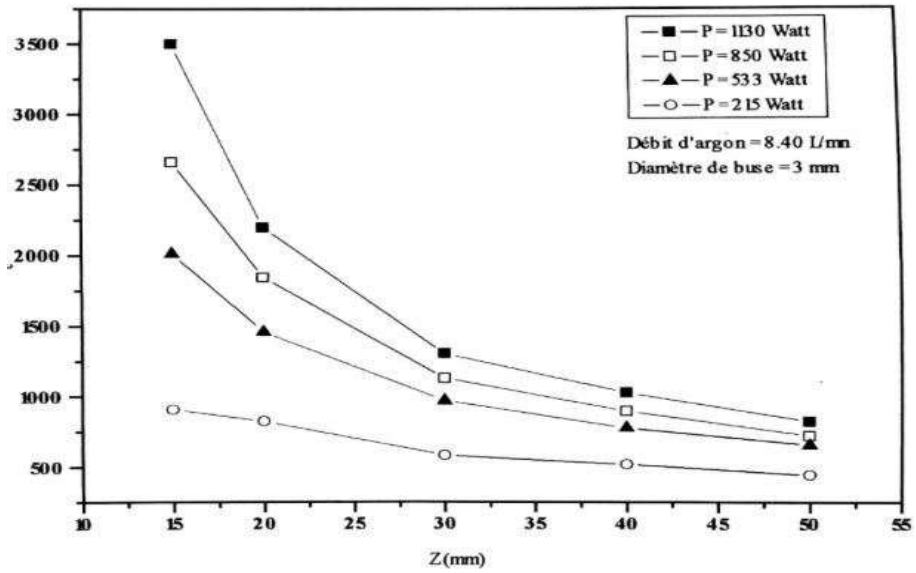


Figure II. 8 : variation de la température le long de l'axe du plasma d'argon pour différent puissances [47].

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé en premier lieu la spécificité d'un jet qui est composé de deux régions: région cœur et région développée. Dans la région cœur la température et la vitesse axiales du gaz sont constantes alors que dans la région développée décroisent d'une manière exponentiel. Nous avons aussi présenté les différentes équations de la convection forcée gouvernants le jet de plasma thermique issu d'une buse en régime turbulent. Finalement nous avons présenté quelques travaux de la littérature que nous avons jugé importants pour notre travail. Dans le chapitre suivant, nous présentons les résultats de simulation d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air ambiant, pour différentes conditions opératoires, réalisés au moyen du code de calcul ANSYS. Les résultats du modèle sont confrontés avec les résultats expérimentaux cités dans la littérature.

Chapitre III :

Résultats et discussions

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter les résultats de la simulation en 2D d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air ambiant effectués par le logiciel de calcul (ANSYS CFX). Les résultats de la simulation sont confrontés avec les résultats de la littérature. En fin, on exposera l'effet des conditions opératoires sur l'évolution de la température et de la vitesse le long du jet.

III.2 démarche de calcul par ANSYS

III.2.1 Présentation du logiciel de calcul ANSYS

ANSYS est un logiciel qui calcul par la méthode des volumes finis d'usage général et permette d'effectuer des tests virtuels il est dédié à la résolution numérique d'une large variété de problèmes physique en général et de mécanique en particulier. Ces problèmes portent notamment : analyse structurale en statique et en dynamique (linéaire et non linéaire), transfert de chaleur, dynamique des fluides, acoustique, électromagnétique. Parmi Les points forts des outils ANSYS sont :

- Une interface WORKBENCH intuitive et très facile à prendre en main
- L'associativité avec tous les outils CAO 3D disponibles sur le marché.
- Des notes de calcules automatiques
- Des outils de convergence automatique
- La possibilité d'avance progressivement dans la complexité des phénomènes traités.

III.2.2 Démarche pour l'exécution du projet

De façon générale, une résolution par éléments finis(ANSYS) comporte cinque étapes mentionnées dans la figure III.1

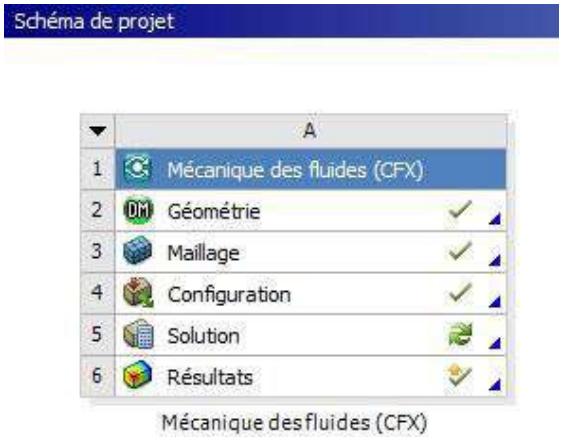


Figure III. 1 les étapes principales pour le calcul par volume fini

Après le lancement du logiciel (ANSYS Workbench), s'apparait la fenêtre d'interface (Figure III.1). On sélectionne notre domaine de calcul Dans notre étude, on a choisi le domaine de mécanique des fluide CFX (bonde1). On passe à la géométrie (double click sur la bande 2 sur la figure III.1) (Design Modeler). Une fenêtre s'apparait contenant des outils pour modéliser notre géométrie qui représente notre domaine de calcul (Figure III.2). Puis on passe au maillage (double click sur 2 dans la figure III.1), s'affiche une fenêtre où on génère notre maillage de manière défirent (voir figure III.3). L'étape suivante c'est la configuration là on met notre matériel Argon et Air et les conditions aux limites, puis on choisit le model de turbulence le model SST dans notre étude, passant vers les conditions d'entré (sortie de la buse figure III.4) on injecte les valeurs de température et de la vitesse (voir figure III.5) .Après ces étapes notre calcule est prête a exécuté (double click sur solution 5 dans la figure III.1) s'affiche une fenêtre et choisir initial condition et exécuter le calcul. Le calcul prend beaucoup temps, il dépend de plusieurs paramètres notre cas présenté dans (figure III.20) .Après la fin de calcul on peut accéder aux résultats. Les détails de l'exécution par ANSYS sont présentés en détail dans l'annexe.

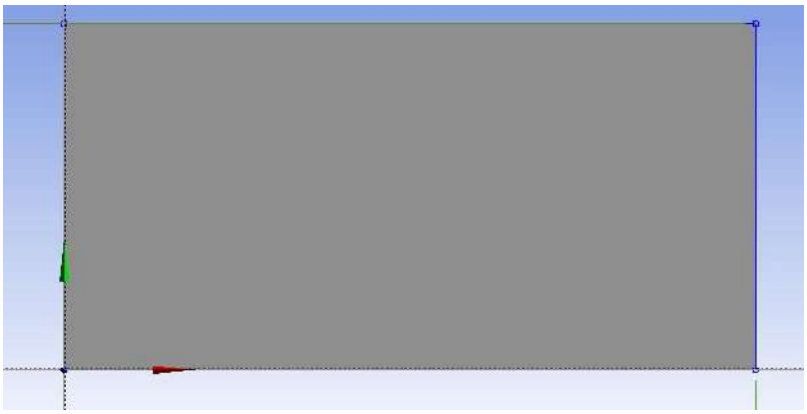


Figure III. 2 : la géométrie pour notre étude

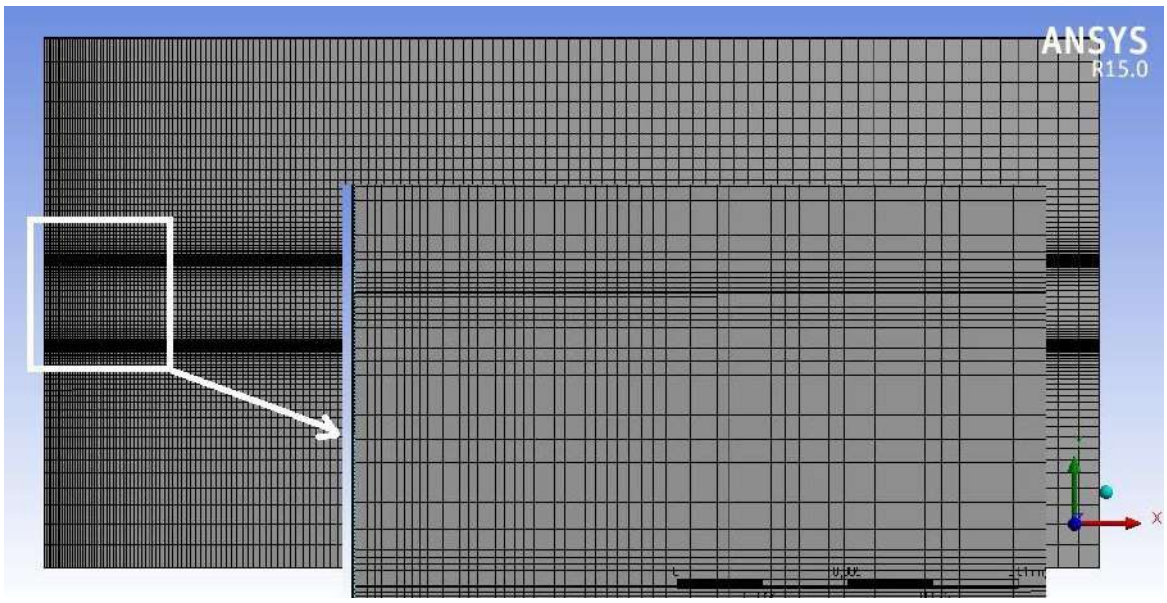


Figure III. 3 : maillage de domaine de calcule

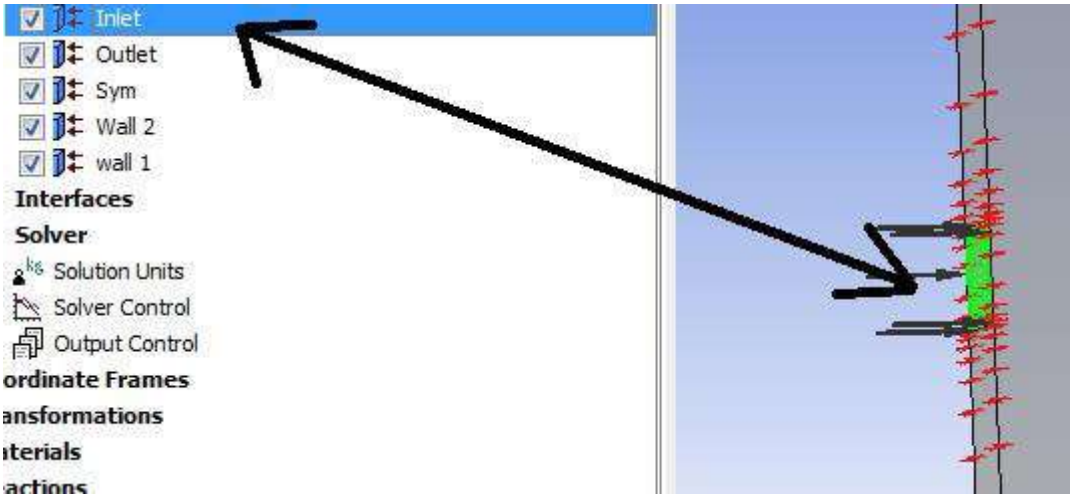


Figure III. 4 : Entré de la buse dans la géométrie

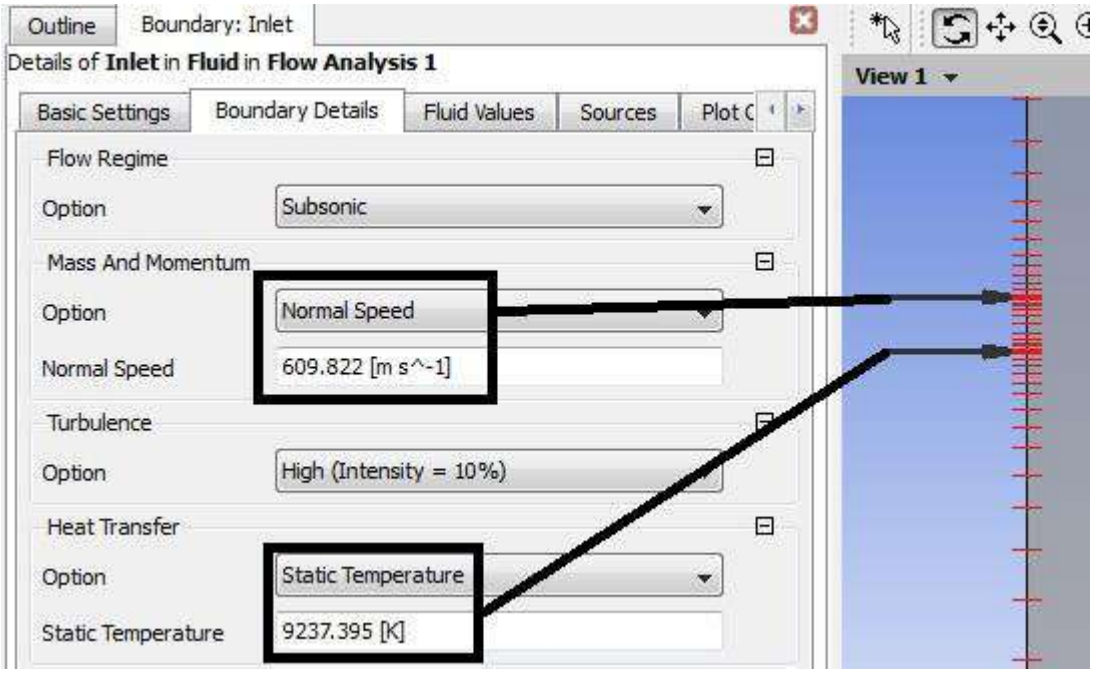


Figure III. 5 : Valeurs de température et de la vitesse utilisée dans notre simulation

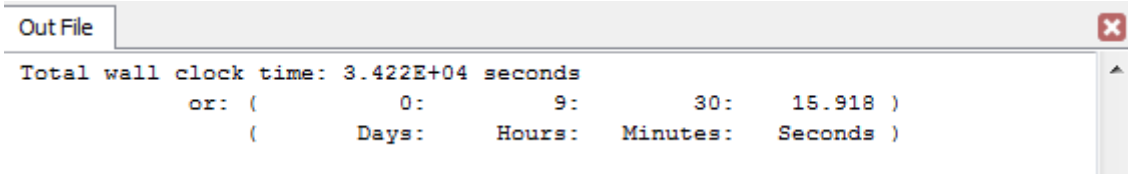


Figure III. 6 : Temps pris pour terminer le calcul

III.3 Température et vitesse à la buse (Conditions aux limites)

Dans la pratique la température et la vitesse du gaz le long du jet de plasma thermique issue de la torche dépendent des conditions opératoires qui sont caractérisées par la puissance nette (P) qu'on appelle aussi puissance effective (puissance électrique à la quelle est soustraite la puissance du refroidissement du chalumeau par l'eau), le débit d'argon (Q_{Ar}) et le diamètre de la buse (D). Cependant, dans la simulation par ANSYS au lieu d'introduire la puissance et le débit d'argon on introduit la température T_0 (température du sortie du gaz) et la vitesse U_0 (la vitesse du sortie du gaz) à la buse. Ces derniers paramètres (T_0 et U_0) dépendent directement des conditions opératoires comme la montre l'équation III-1 établit à partir du bilan énergétique effectué au niveau de la torche du plasma.

T_0 et U_0 sont alors déterminées à partir de la puissance effective fournie à l'argon pour générer le jet de plasma thermique. Cette puissance entraine l'augmentation de l'enthalpie et l'énergie cinétique du gaz comme le montre la relation suivante [50] :

$$P = \rho Q Cp \times (T_0 - T_a) + \frac{1}{2}\rho Q (U_0^2 - U_a^2) \qquad \text{III-1}$$

Avec

P: Puissance nette fournie à l'argon

ρ: Masse volumique d'Argon à la température ambiante.

Q: Débit d'argon à la température ambiante.

C_p: La chaleur spécifique d'Argon.

T_0: La température moyenne du gaz en sortie de buse

T_a: La température du gaz à la température ambiante.

U_0: La vitesse moyenne du jet de plasma en sortie de buse.

U_a : La vitesse du gaz en sortie de la buse dans les conditions de pression et de température du laboratoire.

Étant donné que le plasma se comporte comme un gaz parfait on peut alors écrire sous la pression atmosphérique :

$$U_0 = U_a \frac{T_0}{T_a} \qquad \text{(III-2)}$$

Avec : $$U_a = \frac{Q}{\pi D^2} 4 \qquad \text{(III-3)}$$

où D désigne le diamètre de la buse

La combinaison des équations (III-1), (III-2) et (III-3) permettent de déduire T_0 et U_0 :

$$T_0 = \frac{-b+\sqrt{(b^2-4a.c)}}{2a} \qquad \text{(III-4)}$$

avec :

$a = \frac{1}{2}\rho Q \left(\frac{U_a}{T_a}\right)^2$, $b = \rho Q C_p$ et $c = -\left(\frac{1}{2}\rho Q U_a^2 + \rho Q C_p T_a + P\right)$

L'effet des conditions opératoires sur T_0 et U_0 a été étudié par [51]. Leurs résultats sont illustrés sur les figures Figure III.7 - Figure III.10

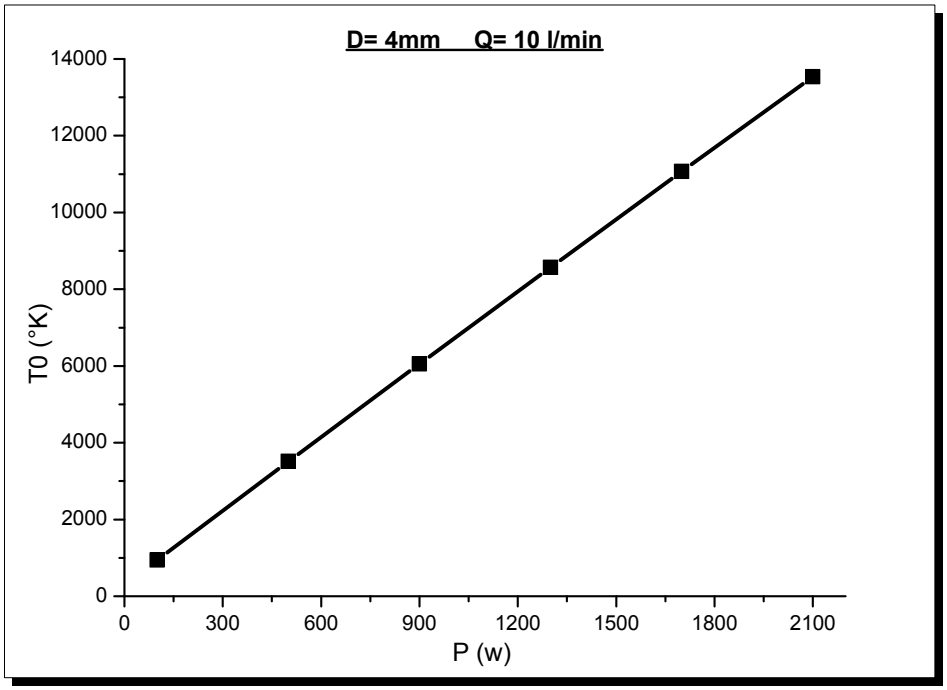


Figure III. 7 : Température T_0 en fonction de P [51]

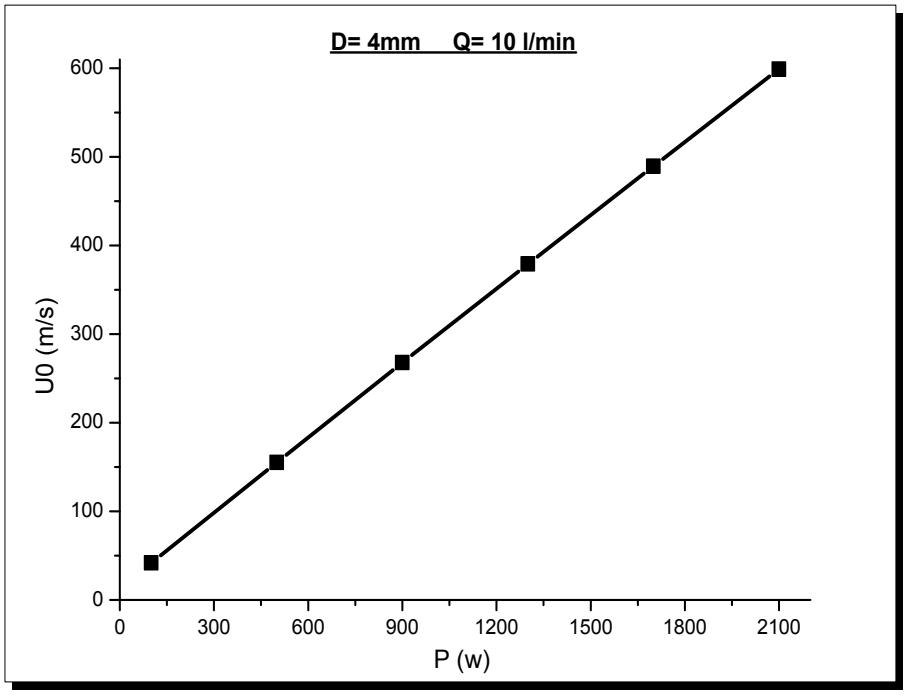


Figure III. 8 : Vitesse U_0 en fonction de P [51]

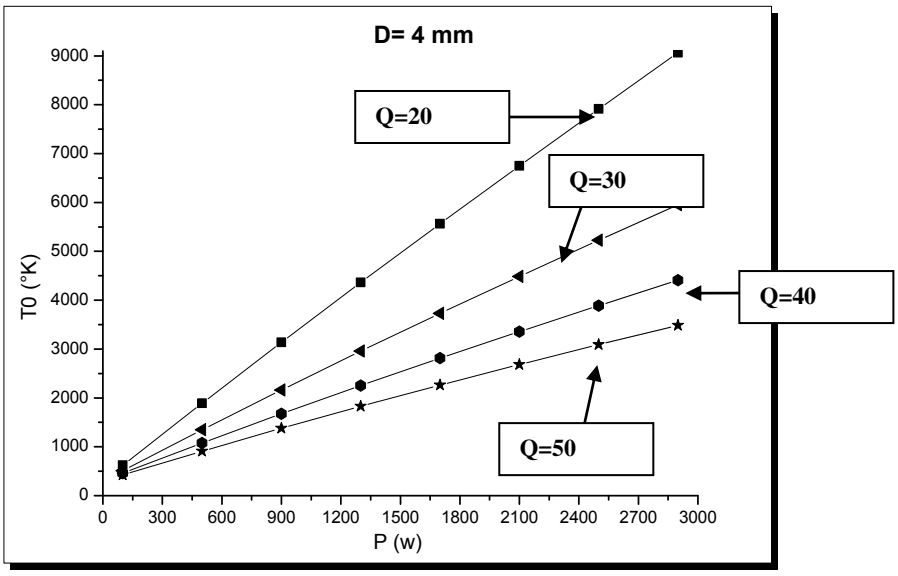


Figure III. 9 : Variation de T_0 en fonction de P pour diverses valeurs du débit d'argon Q [51]

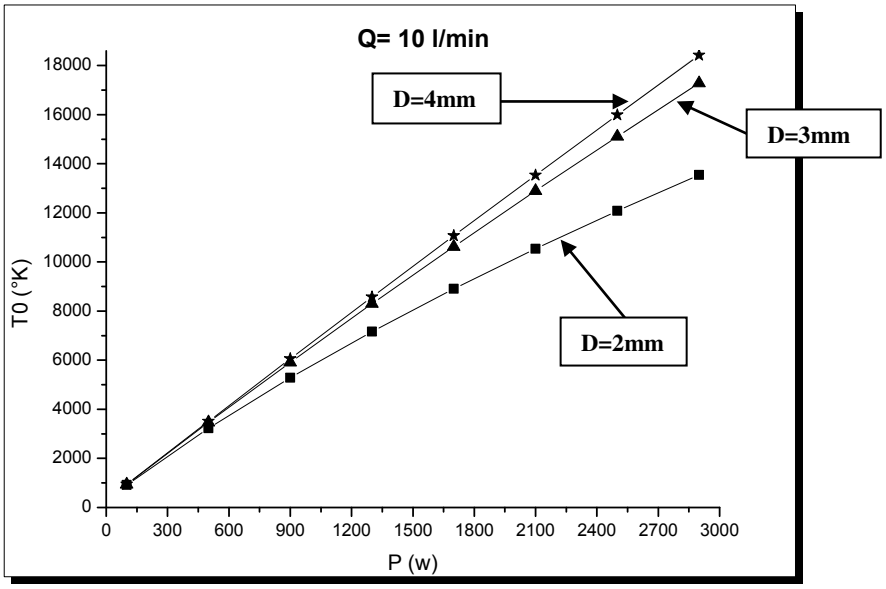


Figure III. 10 : Variation de T_0 en fonction de P pour différentes valeurs de diamètre de buse D [51]

L'examen de ces figures montre que T_0 et U_0 dépendent étroitement des conditions opératoires. En effet, T_0 et U_0 augmentent avec la puissance P fournie au gaz car cette dernière entraine l'augmentation de l'enthalpie et l'énergie cinétique du gaz comme il est

indiqué directement dans l'équation III-1. Par contre, l'augmentation du débit d'argon et la diminution du diamètre de la buse conduisent à la baisse de T_0 (Figure III.3 et Figure III.4)

III.4 Résultats

Sur la Figure III.11 et Figure III.13 nous avons présenté les résultats de la simulation en 2D réalisé avec l'logiciel d'ANSYS CFX R15.0 d'un jet de plasma Ar déchargeant dans l'air ambiant. Ces figures montrent l'évolutions de la température et de la vitesse le long du jet pour des conditions opératoire imposées. Ces figures illustrent aussi l'existence de deux régions, la région Cœur du jet dans la quelle la température et la vitesse restent constantes est égales à celles de la buse (T_0 et U_0). Au delà de cette région apparie la région développée dans

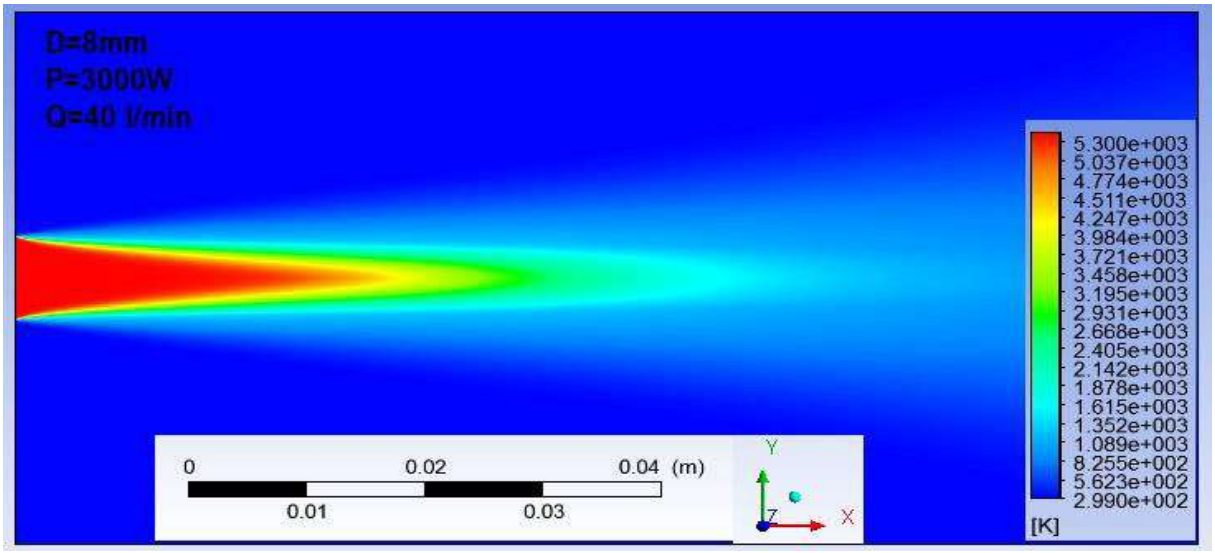


Figure III. 11 : Champ de température d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air

la quelle la température et la vitesse varient dans la direction axiale et radiale. Ces résultats sont en accords avec les données de la littérature.

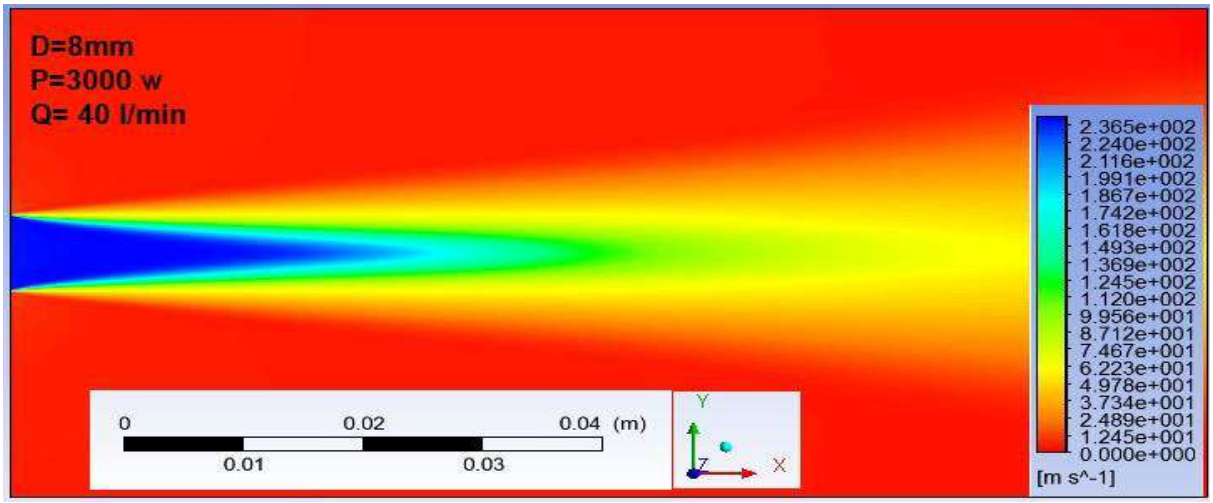


Figure III. 12 : Champ vitesse d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air

III.5 Validation de notre simulation

Pour valider le modèle du jet développé par ANSYS (simulation avec ANSYS), nous avons confronté les résultats de la simulation avec les mesures de la température axiales obtenues par P. Snabre et all réalisées par spectroscopie de masse (voir chapitre 2) sur des jet de plasma d'argon issu d'une torche ayant 3 mm alimentée par un débit d'argon Q =8.40 l/min pour différentes valeurs de puissance.

Dans le tableau III.1 sont regroupés les valeurs de T_0 et U_0 qui représentent les données d'entrées pour la simulation qui sont calculées à partir des équations III-4 et III-2 pour Q = 8.4 l/mn, D = 3 mm pour trois valeurs de puissance

Tableau III.1 : données d'entrées T_0 et U_0 pour Q = 8.4 l/mn et D= 3mm

Puissance (w)	T_0 (K)	U_0 (m/s)
1130	9237.39	609.82
850	7081.73	467.51
533	4595.95	303.41

Les figures (III.13, III.14 et III.15) illustrent la comparaison entre la température calculée par le modèle et celle de l'expérience pour différentes puissances. L'examen de ces figures montre que le modèle et en bon accord avec les résultats de l'expérience [50].

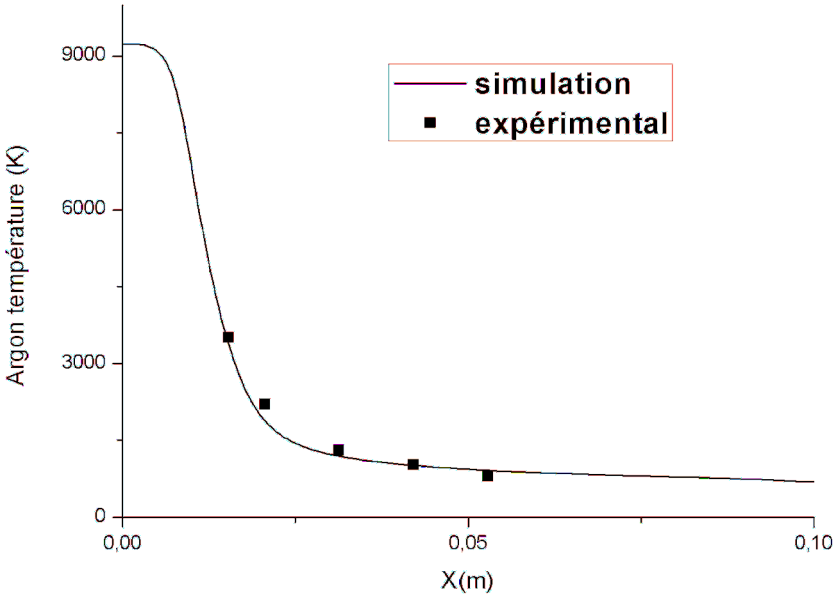


Figure III. 13 : Distribution de la température axiale du jet de plasma d'argon **[50]** .P=1130W Q = 8l/mn, D = 3 mm

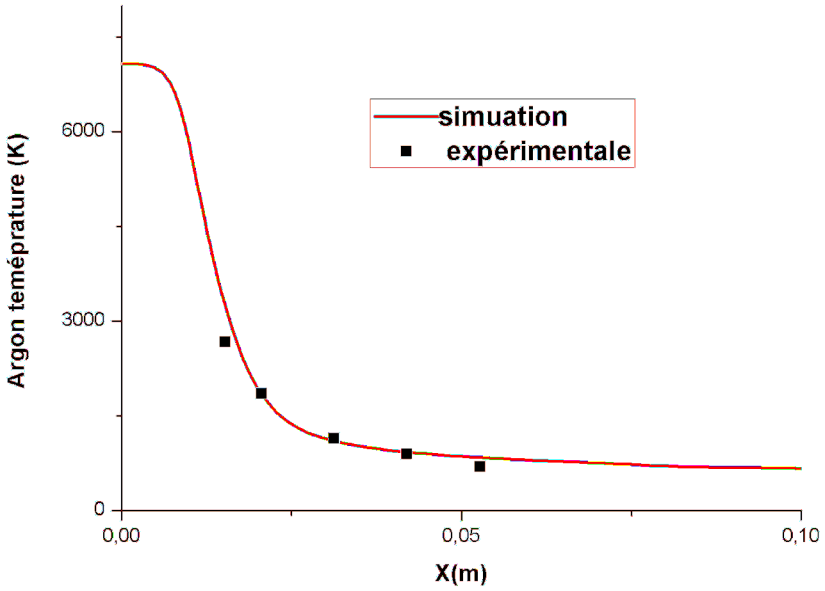


Figure III. 14 : Distribution de la température axiale du jet de plasma d'argon **[50]** .P=850 W Q = 8l/mn, D = 3 mm

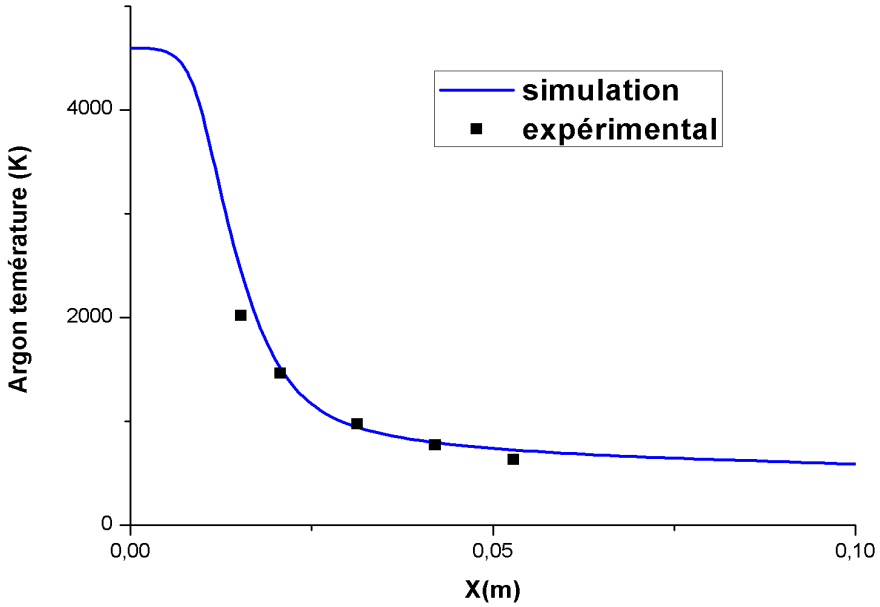


Figure III. 15 : Distribution de la température axiale du jet de plasma d'argon **[50]** P = 533W Q = 8l/mn, D = 3 mm

III.6 Effet des conditions opératoires sur la température et la vitesse axiale du jet

III.6.1 Effet de la puissance effective

La puissance est paramètre très important pour la maitrise de la température et la vitesse du plasma en tout point du jet. Les Figures III.16 et III.17 illustrent les variations respectivement de la température et vitesse centrales le long du jet pour trois valeurs de puissances effectives respectivement P = 6000 watts, P = 5000 et P=4000 watts avec les mêmes débits d'argon et diamètre de buse (Q= 40 l/mn D = 8 mm). Les résultats sont en bons accords avec la littérature car l'augmentation de la puissance effective a pour conséquence d'augmenter la température T_0 et la vitesse U_0 à la buse. En effet la puissance influe sur le

degré d'ionisation du gaz plasmagène au niveau de la buse et par conséquent le jet devient plus chaud et plus énergétique (énergie cinétique). Cette augmentation se reproduit le long du jet.

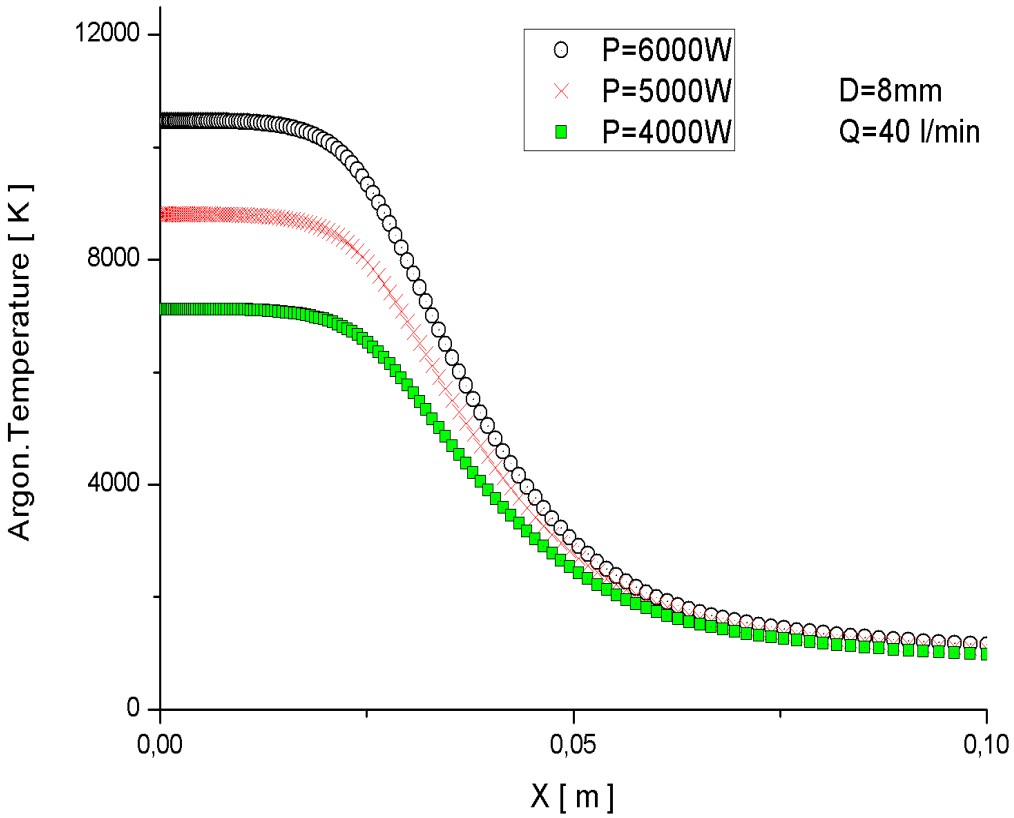


Figure III. 16 : l'effet de la puissance sur la température axial

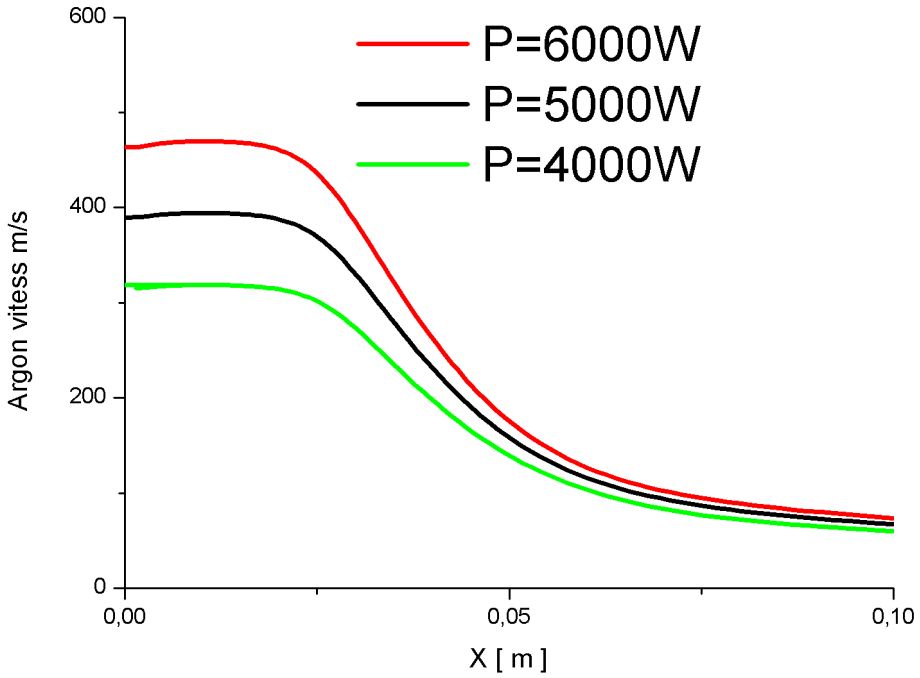


Figure III. 17: l'effet de puissance effective sur vitesse axiale

III.6.1 Effet du débit

Le débit d'argon et aussi est paramètre important pour le contrôle de la température et de la vitesse du jet de plasma thermique. En effet l'augmentation du débit entraine le refroidissement du jet à la buse qui se traduit par la diminution de T_0 et de U_0. Ce phénomène est du à la décroissance du degré d'ionisation accompagnant l'augmentation de la quantité de matière (Q Ar) pour une même valeur de puissance. Évidement quand To diminue alors la température suivent cette variation le long du jet. Ce phénomène est illustré sur la figure III.18

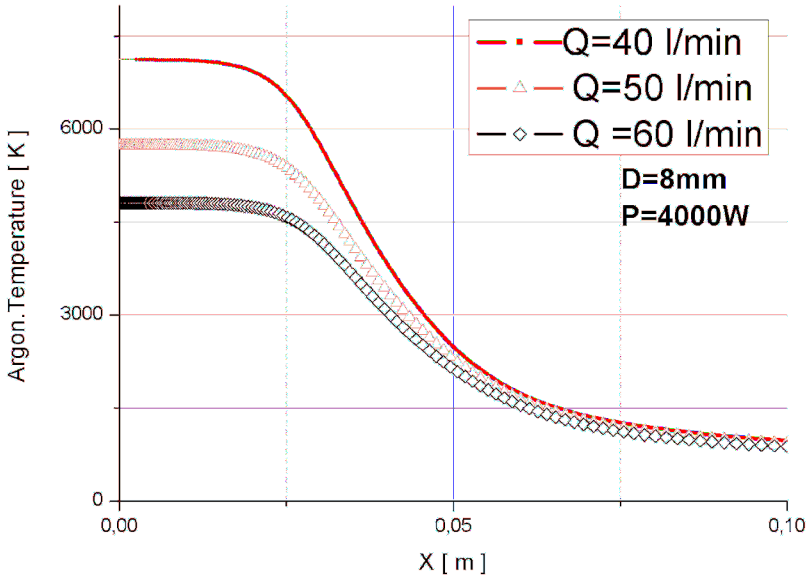


Figure III. 18 : l'effet de débite sur la température

III.6.1 Effet du diamètre de la buse

La température de jet est très affectée par le diamètre de la buse. En effet quant le diamètre de la buse (l'anode) s'élargie la section de l'arc crées par la décharge électrique entre la cathode et l'anode devient importante. Ce phénomène conduit à l'augmentation du degré d'ionisation du gaz plasmagène (argon) qui contribua à l'augmentation de la température au niveau de la buse (Figure III.19)

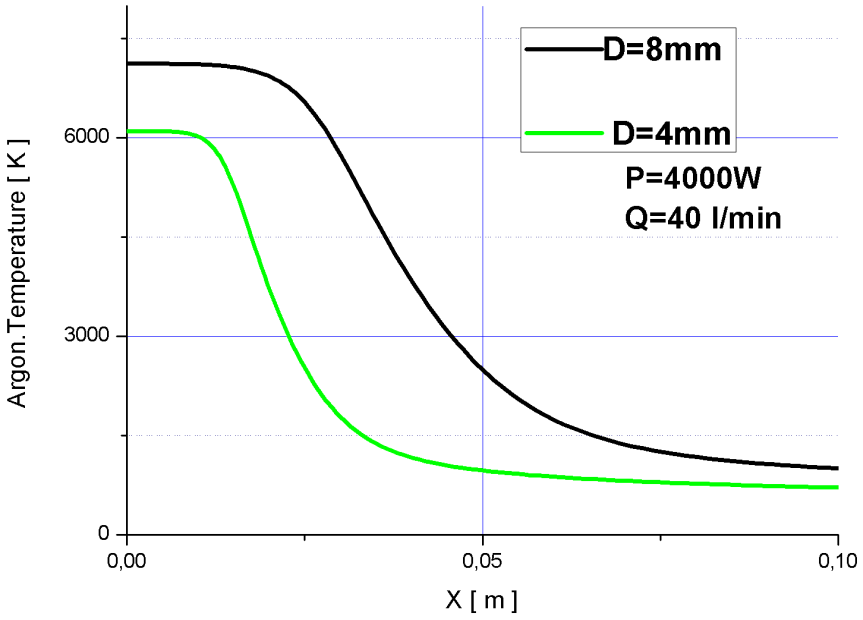


Figure III. 19 : Effet du diamètre de la buse sur la température du jet

III.7 Evolution radiale de la température et de la vitesse le long du jet

Sur les Figures III.20 et III.21 nous avons présenté les distributions radiales de la température et de la vitesse à diverse positions centrales (x=5mm, 15, 25, 35,45) d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air ambiant issue d'une buse de 8 mm de diamètre sous P = de 3000 w avec un débit d'argon de 40 l/mn. En X=5 mm les profils de température et de vitesse présentent un palier correspondant à la région du cœur car dans cette région la température et la vitesse du jet restent invariables. Alors pour les autres positions qui correspondent à la région développée les profils décroisent d'une manière exponentielle et au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la buse les profils s'élargissent à cause de l'expansion du jet. Ces résultats sont en bonne accord avec les données de la littérature.

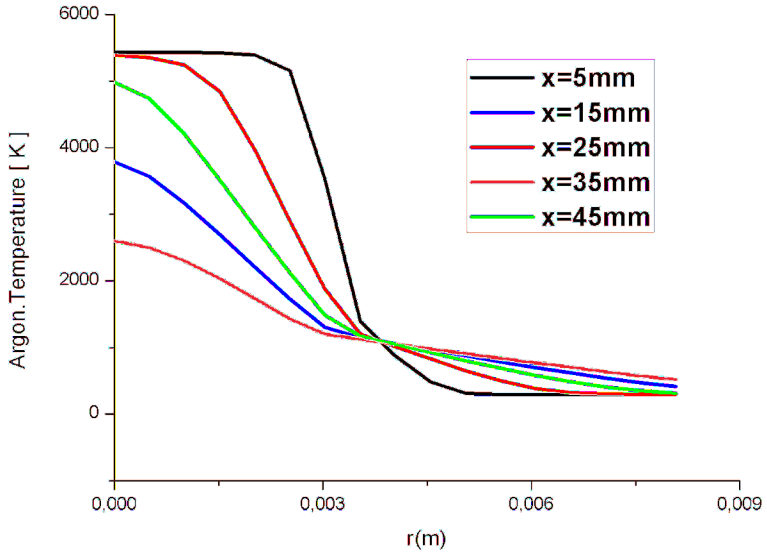


Figure III. 20 : Température radiale le long du jet à différentes valeurs x P=3000W, Q=40 l/m, D=8mm

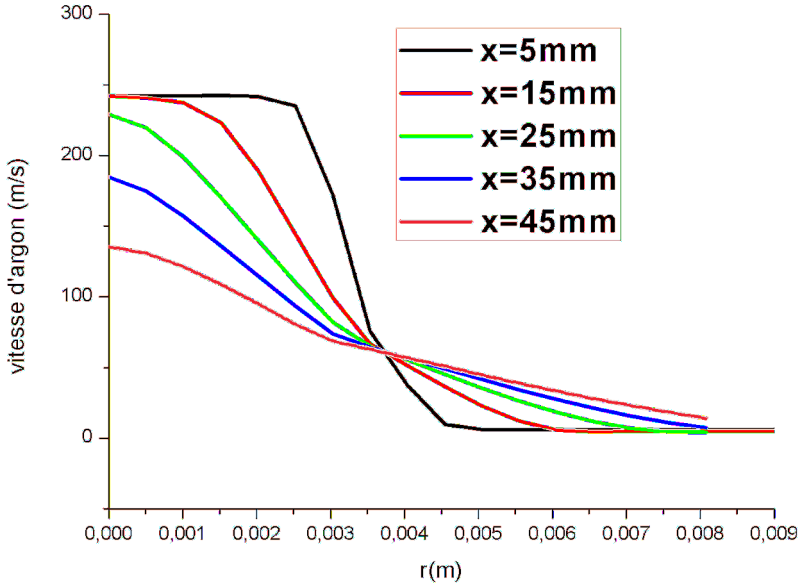


Figure III. 21 : Température radiale le long du jet à différentes valeurs x P=4000W, Q=40 l/m, D=8mm

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de notre travail est de faire une simulation numérique en deux dimensions d'un jet de plasma d'argon issu d'une torche et déchargeant dans l'air ambiant par utilisation du logiciel de calcul ANSYS

Pour atteindre cet objectif nous avons suivi les étapes suivantes :

La première étape est une tâche importante, consacrée à la recherche bibliographique sur les plasmas thermiques dans laquelle on a présenté les différents types de plasmas, leurs propriétés de transport en fonction de la température et leurs diverses applications notamment dans le domaine de la mécanique (soudure, projection thermique, traitement de déchets). Nous avons aussi exposé les différentes méthodes expérimentales pour la caractérisation thermique associe aux mesures de la température des plasmas thermique.

Ensuit en s'est focalisé sur le jet des plasmas thermique par sa description physique et on a exposé les formulations mathématique de la convection gouvernants les jets de plasma thermique. Nous avons aussi cité les différentes modèles de la turbulence en l'occurrence k-epsilon, k-oméga et SST. Dans cette partie nous avons aussi présenté les résultats de littérature quant à l'évolution de température le long du jet pour divers conditions opératoires. Ces données nous ont permet de valider le modèle du jet développé par le logiciel de calcul ANSYS.

La dernière partie de notre travail s'agit d'une simulation numérique d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air. Cette simulation numérique réalisée par le biais d'un logiciel performant à base des volumes finis (ANSYS Workbench R.15). Les résultats issus de cette simulation sont confrontés aux résultats expérimentaux de la littérature. Suite a cette comparaison, on a pu constater une concordance parfaite entre les résultats numériques avec ceux de l'expérience pour différents valeurs de puissance effective .Ceci confirme l'utilité de l'emploi du modèle numérique pour l'étude de l'influence de quelque paramètres (diamètre, puissance, débit) sur le comportement du jet qui a fait l'objet de la dernière étape de cette partie.

Bibliographie

Bibliographie

[F. Ket P. F] Université de Limoges, 123, rue Albert Thomas, 87060 Limoges Cedex, France (Reçu le 6 avril 1981, révisé le 15 juin 1981, accepté le 16 juin 1981)

[1]-B. R. Adhikari, R. Khanal, "Introduction to The Plasma State of Matter", *The Himalayan Physics*, Vol 4 (4), pp:60-64, 2013.

[2] Kiyotaka Wasa, Shigeru Hayakawa. « *Handbook of Sputter Deposition Technology: Principles, Technology and Applications »* (Materials Science and Process Technology Series), Noyes Publications (1992).

[3] Souheng Wu. *« Polymer Interface and Adhesion »,* CRC Press (1982).

[4] Pascal Bradu. *« L'univers des plasmas: Du big bang aux technologies du IIIe millénaire »,* Flammarion (2002).

[5] JOURNAL DE PHYSIQUE. *« Plasma in laboratory and space »*, Colloque C7, supplément au n° 7, Tome 40 (Juillet 1979).

[6] BAMRIM Ali , « *Réacteur a lit soufflé par plasma , application au traitement des poussiers métallurgiques » ,* Thèse de doctorat , Université de Perpignan , (Janvier 1995).

[7] B. Ardjani, "Application de la méthode de Monte Carlo dans le calcul des coefficients de transport d'un gaz faiblement ionisé", thèse de magister présentée à la Faculté des Sciences, Département de Physique, Université Aboubakr Belkaid de Tlemcen, Septembre 2006.

[8] E. C. I. Castillo, "Étude théorique et expérimentale de décharges électriques à haute pression et faible courant en milieu non-réactif et réactif appliqué à la synthèse d'hydrocarbures", thèse de doctorat en Sciences des Métiers de l'Ingénieur, pastel-00685101, Décembre 2008.

[9] l'intermédiaire de leur alimentation", thèse de doctorat présentée à l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Novembre 2005

[10] A. Aissaoui, "Modélisation des décharges luminescentes radio fréquence", thèse de magister présentée à la Faculté de Génie Electrique, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Mohammed Boudiaf Oran, Juin 2000.

[11] A.D. Amir, "Etude du streamer cathodique", thèse de doctorat présentée à la Faculté des Sciences, Université des Sciences et de la Technologie Mohammed Boudiaf Oran, Juin 2010

[12] N. Ikhlef," Modélisation Numérique d'une Installation Convertisseur –Plasma d'Induction en Vue d'une Commande Optimale", Thèse de Doctorat , Université de Batna, 2010.

[13]M. El Morsli, P. Proulx, "Two-temperature chemically non-equilibrium modelling of an air supersonic ICP", Journal of physics. D, Applied physics, vol. 40, no16, pp. 4810-4828, 2007.

[14] D. Pelletier D. 'Modélisation de la cinétique chimique dans les plasmas inductifs – Applications aux procédés', Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique deGrenoble, France, 2006..

[15] M. I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender ,"Thermal plasmas: fundamental and applications".

[16] Claire Tendero
« Torche plasma micro-onde à la pression atmosphérique : application au traitement de surfaces métalliques », Thèse de doctorat de l'université de Limoges (2005).

[17] BAMRIM Ali , « *Réacteur a lit soufflé par plasma , application au traitement des poussiers métallurgiques » ,* Thèse de doctorat , Université de Perpignan , (Janvier 1995).

[19] M.I. Boulos, P. Fauchais, and E. Pfender. *Thermal Plasmas - Fundamentals and Applications,* volume 1. Plenum Press, New York, NY, 1994.

[20]Pierre Fauchais. Plasmas thermiques : production. Techniques de l'ingenieur, (D2820) :14, 2007

[21] Emilie Langlois-Bertrand. Caractérisation d'un jet de plasma d'argon laminaire : détermination des champs de températures par spectroscopies atomique et moléculaire et mesures de vitesses d'écoulement. Autre. Université d'Orléans, 2011. Français. <NNT : 2011ORLE2024>. <tel-00661299>

[22] ERNST. R.G, ECKERT, RICHARD J. COLDSTEIN , Measurement in heat transfert, second édition, Mc GRAW-HILL BOOK Company, (1979)

[23] M. Gindrat, J.-L. Dorier, Ch. Hollenstein, A. Refke, and G. Barbezat. Characterization of supersonic low pressure plasma jets with electrostatic probes. Plasma Sources Science and Technology, 13 :484-492, 2004.

[24] BRADLEY D., MATTEWSK.J*, «Measurement of High Gas Temperatures with fine Wire Thermocouples»,* J.Mech.Eng. Science, Vol 10, n°4, (1968).

[25] PFENDER E, BROSSA M, «*Probe measurements in thermal plasma jets*», Plasma Chem , and Plasma Processing », 8,1, pp75-90,(1988).

[26] P. Fauchais, J.-F. Coudert, and M. Vardelle. Plasma Diagnostics : Discharge Parameters and Chemistry (Plasma Materials Interactions), chapter 7, pages 349-445. Academic Press, 1989.

[27] R. Avni, S.F. Miralai, F. Prevot, D. Morvan, J. Amoroux, and H. Nickel. Diagnostics of a radio-frequency plasma expanding through a nozzle (PETN) at low pressure. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 17(4) :467-478, 1997.

[28] G. Hancock, R. Peverall, G.A.D. Ritchie, and L.J. Thornton. Absolute number densities of vibrationally excited N2(AL+) produced in a low pressure RF plasma. Journal of Physics D : Applied Physics,^ :1846-1852, 2006.

[29] R. Engeln, S. Mazouffre, P. Vankan, D.C. Schram, and N. Sadeghi. Flow dynamics and invasion by background gas of a supersonically expanding thermal plasma. Plasma Sources Science and Technology, 10 :595-605, 2001.

[30] E. Pfender, J.R. Fincke, and R. Spores. Entrainment of cold gas into thermal plasma jets. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 11(4) :529-543, 1991.

[31] Herve Rabat and Charles de Izarra. Check of OH rotational temperature using an interferometric method. Journal of Physics D : Applied Physics, 37(17) :2371–2375, September 2004.

[32] Nicolas Garnier. Ondes non-linÃ©aires Ã une et deux dimensions dans une mince couche de fluide. PhD thesis, Universite Paris 7 Denis Diderot, Saclay, September 2000.

[31] de Izarra. Diagnostic des plasmas thermiques. Technical report, Universite d'Orleans, Orleans (France), 2010.

[33] J.R. Davis, editor. Handbook of Thermal Spray Technology. Thermal Spray Society Training Committee, ASM International, Materials Park, OH, 2004.

[34] TCPP (Traitements Composites Poudres et processus),Les Brosses - 23160 AZERABLES – France (**http://www.tcpp.fr/projection-thermique.html)**

[35] R.Cazes, Soudage à l'arc Techniques de l'Ingénieur, B7730 (1995)

[36] S.M. Ilii, M.Coteata, Plasma arc cutting cost, Int J Mater Form 2, Suppl 1:pp.689– 692 (2009)

[37] J.H. Zaat. A quarter of a century of plasma spraying. Annual Review of Materials Science, 13 :9-42, 1983.

[38] P. Fauchais, G. Montavon, M. Vardelle, and J. Cedelle. Developments in direct current plasma spraying. Surface and Coatings Technology, 201 :1908-1921, 2006.

[39] P. Fauchais. Understanding plasma spraying. Journal of Physics D : Applied Physics, 37 :R86-R108, 2004.

[40] J.P. Trelles, E. Pfender, and J.V.R. Heberlein. Modelling of the arc reattachment process in plasma torches. Journal of Physics D : Applied Physics, 40 :5635-5648, 2007

[45] P.PROULX, « *Modélisation mathématique des écoulement plasma particules»,* thèse de doctorat, université de Sherbrooke, QUEBEC, CANADA (Juillet 1987).

[46] DONALDSON C.D and GRAY K.E, «*theoretical and experimental investigation*

[47] A.BRAHIMI*, « approche théorique de l'étude de la destruction de CFC dans un jet de plasma thermique d'argon »,* Thèse de magister, Université de Médéa (2005).

[48] ZIANE FAROUK, « *étude thermique et dynamique d'une fine particule éjectée dans un écoulement de plasma thermique issue d'une torche »,* Thèse de magister, Université de Médéa (mai 2012).

[49] Michel COANTIC : professeur émérite à l'université de la Méditerranée (https://www.universalis.fr/encyclopedie/turbulence)

[50] M.Announ, JM Badie, B. Granier, P. Snabre*, « Heat transfert around spherical particle stably levited in argon plasma jet »,* 13th International Symposium on Plasma Chemistry, (August 16-22), Bejing, China (1997)

[51] O. Sadoudi*, A Rahmoun « Approche analytique pour la détermination de la température et de la vitesse d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air ambiant »,* mémoire de Master, Université de Médéa (2017).

ANNEXE

Annexe

$$\alpha_i = \frac{n_e}{n_e + n_N} \qquad \textbf{(I.1)}$$

$$\bar{u} = \bar{u}_0 e^{-\lambda\left(\frac{r^2 - r_i^2}{r_5^2 - r_i^2}\right)} \qquad \textbf{(II.1)}$$

$$\bar{u} = \bar{u}_c e^{-\lambda\left(\frac{r}{r_5}\right)^2} \qquad \textbf{(II.2)}$$

$$h + \frac{U^2}{2} = A.U + B \qquad \textbf{(II.3)}$$

$$X + \mathrm{C}.U = \mathrm{D} \qquad \textbf{(II.4)}$$

$$\rho \vec{V}.\overrightarrow{grad\hat{h}} = -div(\vec{q}_{cond}) - div(\vec{q}_{ray}) + div(\bar{\bar{\tau}}.\vec{V}) + Q \qquad \textbf{(II.5)}$$

$$Q_{em} = \vec{j}_{él}.\vec{E} = \sigma.E^2 \qquad \textbf{(II.6)}$$

$$div\ \rho\vec{V} = 0 \qquad \textbf{(II.7)}$$

$$\rho.\vec{V}.\overline{\overline{grad}}\vec{V} = \overline{div}\overline{\tau} - \overline{grad}P + \vec{F}_{em} + \rho.\vec{g} \qquad \textbf{(II.8)}$$

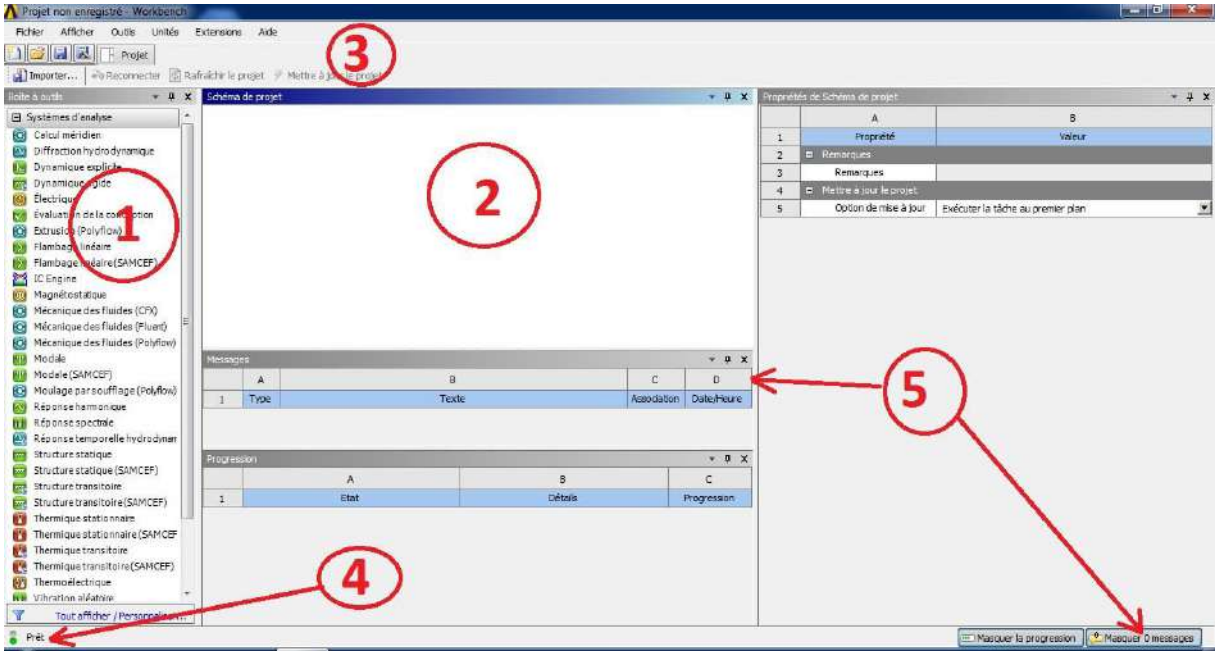
$$\Delta\vec{A} = \mu_0.\sigma.\left(\frac{\delta\vec{A}}{\delta\ t}\right) \qquad \textbf{(II.9)}$$

$$\vec{F}_{em} = \mu_0.j_{em} \wedge \vec{H} \qquad \textbf{(II.10)}$$

$$V_X = \overline{V}_X + V_X^{'} \qquad \textbf{(II.11)}$$

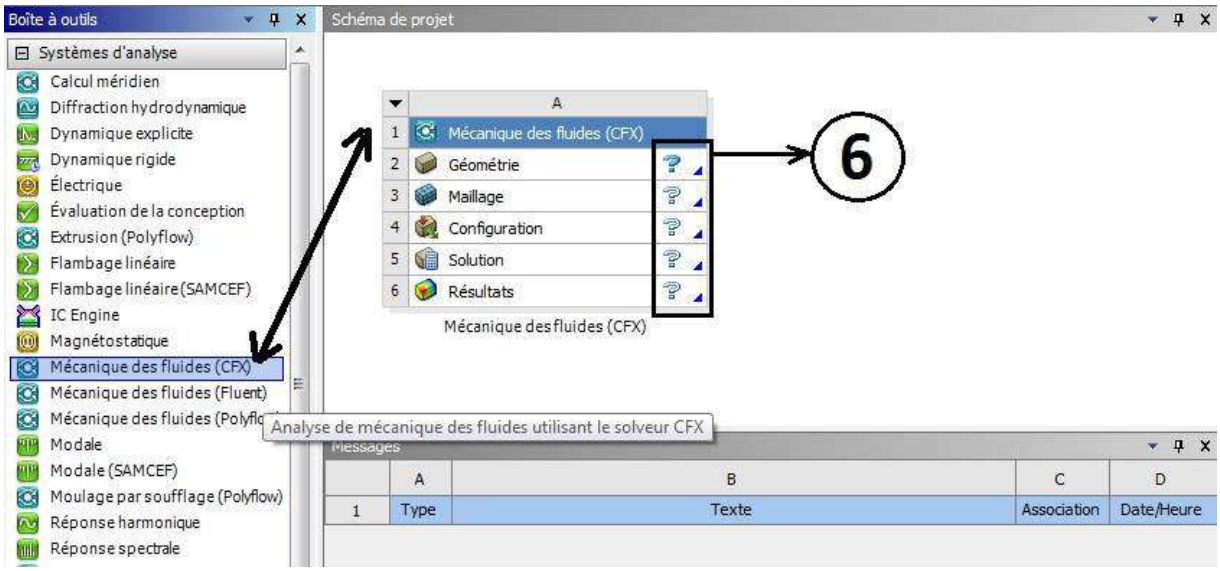
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - Y_k + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho w u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_w \frac{\partial w}{\partial x_j}\right) + G_w - Y_w + D_w + S_w \qquad \textbf{(II.12)}$$

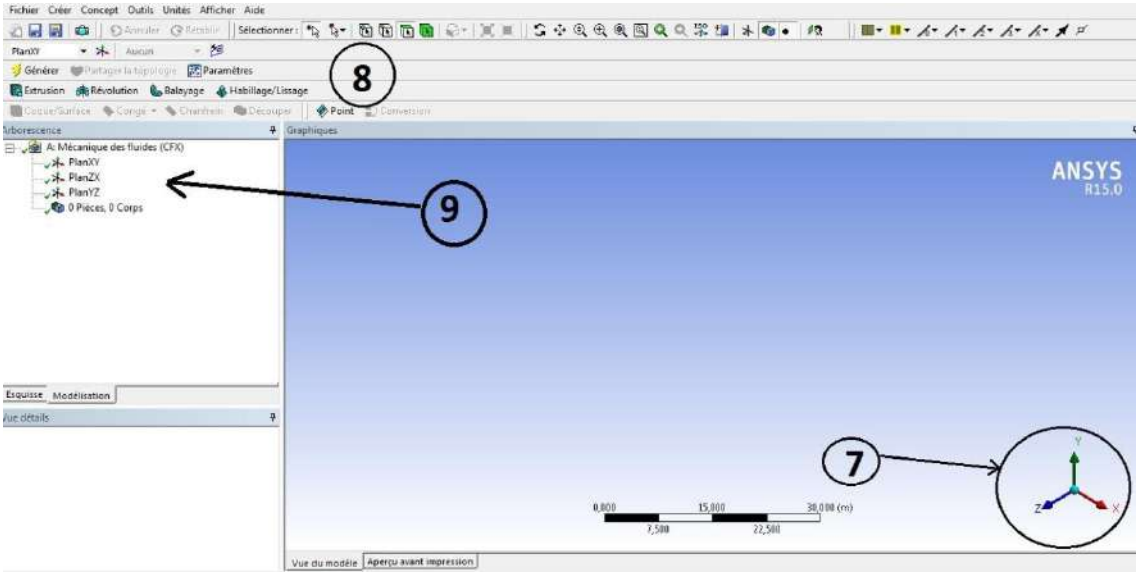


(III.1)

1. Domaine de phénomène étudiée
2. Schéma de projet
3. Barr d'outils
4. Indice de (prêt / occupé)
5. La boite de message
6. Etape a nécessaire a faire



(III.2)

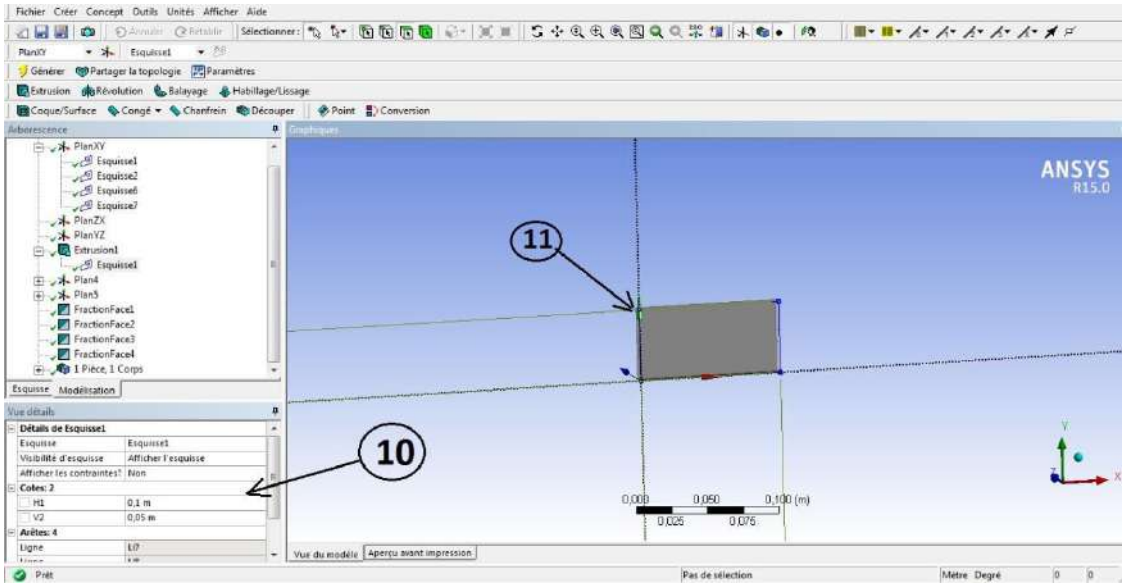


(III.3)

7 : un repère (3D)

8 : zone des outils

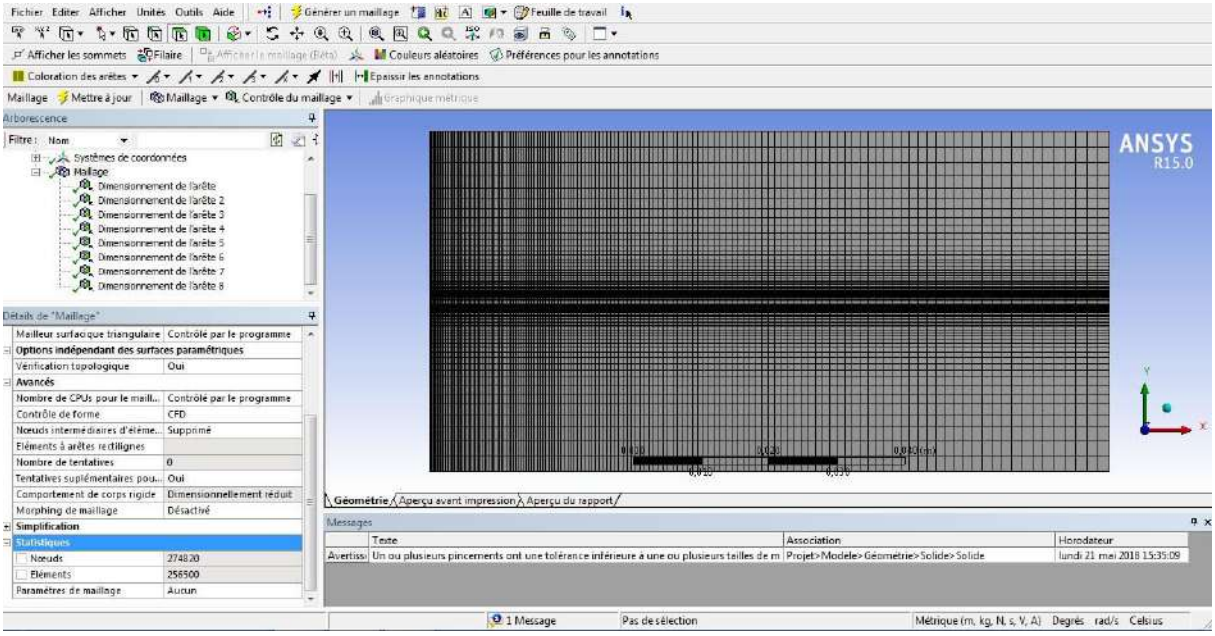
9 : zone de travail



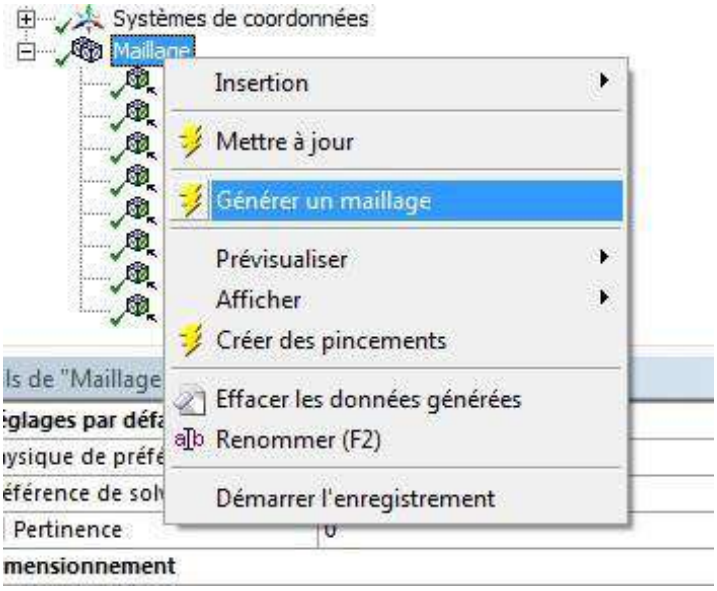
(III.4)

11 : géométrie

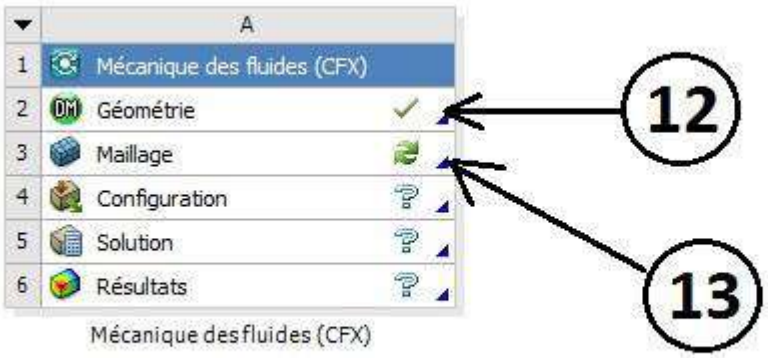
12 : cotation


Fichier Editer Afficher Unités Outils Aide
Générer un maillage
Feuille de travail
Afficher les sommets
Filaire
Couleurs aléatoires
Préférences pour les annotations
Coloration des arêtes
Epaissir les annotations
Maillage
Mettre à jour
Contrôle du maillage
Arborescence
Filtre : Nom
Systèmes de coordonnées
Maillage
Dimensionnement de l'arête
Dimensionnement de l'arête 2
Dimensionnement de l'arête 3
Dimensionnement de l'arête 4
Dimensionnement de l'arête 5
Dimensionnement de l'arête 6
Dimensionnement de l'arête 7
Dimensionnement de l'arête 8
Détails de "Maillage"
Mailleur surfacique triangulaire
Contrôlé par le programme
Options indépendant des surfaces paramétriques
Vérification topologique
Oui
Avancés
Nombre de CPUs pour le maill...
Contrôlé par le programme
Contrôle de forme
CFD
Noeuds intermédiaires d'éléme...
Supprimé
Eléments à arêtes rectilignes
Nombre de tentatives
0
Tentatives supplémentaires pou...
Oui
Comportement de corps rigide
Dimensionnellement réduit
Morphing de maillage
Désactivé
Simplification
Statistiques
Noeuds
274820
Eléments
258500
Paramètres de maillage
Aucun
ANSYS
R15.0
Géométrie
Aperçu avant impression
Aperçu du rapport
Messages
Texte
Association
Horodateur
Avertiss
Un ou plusieurs pincements ont une tolérance inférieure à une ou plusieurs tailles de m
Projet>Modèle>Géométrie>Solide>Solide
lundi 21 mai 2018 15:35:09
1 Message
Pas de sélection
Métrique (m, kg, N, s, V, A)
Degrés
rad/s
Celsius

(III.5)


Systèmes de coordonnées
Maillage
Insertion
Mettre à jour
Générer un maillage
Prévisualiser
Afficher
Créer des pincements
Effacer les données générées
Renommer (F2)
Démarrer l'enregistrement
ls de "Maillage
Pertinence
mensionnement

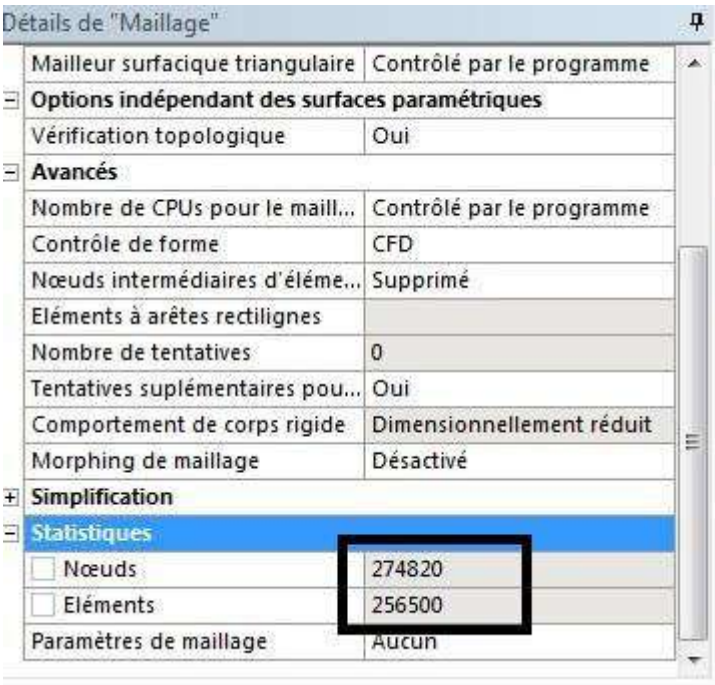
(III.6)



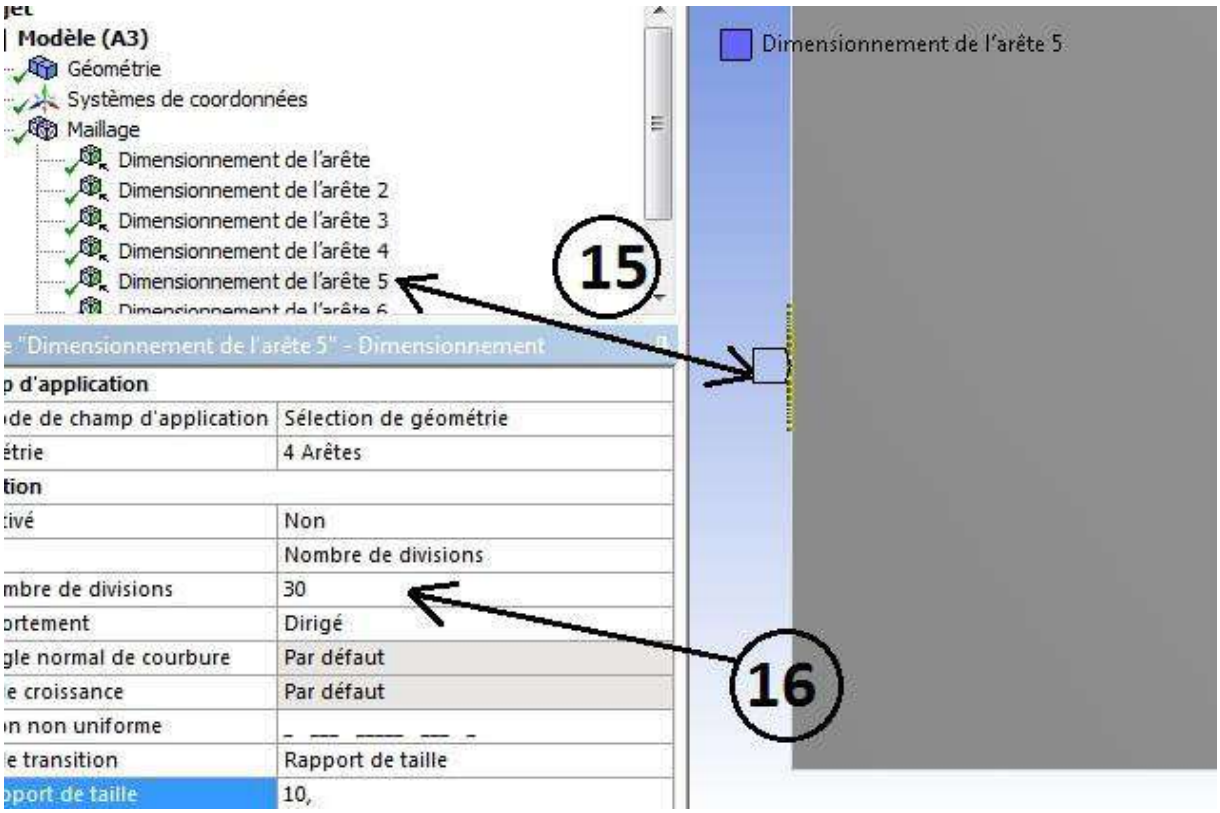
(III.7)

12 : géométrie prêt a maillée

13 : signifie qu'aucun maillage n'est généré



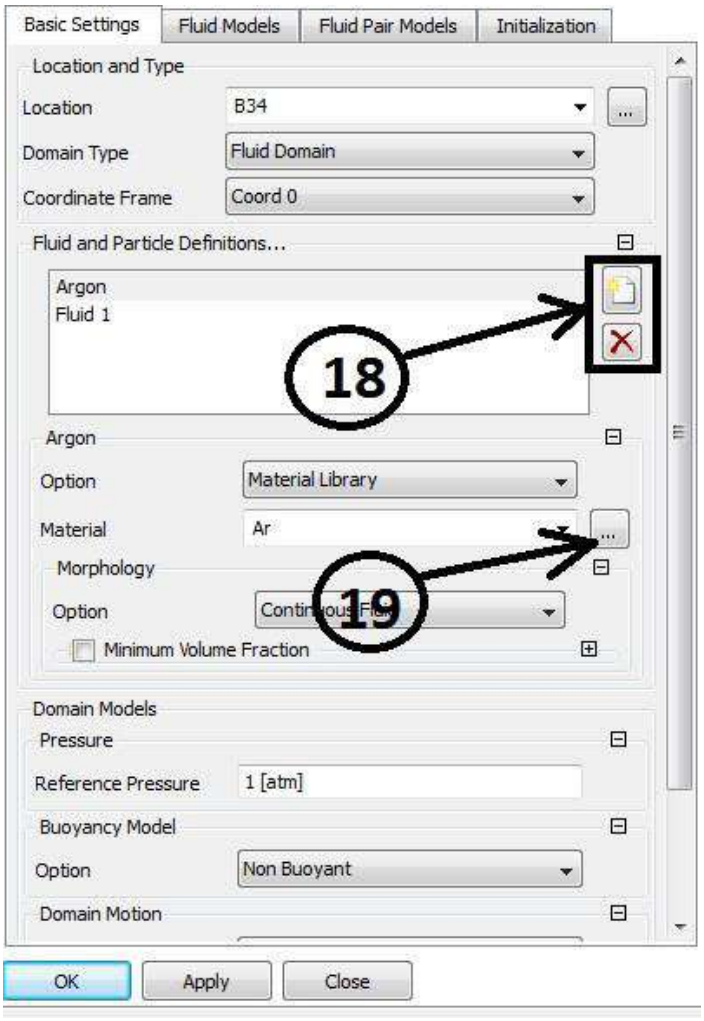
(III.8)



(III.9)

15 : arête pour générer un maillage

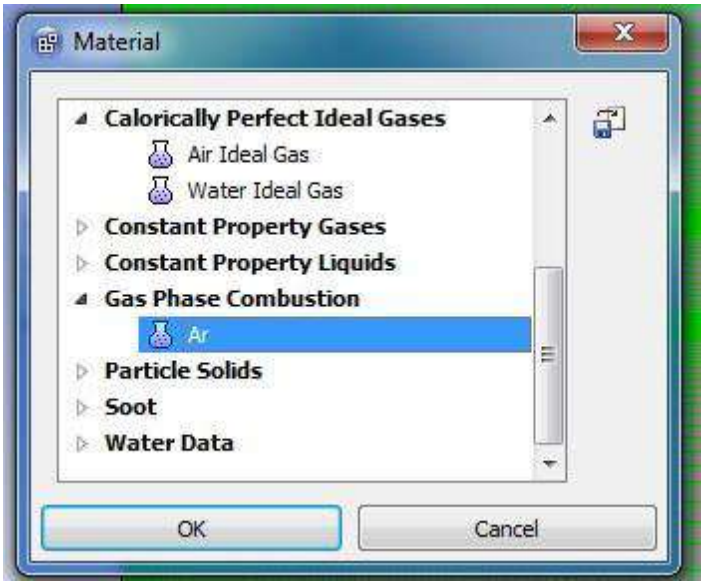
16 : nombre de division

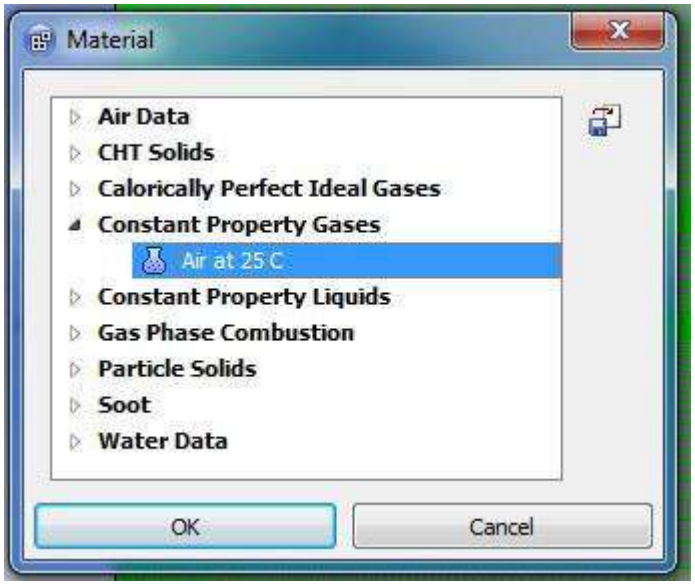


(III.10)

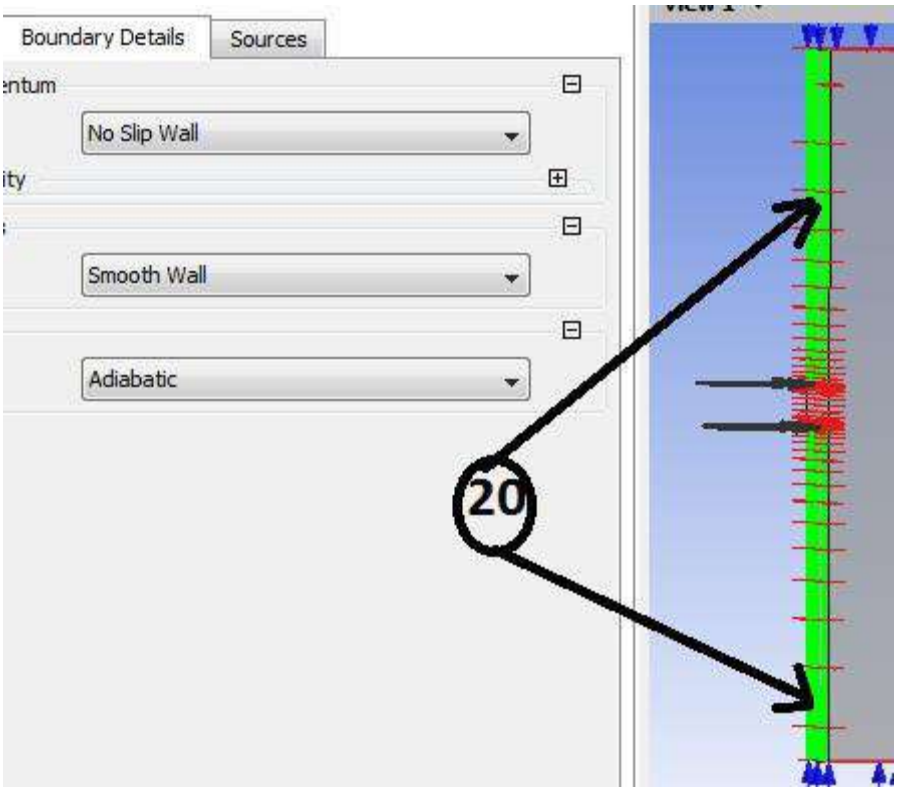
18 : ajouter/supprimer des matériaux

19 : accéder à la bibliothèque des matériaux



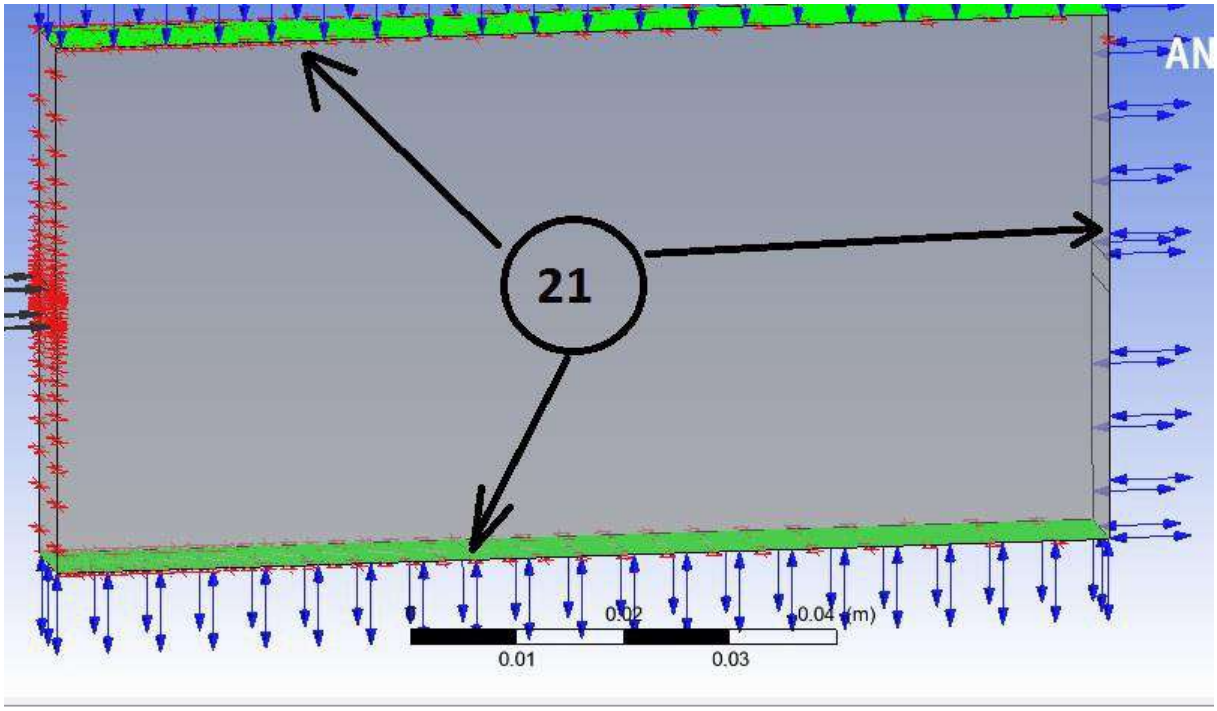

Material
Air Data
CHT Solids
Calorically Perfect Ideal Gases
Constant Property Gases
Air at 25 C
Constant Property Liquids
Gas Phase Combustion
Particle Solids
Soot
Water Data
OK
Cancel

(III.12)


Boundary Details
Sources
No Slip Wall
Smooth Wall
Adiabatic
20

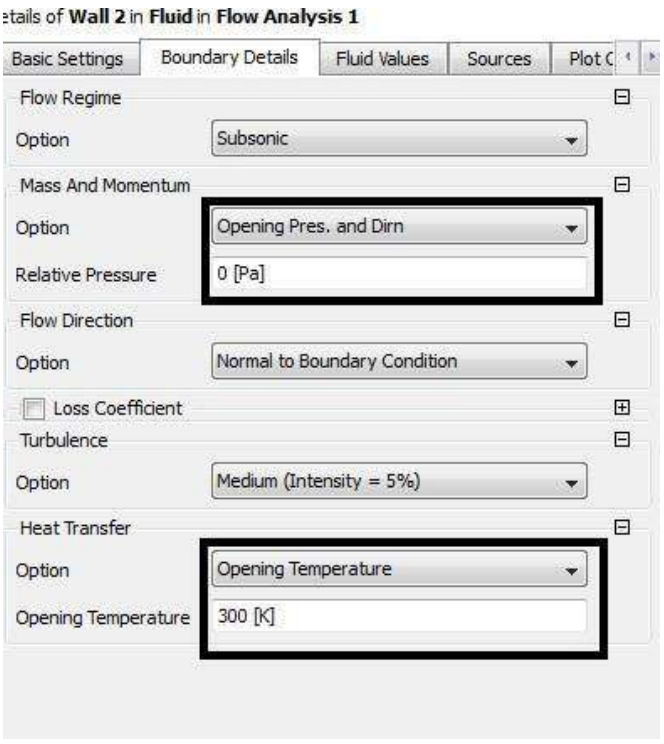
(III.13)

20 : condition aux limites (parois)

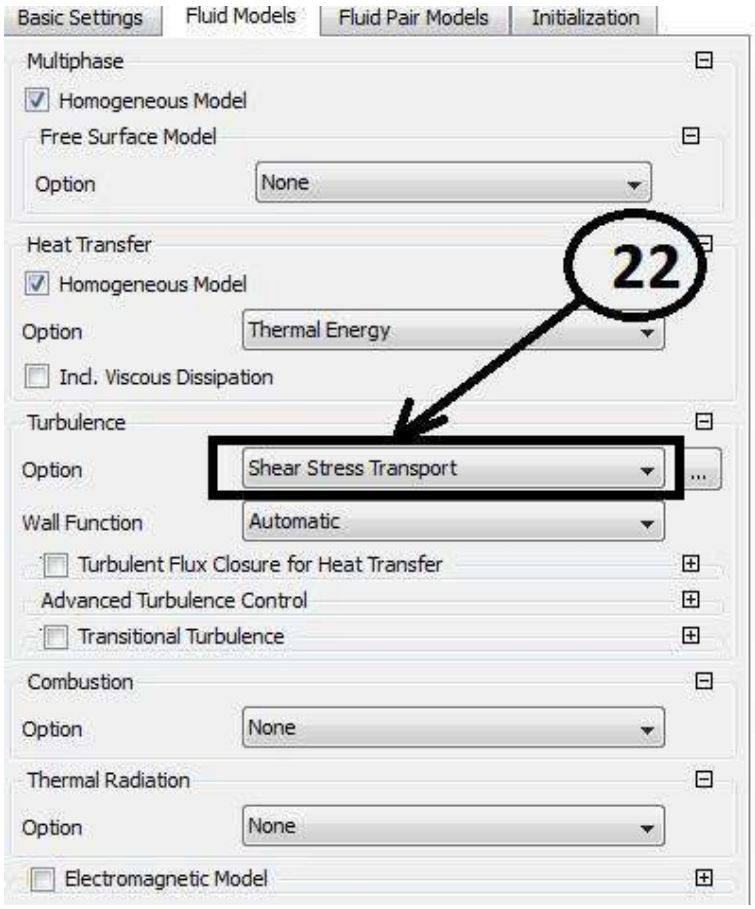


(III.14)

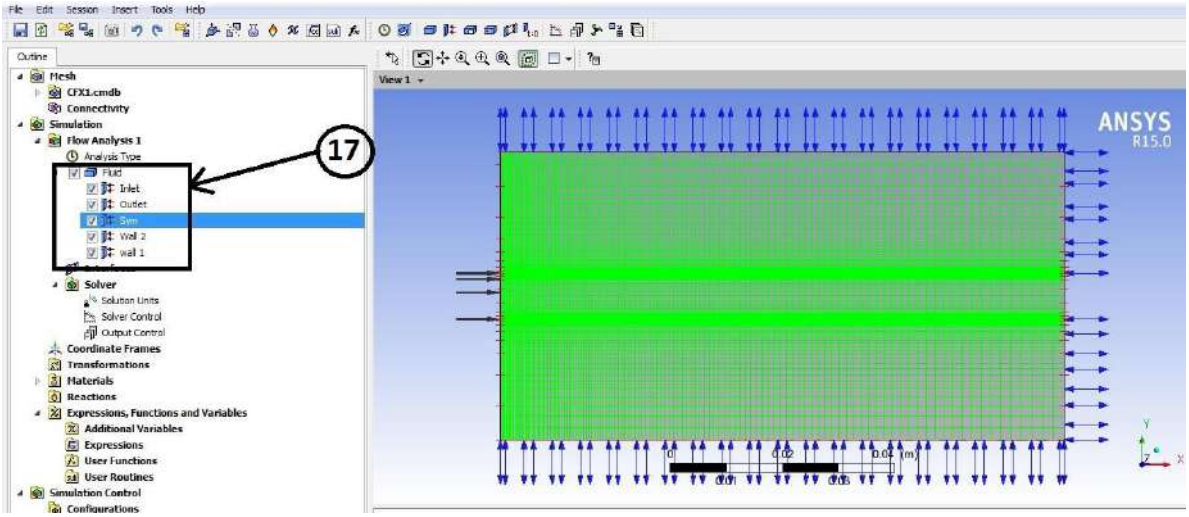
21 : conditions aux limites (Air)



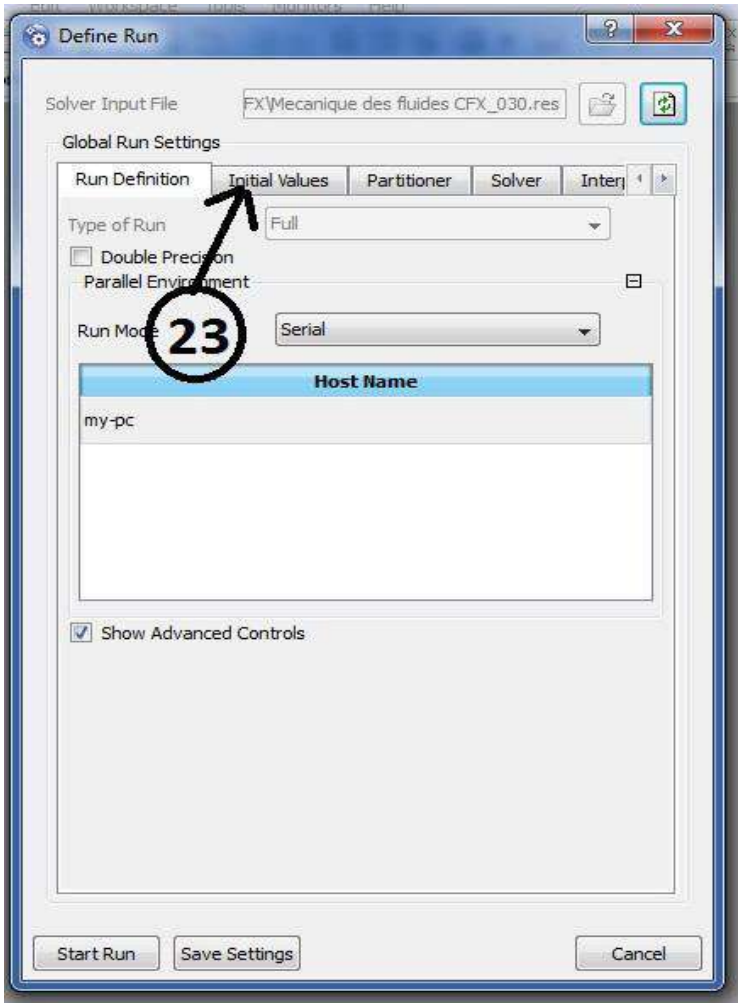
(III.15)


Basic Settings
Fluid Models
Fluid Pair Models
Initialization
Multiphase
Homogeneous Model
Free Surface Model
Option
None
Heat Transfer
22
Homogeneous Model
Option
Thermal Energy
Incl. Viscous Dissipation
Turbulence
Option
Shear Stress Transport
Wall Function
Automatic
Turbulent Flux Closure for Heat Transfer
Advanced Turbulence Control
Transitional Turbulence
Combustion
Option
None
Thermal Radiation
Option
None
Electromagnetic Model

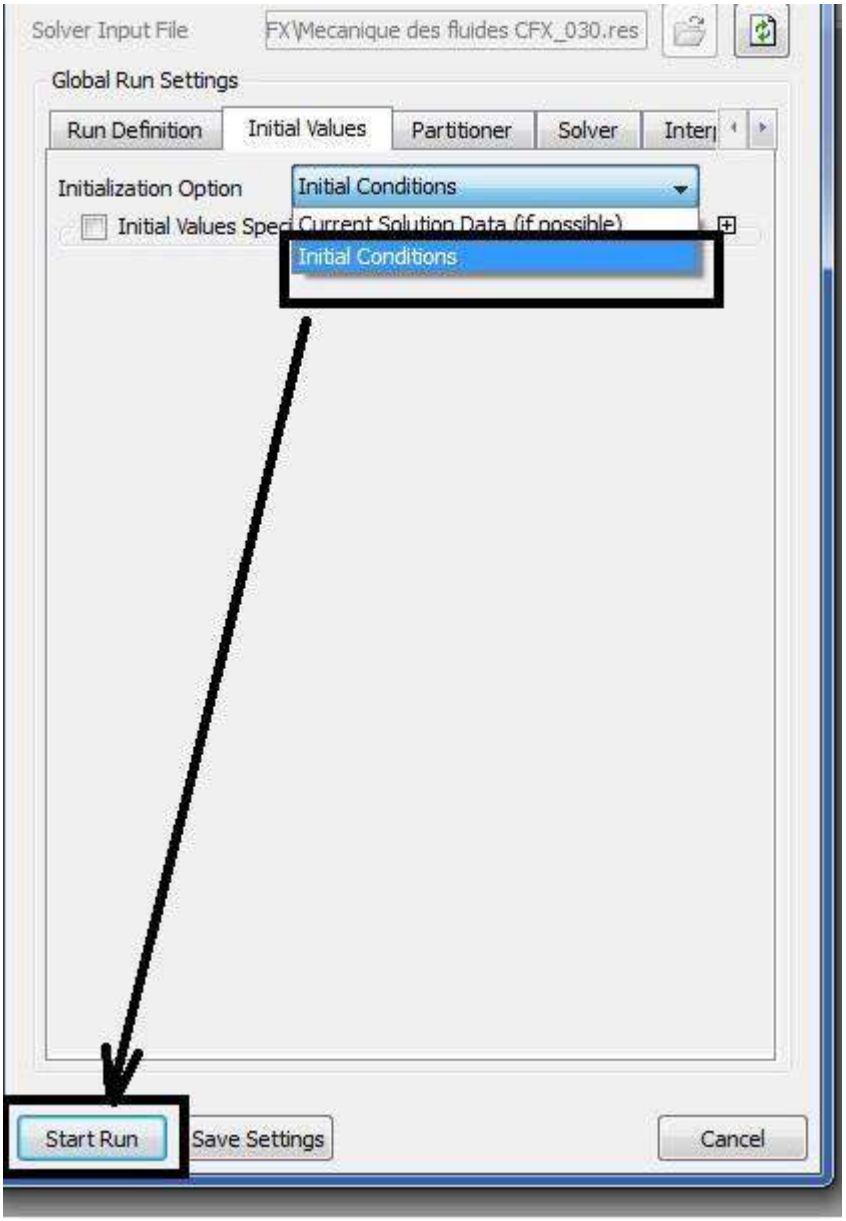
(III.16)



(III.17)



23 : choisir les valeurs initiales **(III.18)**


Solver Input File
FX\Mecanique des fluides CFX_030.res
Global Run Settings
Run Definition
Initial Values
Partitioner
Solver
Initialization Option
Initial Conditions
Initial Values Spec
Current Solution Data (if possible)
Initial Conditions
Start Run
Save Settings
Cancel

(III.19)