République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Yahia Fares de Médéa

Faculté de la Technologie

Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique et Thermique des Systèmes

THEME :

APPROCHE ANALYTIQUE POUR LA DETERMINATION DE LA TEMPERATURE ET DE LA VITESSE D'UN JET DE PLASMA D'ARGON DECHARGEANT DANS L'AIR AMBIANT

Présenter par :

SADOUDI OUSSAMA

RAHMOUNI ABDELKRIM

Dirigé par : Pr. Mohamed ANNOUN

Juin 2017

Résumé:

Le but de notre travail est de déterminer la température et la vitesse le long d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air ambiant par une méthode analytique basé sur le théorème de CROCCO. En premier lieu nous avons examiné l'effet de la puissance, du débit d'argon et du diamètre de la buse sur la température et la vitesse à la buse. Ensuite le profil de température axiale et radiale a été établit à partir des mesures de la concentration d'argon pour différents valeurs de débit et de puissance effective.

Mots clés: Plasma thermique, Jet de plasma thermique, sondes enthalpique, Théorème de CROCCO

ملخص:

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد درجة حرارة و سرعة جزيئات الارغون على طول قذف البلازما بتفريغها في الهواء باستعمال نظرية تحليلية تعتمد على نظرية كروكو . في بداية الأمر قمنا باختبار تأثير كل من الطاقة و التدفق و القطر على درجات الحرارة و السرعة عند الفوهة و في الخطوة التي تليها استطعنا أن نتحصل على درجات الحرارة عن طريق قياسات سابقة لتراكيز الأرغون من أجل قيم متعددة للتدفق و الطاقة الفعالة .

الكلمات المفتاحية : البلازما الحرارية ، قذف بلازما ، مسبر حراري ، نظرية كروكو.

Abstract:

The aim of our study is to determine the value of temperature and velocity along of Argon plasma jet discharged in the ambient air using an analytical method based on CROCO's theory. Firstly we have examined the effect of power, Argon flow and diameter on temperature and velocity of nozzle then we have deduced the axial and radial temperature profile from the measuring of Argon concentration for different values of flow and effective power.

Keyword: Thermal Plasma, Thermal Plasma jet, Thermal sensors, CROCCO Theorem

REMERCIMENTS



Ce travail à été réalisé au sein de la faculté de technologie, département de génie mécanique de l'Université de MEDEA.

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadrant **Dr. ANNOUN MOHAMED**, Professeur à l'Université de MEDEA pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères à madame **KACIMI HABIBA** qui nous a apporté leur aide et qui a contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à **Dr. ZERARI MOUNIR,** Maitre de conférences à l'Université de MEDEA, qui nous a fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Nous remercions aussi **Dr. ZIANE KECHEDI**, Maitre Assistant A à l'Université de MEDEA, pour l'intérêt et l'honneur qu'il ma fait en acceptant d'examiner notre travail.

Nos remerciements vont encore à madame **KACIMI HABIBA**, Maitre Assistante A à l'Université de MEDEA, pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant d'examiner notre travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, on remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIERES

Chapitre I : Généralités sur les plasmas thermiques

I.1 Définition **3**

I.2 Classification des plasmas **4**

I.2.1 Plasma chaud 4

I.2.2 Plasma froid 4

I.2.3 Plasma de basse pression 4

I.2.4 Plasma de haute pression 4

I.3 Génération d'un plasma thermique **5**

I.4 Propriétés des plasmas thermiques **7**

I.4.1Température et vitesse 7

I.4.2 Enthalpie des plasmas 8

I.4.3 Chaleur spécifique 9

I.4.4 La viscosité 9

I.4.5 La conductivité thermique 10

I. 5 Application de la technologie de plasma **11**

I.5.1 Projection plasma 11

I.5.2 Traitement de déchets 12

I.6 Avantages des procédés de plasma thermique **13**

I.7 Techniques de mesure de la température d'un plasma thermique **13**

I.7.1 Les thermocouples 13

I.7.2 Pyrométrie 15

I.7.3 Les sondes enthalpiques 15

I.7.4 Techniques Optiques 15

I.8 Conclusion 16

Chapitre II : Le jet de plasma

II.1 Introduction **17**

II.2 Description d'un jet de plasma **17**

II.3 Modélisation d'un jet de plasma **19**

II.4 Modèle simplifié de jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air **20**

II.4.1 Expression de la Vitesse 20
II.4.2 Expression de la température du jet 20
II.5 Travaux antérieurs **21**
II.6 Conclusion **24**

Chapitre III : Résultat du modèle

III.1 Introduction **25**
III.2 Température et vitesse à la buse **25**
III.2.1 Effet du débit d'argon Q sur la température du plasma T_0 27
III.2.2 Effet du diamètre D de la buse sur la température du plasma T_0 28
III.3 Température et vitesse le long du jet **29**
III.3.1 Théorème de CROCCO 29
III.3.2 Validation du modèle 31
III.3.3 Effet de la puissance effective sur la température et la vitesse centrales du jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air 32
III.3.4 Evolution radiale de la température et de la vitesse le long du jet 34
CONCLUSION **37**
REFERENCES BIBIOGRAPHIQUES **38**

LISTE DES FIGURES

Figure I.1.Evolutions avec la pression de la température du gaz et des électrons à courant constant 5
Figure I.2.Torche a plasma 6
Figure I.3.Champ de température écoulement de plasma Ar-H_2 7
Figure I.4.Champ de vitesse dans écoulement de plasma Ar-H_2 8
Figure I.5.Enthalpie de plasma Ar et Ar-H_2 en fonction de la température 8
Figure I.6.capacité calorifique de plasma d'argon, d'hydrogène et d'hélium en fonction de la température 9
Figure I.7.viscosité de plasma Ar et Ar-H_2 a la pression atmosphérique 10
Figure I.8.conductivité thermique de plasma Ar et Ar-H_2 11
Figure I.9.Principe de la projection plasma 12
Figure II.1. Structure d'un jet 18
Figure II.2. Jet plasma déchargeant dans l'air 18
Figure II.3.Profile de température axiale d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air pour plusieurs puissances 21
Figure II.4. Variation de la température le long de l'axe du plasma d'argon pour différent puissances 22
Figure II.5.Concentration axial d'Argon 23
Figure II.6.Température axiale du jet de plasma d'argon 23
Figure II.7.concentration radiale d'argon 24
Figure III.1.Température T_0 en fonction de P 26
Figure III.2. Vitesse U_0 en fonction de P 27
Figure III.3. Variation de T_0 en fonction de P pour diverses valeurs du débit d'argon 28
Figure III.4. Variation de T_0 en fonction de P pour différentes valeurs de diamètre de buse D 29
Figure III.5. Evolution de la température centrale du jet (Pfender et modèle) 31
Figure III.6. Effet de la puissance sur la température centrale du jet 32
Figure III.7. Effet de la puissance sur la vitesse centrale du jet 33
Figure III.8. Effet de la puissance sur la température central du jet 33

LISTE DES FIGURES

Figure III.9. Effet de la puissance sur la vitesse centrale du jet 34
Figure III.10. Température radiale le long du jet à différentes valeurs Z 35
Figure III.11. Vitesse radiale le long du jet à différentes valeurs Z 35
Figure III.12. Température radiale le long du jet à différentes valeurs Z 36
Figure III.13. Vitesse radiale le long du jet à différentes valeurs Z 36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1.Propriétés des thermocouples pour les hautes températures 14

NOMENCLATURE

A, B, C et D	Constantes déduites des conditions aux limites	-
a ,b ,c	Coefficients de l'équation de bilan énergétique	-
C_{Argon}	Concentration d'argon	-
C_p	La chaleur spécifique d'Argon	$(j\ Kg^{-1}{}^{\circ}K^{-1})$
D	Diamètre de la buse	(m)
E	Energie	(w)
h	Enthalpie	$(j\ Kg^{-1})$
h_{air}	Enthalpie de l'air ambiant	$(j\ Kg^{-1})$
h_T^{Ar}	Enthalpie totale du jet à la buse	$(j\ Kg^{-1})$
h_0^{Ar}	Enthalpie de l'argon a la buse	$(j\ Kg^{-1})$
I	Courant électrique	(A)
p	Pression	(atm)
P	Puissance électrique	(w)
P_{eff}	Puissance effective	(w)
Q	Débit volumique	$(l\ mn^{-1})$
r	Rayon de la buse	(m)
r_i	Rayon du cœur	(m)

r_5	Rayon où la vitesse u est la moitié de sa valeur sur l'axe du jet	(m)
T_a	Température du gaz à la température du laboratoire	($°K$)
T_e	Température d'électron	($°K$)
T_g	Température de gaz	($°K$)
T_0	Température du jet à la buse	($°K$)
U_a	Vitesse du gaz en sortie de la buse dans les conditions de pression et de température du laboratoire	($m\ s^{-1}$)
u_0	Vitesse du jet à la buse	($m\ s^{-1}$)
X	Fraction d'un constituant de l'écoulement	-
X_c	Longueur de la région du cœur	(m)
Z	Longueur du jet	(m)
λ	Conductivité thermique	($w\ °K^{-1}m^{-1}$)
μ	Viscosité thermique de plasma	($kg\ m^{-1}s^{-1}$)
ρ	Masse volumique d'Argon à la température du laboratoire	($Kg\ m^{3^{-1}}$)

INTRODUCTION GENERALE

Introduction

Les plasmas thermiques en raison de leurs réactivités et efficacités sont vastement utilisés dans des nombreux domaines notamment en métallurgie dans la projection pour le revêtement des matériaux et dans le domaine de l'environnement pour le traitement des déchets toxiques et la décomposition des molécules organiques nocives pour la santé humaine et pour l'environnement. Cependant la maîtrise des procédés de plasmas thermique nécessite la connaissance des propriétés thermodynamiques et de transports, de la température et de vitesse du plasma en fonction des conditions opératoires imposées. En effet, la détermination de ces paramètres nécessite des moyens expérimentaux très couteux et souvent n'est pas facile à acquérir. Il existe aussi les moyens de la simulation numérique qui elle aussi nécessite des codes de calculs très avancés et n'est à la porté de tout les chercheurs vu leurs prix qui sont exorbitants par rapport à nos moyens financiers.

C'est pourquoi des chercheurs essayent de proposer des approches analytiques ou semi analytiques qui sont économique (temps et argent) et offrent l'avantage d'emploi très simple. c'est dans cette optique que nous proposons dans ce projet une approche analytique déduite du théorème de CROCOO qui permet de déterminer la température et la vitesse en tout point du jet de plasma thermique d'argon déchargeant dans l'air ambiant et ce à partir de la concentration d'argon.

Ce travail s'articule autour de trois chapitres. Dans le premier chapitre on a donné quelques notions bibliographiques sur les plasmas thermiques et leurs

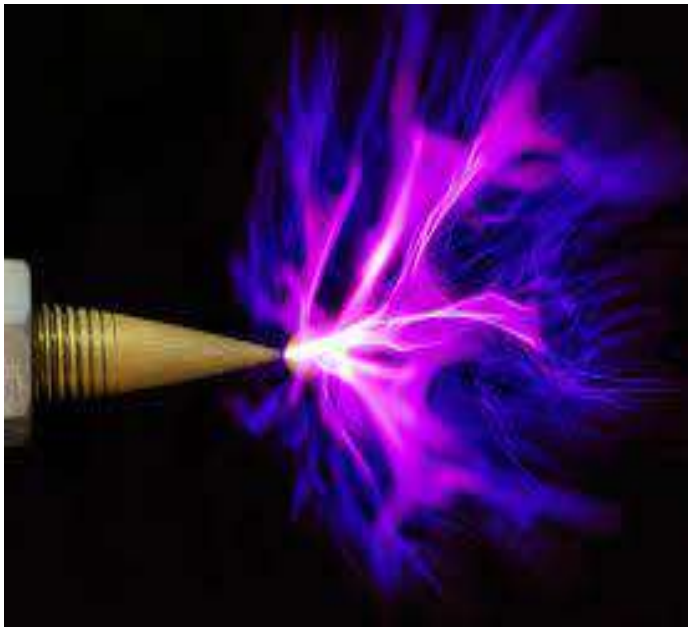
propriétés thermodynamiques et de transport ainsi que l'application de cette technologie dans les divers domaines. Enfin on a présenté quelques techniques expérimentales les plus utilisés pour la mesure de la température dans un plasma thermique.

Le deuxième chapitre vise les jets de plasma thermiques il consiste d'une définition de ce terme, en suite nous présentons quelques travaux disponibles dans la littérature et qui nous semblent très signifiante pour notre études.

La présentation de l'approche analytique et l'ensemble des résultats relatifs à la température et la vitesse à la sortie de la buse, le long du jet et radiale seront proposés dans le troisième chapitre.

Chapitre I :

Généralités sur les plasmas thermiques



I.1 Définition

Un plasma est un gaz ionisé électriquement neutre constitué généralement d'électrons d'ions, des espèces atomiques ou moléculaires et des photons. Cette état de matière nécessite un apport d'énergie ΔE pour faire excité les atomes du gaz .

Les plasmas sont souvent connus comme 4^{eme} état de la matière, faisant suite aux autres phases connu de la matière.

Solide ⟹ **liquide** ⟹ **gaz** ⟹ **plasma**

ΔE ΔE ΔE

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).

Les plasmas sont des milieux chimiquement actifs. Selon la manière dont ils sont activés et leur puissance, ils peuvent générer des basses ou très hautes températures et sont appelés en conséquence plasmas froids ou plasmas thermiques, Cette large gamme de température permet diverses applications : revêtements de surface, destruction de déchets, traitements de gaz, synthèse chimique, [1]

L'évolution de la technologie de plasma n'a pas cessé d'évoluer au cours des années, passant d'un outil à découvrir à un outil industriel très reconnue.

I.2 Classification des plasmas

Selon le degré d'ionisation du gaz, les plasmas peuvent être classés en deux catégories : [2]

I.2.1 Plasma chaud : Ce type de plasma est caractérisé par une degré d'ionisation très élevé, elle est presque égal à l'unité.

Alors le gaz plasmagène est presque totalement ionisé, pour cet effet, la température est très élevée et peut atteindre plusieurs million de degrés et ceci est trouvé généralement dans les réacteurs de fusion nucléaires.

I.2.2 Plasma froid : Les plasmas froids sont caractérisés par un degré d'ionisation partiel qui très souvent peuvent atteindre jusqu'à 50% ; la température reste modérément élevée allant de 3000 à 20000 °K. Ce type de plasma est très connu dans le domaine industriel.

Les plasmas froids à leur tour se divisent en très nombreux types de plasma selon la pression du milieu, leur état physique, et essentiellement l'énergie des électrons et leur densité.

I.2.3 Plasma de basse pression : Le rapport entre la température des électrons T_e et celle du gaz T_g est compris entre 10 et 100 et ce comme le montre la (Figure I.1).

Ce type de plasma est dit hors équilibre, il est parfaitement adapté pour le traitement des matériaux ou aux réactions chimiques entre matériaux très sensibles aux gradients de températures.

I.2.4 Plasma de haute pression : Dans ce type de plasma la température électronique et la température des espèces sont égaux voir (Figure I.1). Il est appelé aussi « plasma thermique », la pression est de l'ordre de 1atm et la température varie entre 2000 à 15000 °K.

On peut trouver ce type dans plusieurs domaines tel que : la projection, la vitrification, le traitement des déchets solides.

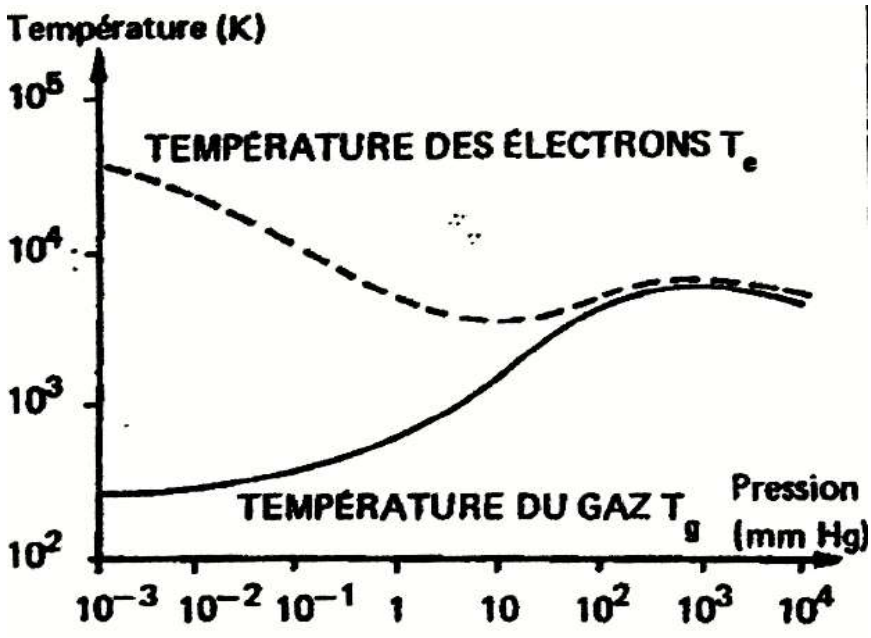


Figure I.1 : Evolutions avec la pression de la température du gaz et des électrons a courant constant [3]

Parmi tous les types de plasma que nous avons cité, celui qui va faire l'objet de notre mémoire est le plasma thermique déchargeant dans l'air ambiant.

I.3 Génération d'un plasma thermique

A la différence des autres types de plasma, les plasmas thermiques sont généralement produits par des arcs électriques générés par décharge entre la cathode et l'anode à la pression atmosphérique. Dans ce type de plasma le gaz plasmagène est partiellement ou fortement ionisé tout dépend de l'intensité de l'arc électrique; il est à noter que les gaz fortement ionisés peuvent atteindre 20000 K.

Le dispositif expérimentale pour la génération de plasma thermique par les arcs électriques est appelé torche ou chalumeau à plasma.

La puissance électrique dans ce types de plasmas est comprise entre 0.5 kW a 8 kW, elles sont surtout utilisées pour les opérations de traitement des surfaces elle se compose de deux électrodes concentriques, l'anode et la cathode. La torche est alimenté par un gaz plasmagène et un arc est crée entre les deux électrodes de la torche comme le montre la Figure I.2, Au contact de l'arc électrique, la température et

la vitesse du gaz plasmagène augmentent d'une manière considérable ce qui entraine à l'ionisation du gaz et par conséquent à la production du plasma thermique

L'anode appelée aussi la buse, elle est généralement conçue par un matériau réfractaire à profil interne convergeant afin d'assurer la sortie du jet de plasma libre avec une bonne striction. Quant à la cathode, généralement fabriquée en tungstène, elle est sertie dans un support et centrée autour de la buse à fin d'assurer un arc électrique homogène entre les deux électrodes pour l'obtention d'un plasma plus stable. Le chalumeau (anode + cathode) est alimenté par une source électrique (courant continue et tension)

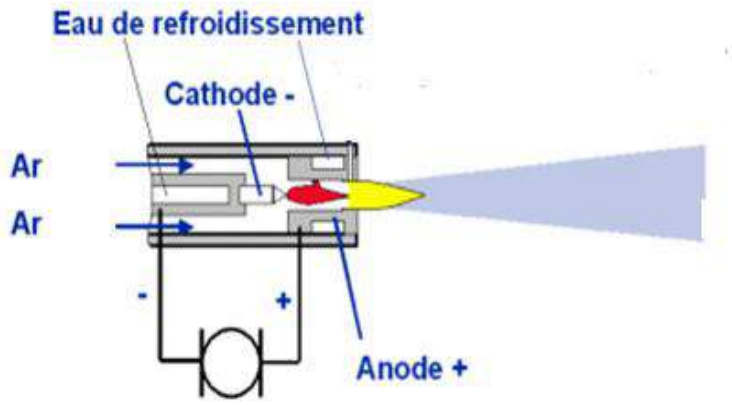


Figure I.2: Torche a plasma

I.4 Propriétés des plasmas thermiques

La maitrise des procédés des plasmas thermiques nécessite la connaissance des propriétés thermo physiques et leurs évolutions en fonction de la température du milieu. C'est pourquoi dans ce paragraphe nous avons jugé utile de présenter la variation de température et de vitesse dans le jet de plasma d'argon et aussi quelques propriétés thermodynamique et coefficient de transport qui jouent un rôle très important dans l'étude des aspects thermique et hydrodynamiques des plasmas.

I.4.1 *Température et vitesse :*

Quand un jet de plasma issu d'une torche se décharge dans l'atmosphère la température et la vitesse de l'écoulement du plasma varient axialement et radialement. En effet la Figure I.3 et la Figure I.4, illustre la variation spatiale de la température et de la vitesse d'un plasma d'argon-hydrogène déchargeant dans l'air. La température varie entre 1000°C et 12000°C quant à la vitesse est comprise entre 100 et 580m/s. ces figures nous donnent une idée sur l'ordre de grandeur des températures et vitesses des écoulements plasma.

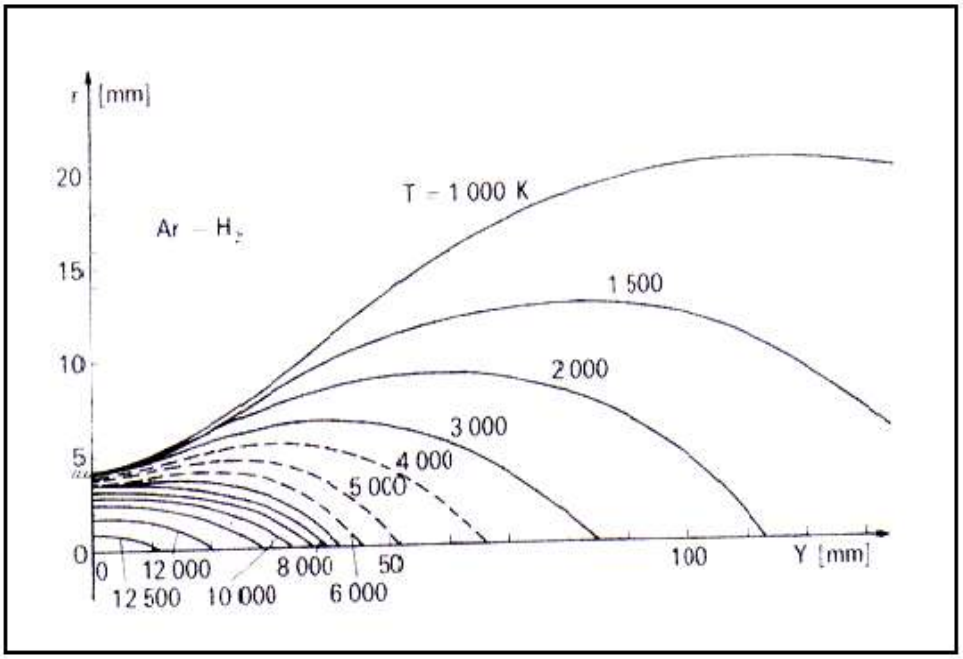


Figure I. 3 : Champ de température écoulement de plasma Ar-H_2 [4]

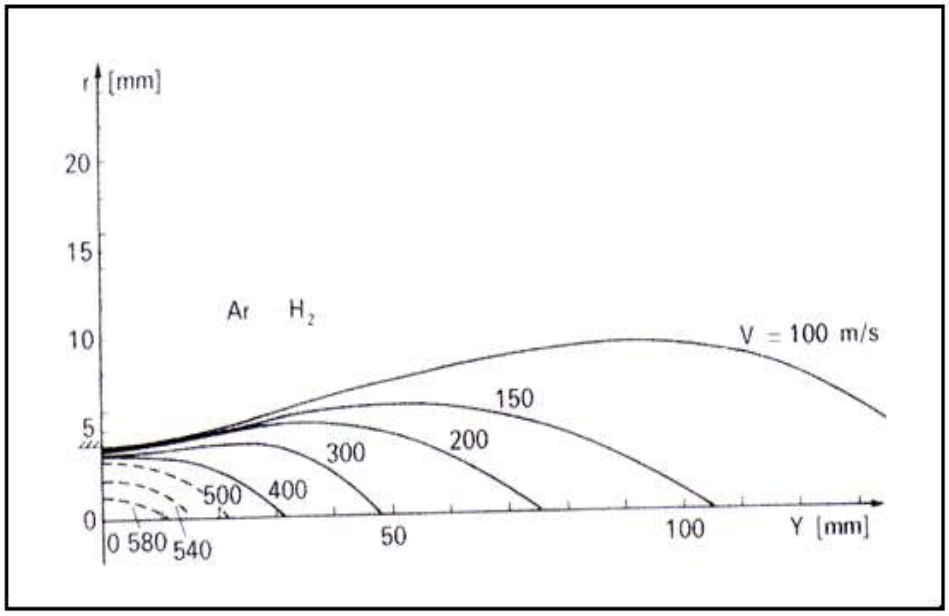


Figure I.4 : Champ de vitesse dans écoulement de plasma Ar-H_2 [4]

I.4.*2 Enthalpie des plasmas :*

La Figure I.5 montre l'évolution de l'enthalpie en fonction de la température de l'argon, l'hydrogène et du mélange argon-hydrogène, on note que l'enthalpie augmente en fonction de la température. Cette augmentation est plus importante lors de l'addition de l'hydrogène à l'argon, elle entraine l'augmentation de l'enthalpie du plasma.

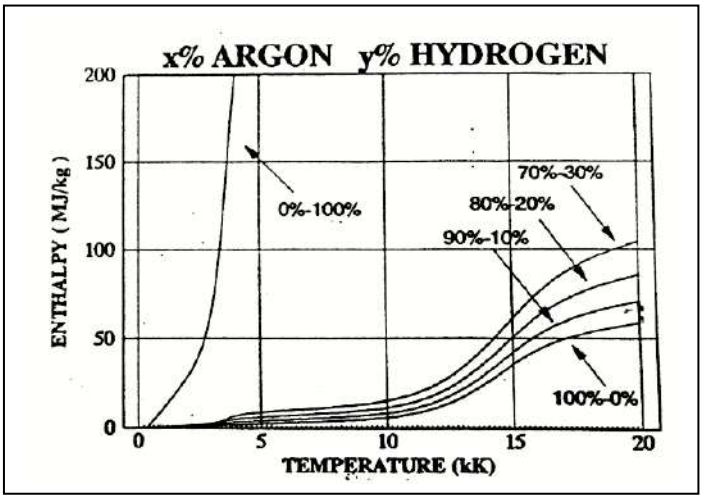


Figure I.5 : Enthalpie de plasma Ar et Ar-H_2 en fonction de la température a p=1atm-[3]

I.4.*3 Chaleur spécifique :*

Sur 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.

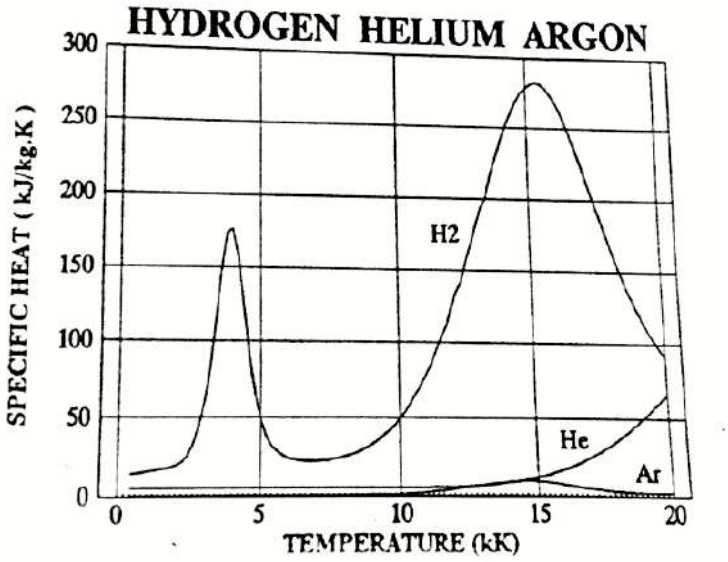


Figure I.6: Capacité calorifique de plasma d'argon, d'hydrogène et d'hélium en fonction de la température p= 1atm [3]

I.4.4 *La viscosité :*

La viscosité comme terme exprime la résistance du fluide à l'écoulement se qui fait apparaitre un gradient de vitesse dans le milieu plasma. Comme le montre la Figure I.7 la viscosité d'un plasma argon-hydrogène augmente avec la température et présente un maximum correspondant à la température d'ionisation du gaz plasmagène. On note aussi que la viscosité diminue avec le pourcentage d'hydrogène dans le mélange.

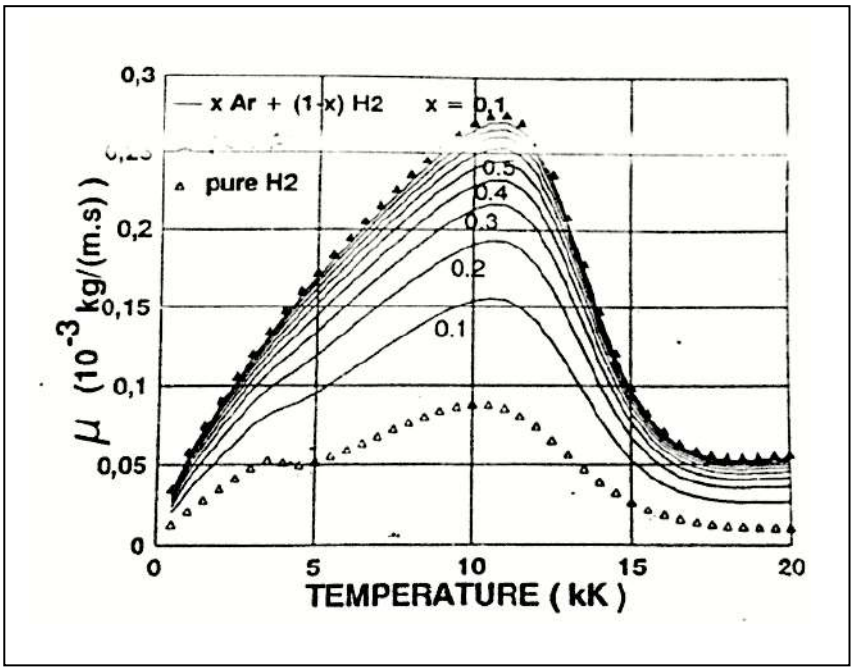
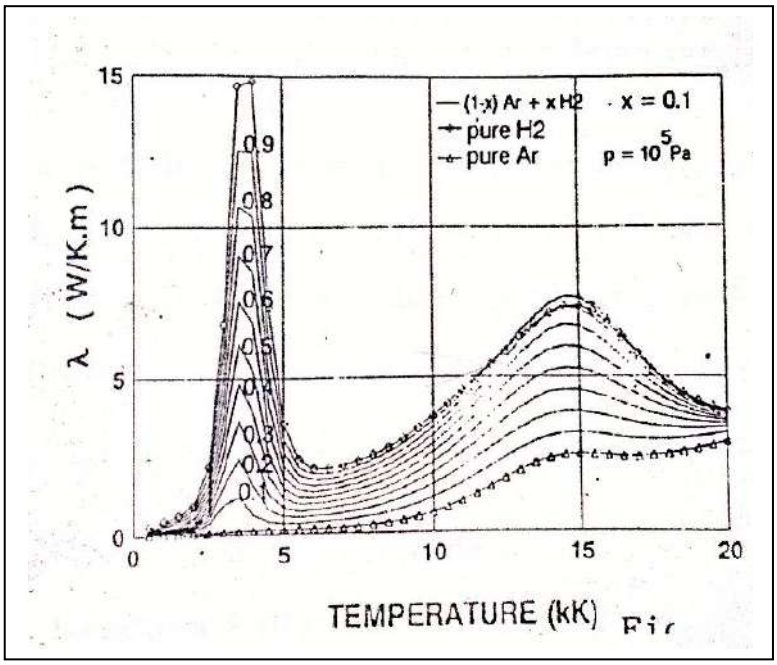


Figure I.7: Viscosité de plasma Ar et Ar-H_2 a la pression atmosphérique [3]

I.4.*5 La conductivité thermique :*

Comme définition la conductivité thermique représente le transfert de chaleur dû au gradient de température, la Figure I.8 illustre l'évolution de la conductivité thermique du plasma argon-hydrogène en fonction de la température. Il est à noté que la conductivité thermique est une fonction croissante de la température et présente un pic (maximum) à la température d'ionisation, on note aussi que l'ajout de l'hydrogène contribue à l'accroissement de conductivité thermique du plasma.



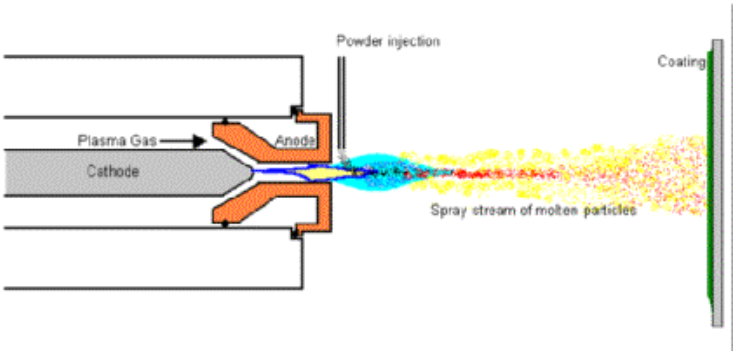
-Figure I.8: Conductivité thermique de plasma Ar et Ar-H_2-[3]

I. 5 Application de la technologie de plasma :

Le système a plasma d'arc soufflée trouve beaucoup d'application dans le domaine industrielle notamment 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.5.*1 Projection plasma* :

Comme le montre la Figure I.9 la projection plasma consiste à projeter de fines particules préalablement introduit dans le jet de plasma thermique au moyen d'un tube sur un substrat. Sous l'effet de la vitesse et température du jet plasma les particules arrivent à grande vitesse à l'état de fusion avancée et s'écrasent sur le substrat et se refroidissent rapidement pour former le dépôt [5]. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts finement structurés de bonnes qualités pour différentes applications on site par exemple la résistance à l'usure, à la corrosion et aux chocs thermiques.



-Figure I.9 : Principe de la projection plasma

I.5.2 Traitement de déchets:

les procédés classique de traitement ou destruction des déchets tel que l'incinération ne sont pas vraiment appropriés surtout dans le cas des déchets hautement toxiques où dans le cas des molécules toxiques qui sont stables car l'expérience a montrés que dans ce type de procédé de traitement les résidus non brulé sont de l'ordre de 8% ce qui constitue un danger permanent à la santé publique. C'est pourquoi la technologie de plasma thermique est intervenue dans ce domaine pour offrir un traitement efficace ou les résidus sont presque anéantis. Ci dessous on donne quelques traitements qui se font par les procédés de plasma thermiques :

- Destruction des déchets gazeux et plus particulièrement les CFC [6], et des substances organiques.
- Incinération de déchets spéciaux, tels certain déchets hospitaliers contaminés [7]
- Vitrification des résidus d'épurations des fumées issues de l'incinération des ordures ménagers [8]
- Vitrification des déchets contenant de l'amiante.
- Recyclage des métaux nobles des poussiers d'aciérie électrique

I.6 Avantages des procédés de plasma thermique

- La température des plasmas thermique et les propriétés thermodynamique sont très élevée ce qui constitue un milieu adéquat pour l'augmentation de la vitesse des réactions chimiques (plasma thermique est milieux très réactif)
- Les torches et réacteurs de plasma thermique sont de petites tailles très adaptés pour les applications de revêtement et de traitement de déchets...
- Un éventail de choix des gaz plasmagènes : (argon, hélium, azote, hydrogène, oxygène. par conséquent plusieurs types de traitement chimique peuvent être envisagés (nitrution, réduction, combustion …).
- Les plasmas est considérés comme un procédé allo-thermique c'est-à-dire que l'énergie est apporté au sein même des milieux réactionnel et non pas a travers d'une paroi.

I.7 Techniques de mesure de la température d'un plasma thermique

La connaissance de la température dans l'écoulement de plasma thermique est indispensable pour la maitrise des procédés de projection plasma et réacteurs plasmas destinés aux traitements des déchets. Dans la pratique il existe plusieurs techniques de mesures de température, dans ce paragraphe on cite quelques techniques qui sont très adaptées dans le domaine de la métrologie pour la caractérisation des plasmas thermiques

I.7.1 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 [9].

Tableau II.1- Propriétés des thermocouples pour les hautes températures [9].

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.7.2 Pyrométrie

Le principe consiste à mesurer le rayonnement thermique issu d'un corps directement plongé dans le plasma thermique. La mesure de ce rayonnement peut être effectuer au moyen d'un système optique tel que une fibre, un pyromètre ou par thermographie infrarouge. Le rayonnement requis est proportionnelle à la température du fil. Une fois la température du fil est déterminée la température du plasma est calculée au moyen d'un bilan thermique.

I.7.3 Les sondes enthalpiques [10]:

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.

I.7.4 Techniques Optiques :

Les techniques de mesures que nous avons signalées ci dessus comporte un inconvénient majeur du à l'immersion de la sonde dans la veine du fluide chaud ce qui perturbe l'écoulement et par conséquent d'autre phénomènes apparaissent tel que onde de choc et frottement qu'il faut tenir en compte pour corrigé la température mesurée. Des méthodes optique ont été développées appelées aussi techniques de mesures non intrusives qui ont l'avantage d'être sans contact et de ne pas perturber l'écoulement et aussi posséder un temps de réponse plus faible que les autres méthodes puisque les phénomènes d'inerties thermique n'intervient pas. Parmi les méthodes optiques on cite:

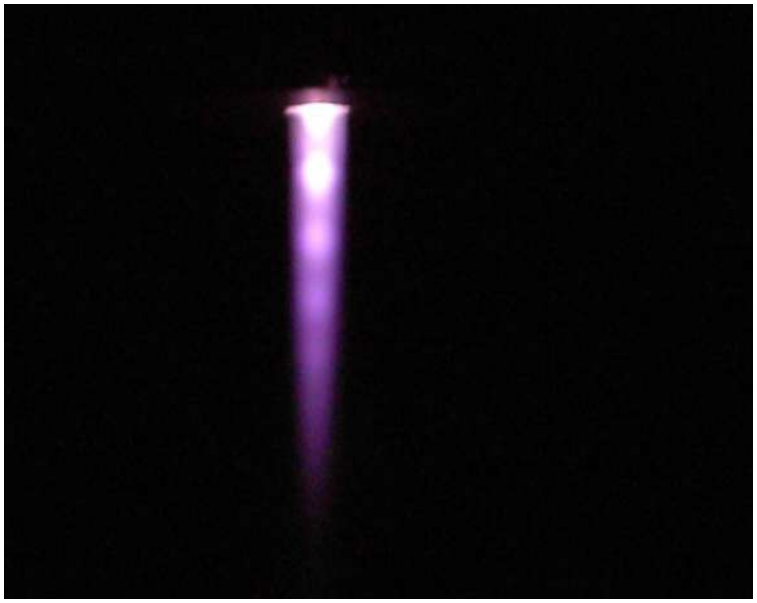
- Pyrométrie optique et thermographie infrarouge
- Spectroscopie atomique et moléculaire
- Techniques Laser

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons définie ce que c'est plasma thermique et nous avons aussi présenté l'évolution de ces propriétés thermodynamiques et de transports en fonction de la température. Nous avons aussi donné un aperçu sur les générateurs de plasma thermique. Finalement nous avons présenté quelques méthodes fréquemment utilisée pour la mesure de la température d'un plasma thermique. Ces informations semblent très utiles pour la compréhension du comportement de ce type de fluide dans ces aspects thermiques et hydrodynamiques.

Chapitre II :

Les jets de plasmas thermiques



II.1 Introduction

L'étude des jets de plasma thermique est extrêmement importante du fait des applications pratiques qu'elle trouve dans le domaine de la projection pour la formation des dépôts et dans le domaine de traitement des déchets pour la décomposition des molécules nuisibles à l'environnement. C'est pourquoi dans ce deuxième chapitre nous présentons en premier lieu la structure d'un jet de plasma déchargeant dans l'air. Dans la deuxième partie, on expose les équations simplifiées gouvernant les jets déchargeant dans l'air et en dernier, on présent quelques travaux antérieurs qui constitues une référence signifiante pour notre travail.

II.2 Description d'un jet de plasma

Sur la base des études expérimentales préalablement décrites dans la littérature sur les jets [11], en générale 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 r_i les propriétés du jet ne son plus constantes.
- Just après apparait la région développée dans laquelle la vitesse et la température axiales varient le long du jet.

Les propriétés dimensionnelles sont présentées dans le paragraphe IV.

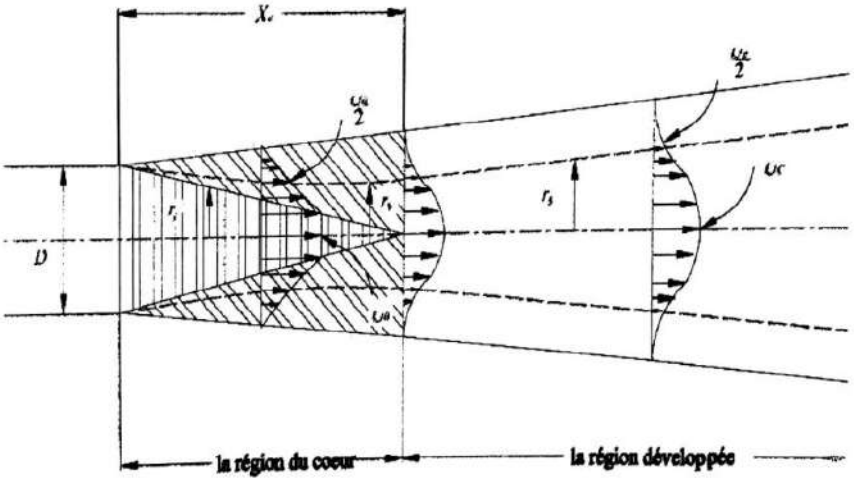


Figure II.1 : *structure d'un jet [12]*

Sur la Figure II.2 nous avons présenté le résultat de la simulation en 3D réalisé au laboratoire SPCTS-UMR CNRS de l'université de Limoge par le code de calcul jets-poudres d'un jet de plasma Ar-H_2 déchargeant dans l'air ambiant. Cette figure illustre l'évolution spatial de la température du jet de plasma le long du jet dans laquelle on voie l'existence de deux régions la région Cœur (en jaune) ou la température est de l'ordre de 11366 K et la région développée (en rouge et bleu dégradé) où la température varie le long du jet.

Gaz plasma	H2-Ar 75% vol
Diamètre interne de la tuyère	7 mm
Débit du gaz	60 L.min-1 (1,25 g.s-1)
Distance de projection	100 mm
Gaz ambiant	Air
Puissance électrique	32 kW
Rendement thermique de la torche	57 %
Puissance dissipée dans le gaz	18240 W

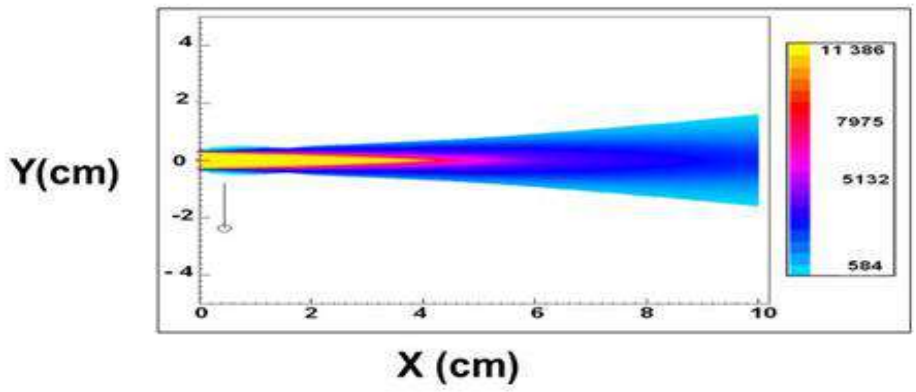


Figure II.2 : *Jet plasma déchargeant dans l'air [13]*

II.3 Modélisation d'un jet de plasma :

L'étude expérimentale des jets de plasma thermique fait appel à des techniques très couteuses et en sus il est très difficile d'exploré tous le jet par une seule technique car la plage de la température est très étendue, par exemple comme pour le cas de plasma Ar-H_2 (voir Figure II.2) on passe 584 jusqu'à 11386 °K. En effet, l'application des techniques des sondes enthalpique reste restreinte a des plage de température comprises entre 2500 a 10000 °K, alors le jet peut facilement dépassé cette valeur [14]. Concernant les techniques par thermocouples, ces dernières ne sont pas bien établie qu'à des plages de température un peut basse entre 1000 a 2500 °K et en plus les pertes par condition et rayonnement induisent des erreurs sur la mesure d'ou la nécessité de rapporté des corrections qui sont très souvent difficile à établir, ce qui limite ce types de mesures. 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. D'ou la résolution numérique de ces équations nécessite l'utilisation des codes de calculs que nous disposons à l'université par exemple ANSYS ou bien COMSOL. Dans cette partie nous n'avons pas jugé utile de présenter ces équations et les modèles de calcul pour la résolution car l'objectif de notre travail est d'exploré le modèle simple pour caractérisé le jet de plasma thermique par la méthode analytique qui est facilement manipulable et d'emploi très simple.

II.4 Modèle simplifié de jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air :

II.4.1 Expression de la Vitesse

Suit à ce que nous avons déjà exposé sur la structure du jet Warren propose deux profiles de vitesses respectivement pour la région du cœur et la région développée [12] :

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

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

λ=ln 2.

II.4.2 *Expression de la température du jet:*

Pour estimer la température local d'un jet ; le théorème de CROCCO déduit des équations de la couche limite, 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 en tous points du jet [12]:

$$h + \frac{U^2}{2} = A.u + B \quad \text{(IV.3)}$$

Et

$$X + \mathrm{C}.u = \mathrm{D} \quad \text{(IV.4)}$$

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).

À partir de l'enthalpie on peut déduire la température du jet

Ce modèle a été développé par Donaldson [12] sur les jets froid et appliqué sur les jets de plasma d'argon par Brahimi [15].

II.5 Travaux antérieurs :

De nombreuses publications traitent les jets de plasma thermique déchargeant dans l'air ambiant. Dans cette partie, nous ne citons que quelque travaux qui nous ont paru plus utiles pour notre travail:

A. Brahimi [15] a utilisé le modèle développé par Donaldson pour le cas d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air. L'auteur a étudié l'effet du diamètre de la buse, le débit du gaz plasmagène et la puissance électrique sur l'évolution axiale et radiale de la température et de la vitesse le long du jet. Toutefois, il a signalé la limitation de ce modèle pour d'autre gaz plasmagène tel que Ar-H_2 et He. La Figure II.3 montre un exemple de ces résultats concernant l'évolution de la température du jet de plasma d'argon en fonction de la puissance effective pour un débit Q_{Ar} = 23,6 l/min et un diamètre de buse D = 8 mm. Cette Figure illustre l'existence de la région cœur ou la température est constante et la région développée caractérisée par un profil décroissant de température le long du jet.

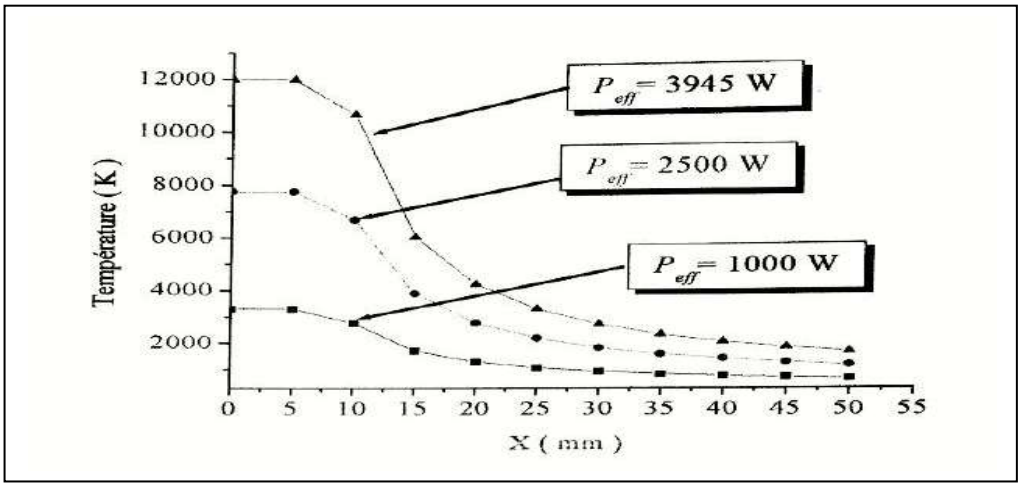
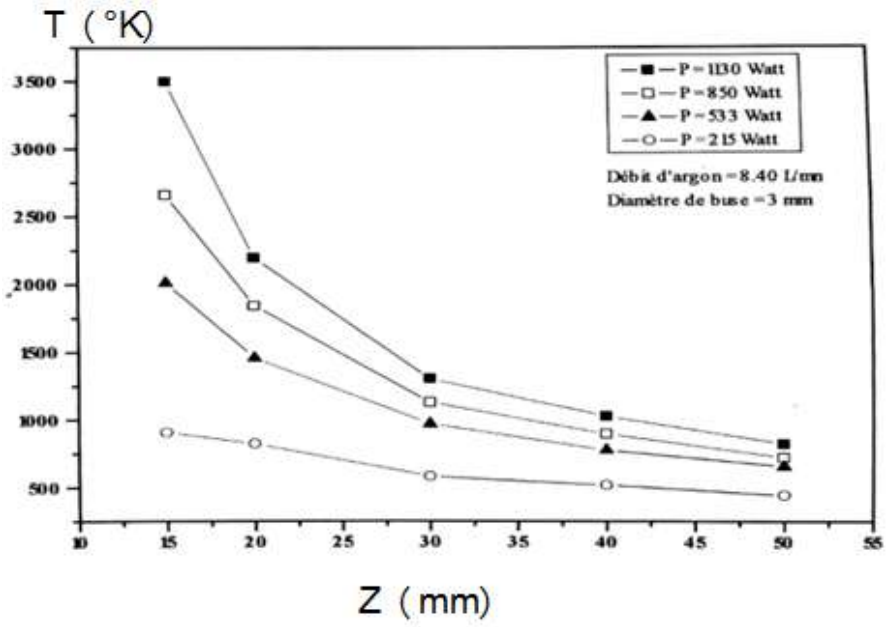


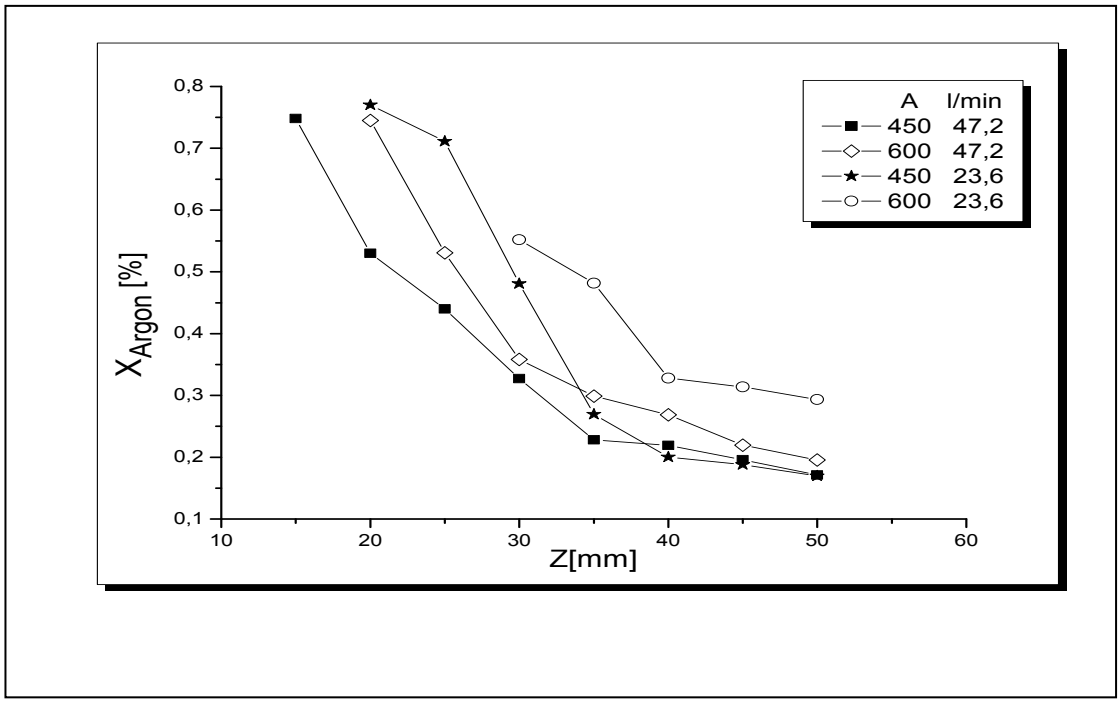
Figure II.3 : *profile de température axiale d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air pour plusieurs puissances [15]*

M ANNOUN et all ont déterminé la température centrale du jet de plasma d'argon par prélèvement local de gaz. L'analyse de la composition du gaz à froid par spectrométrie de masse 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] permet de calculer les compositions du jet à chaud et la température axial du jet [16]. La Figure II.4 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 et des puissances effectives entre 215 et 1130 w.



FigureII.4 : *variation de la température le long de l'axe du plasma d'argon pour différent puissances [16].*

Pfender a mesuré la composition et la température axiales et radiales du jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air ambiant au moyen d'une sonde enthalpique [10]. Les résultats obtenus pour différentes conditions opératoire (débit d'argon et intensité du courant) sont représentés sur les Figures II.5, Figure II.6, Figure II.7, Il a étudié l'effet de la puissance électrique de la torche et le débit d'argon sur la composition et température du jet. Les résultats obtenus montrent que la température le long du jet croit avec l'intensité du courant.



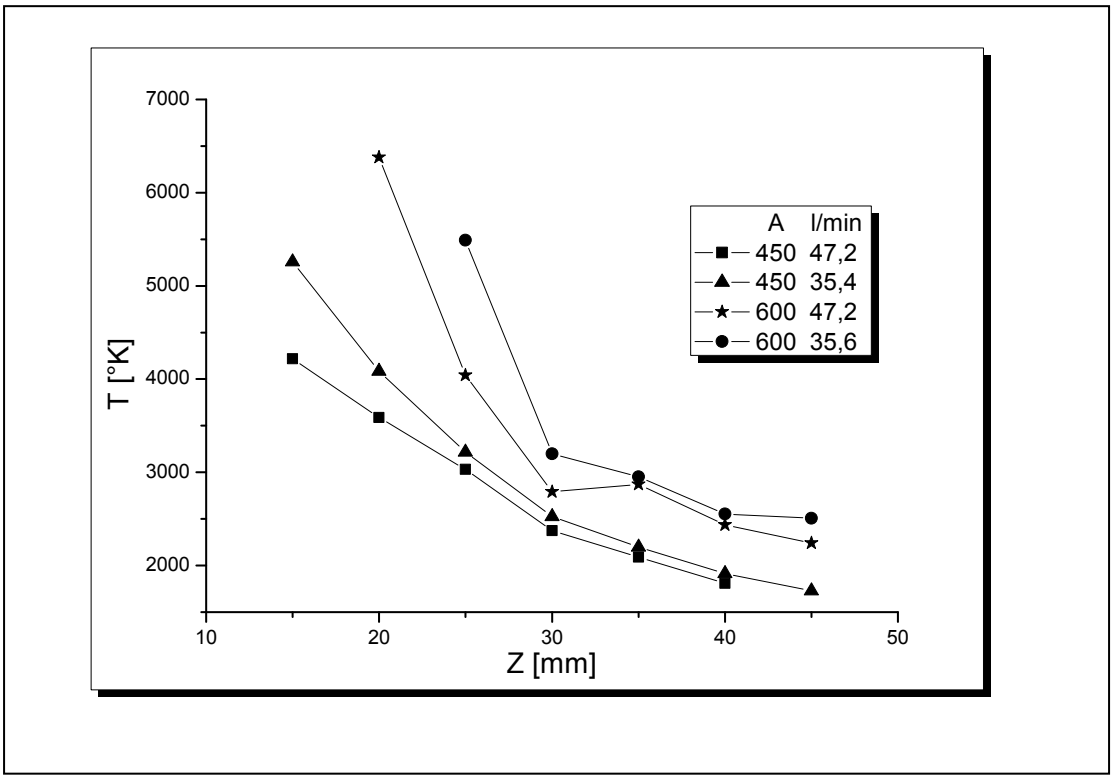


Figure II.6 : *Température axiale du jet de plasma d'argon [10]*

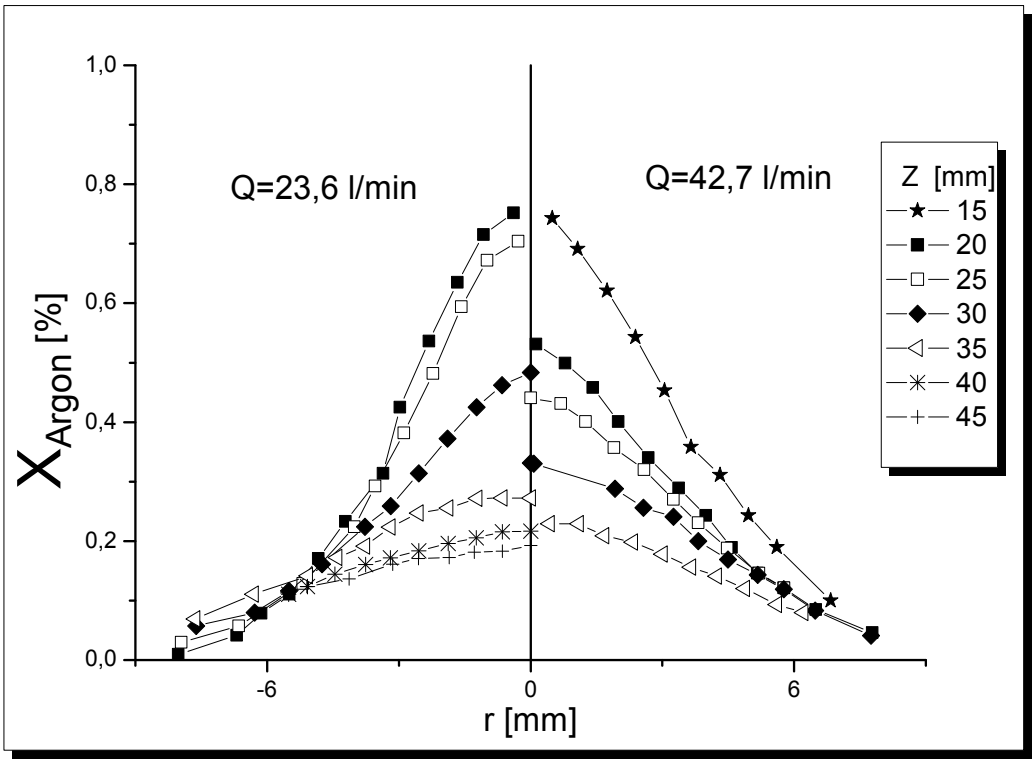


Figure II.7 : *concentration radiale d'argon [10]*

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la structure de jet de plasma thermique et présenté quelques travaux qui sont très utile pour notre travail. De cette étude nous retiendrons les points suivants:

Un jet est composé de deux régions respectivement région cœur et région développée. Dans la région cœur la température et la vitesse centrales sont constante. Alors que dans la région développée elles sont décroissantes.

A la lumière du modèle présenté par Warren et théorème de CROCCO nous retiendrons aussi qu'il existe une relation entre température, composition et vitesse du jet.

Dans le chapitre suivant, nous exploitons le théorème de CROCCO pour évaluer la température et la vitesse du jet à partir de la fraction d'argon mesurée expérimentalement. Les résultats du modèle vont être confrontés avec les résultats expérimentaux trouvés dans la littérature.

Chapitre III :
Résultats et discussion

III.1 Introduction

Rappelons que l'objectif de notre travail est de présenté un modèle d'emploi très simple qui permet d'exploiter les données de la concentration du gaz plasmagène disponibles dans la littérature [10], cas argon pour notre étude, pour déterminer la température et la vitesse en tout point du plasma thermique déchargeant dans l'air ambiant le long du jet et ce par application du théorème de Croco. Dans cette partie on va présentée en premier lieu les résultats de la température et vitesse à la sortie de la buse à partir d'un bilan énergétique ensuite la température et la vitesse le long du jet à partir du model.

III.2 Température et vitesse à la buse

La température T_0 et la vitesse U_0 à la sortie de la buse sont déterminées à partir de la puissance effective fournie à l'argon pour générer le jet de plasma. Cette puissance contribue à augmenter l'enthalpie et l'énergie cinétique du gaz et s'exprimer par la relation suivante [16] :

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

Avec :

P: Puissance effective fournie à l'argon

ρ: Masse volumique d'Argon [Kg/m^3] à la température du laboratoire.

Q: Débit d'argon à la température ambiante [m^3/s].

Cp : La chaleur spécifique d'Argon [j/Kg °K].

T_0 : La température moyenne du gaz en sortie de buse [°K].

T_a : La température du gaz à la température du laboratoire (300 °K).

U_0 : La vitesse moyenne du jet de plasma en sortie de buse [m/s].

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

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

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

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

D: Diamètre de la buse

Les expressions (III-1), (III-2) et (III-3) permettent ainsi de déduire T_0 et U_0 :

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

Avec :

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

Les Figure III.1 et III.2 représentent la variation de la température T_0 et de la vitesse U_0 au niveau de la buse en fonction de la puissance effective pour un débit d'argon de 10 l/mn et un diamètre de buse de 4 mm. Ces Figures montrent que T_0 et U_0 augmentent avec de la puissance. En effet, la puissance entraine l'augmentation de l'enthalpie (T_0) et de l'énergie cinétique (U_0) de l'argon.

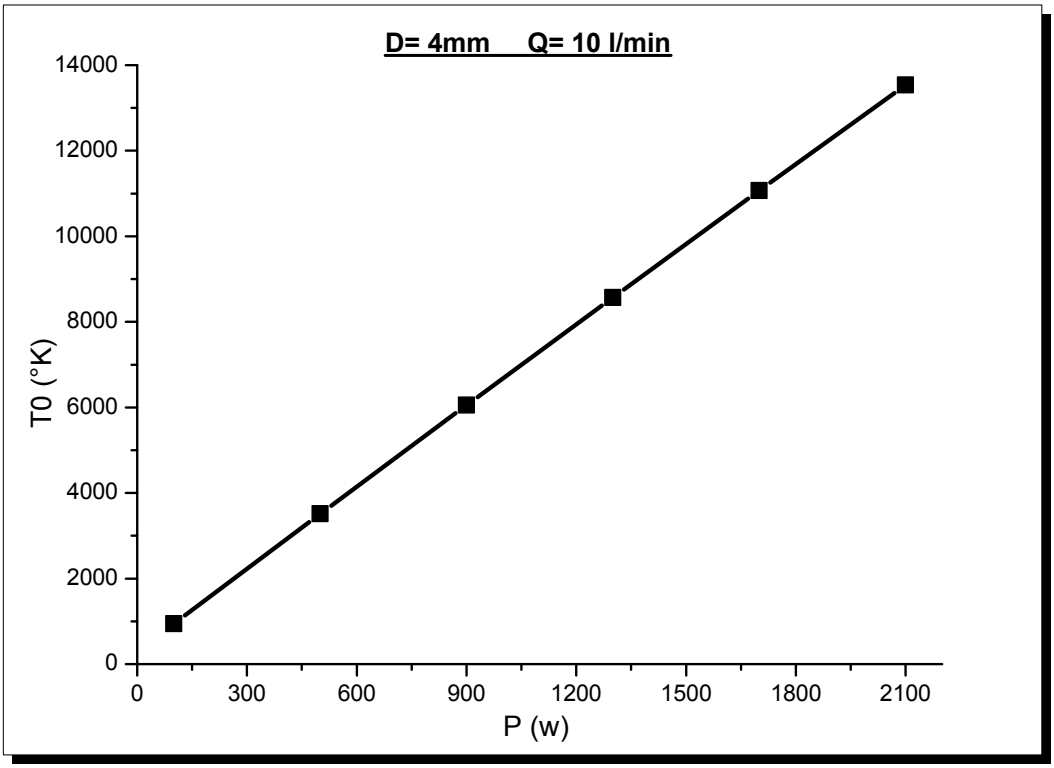


Figure III.1 : *Température T_0 en fonction de P*

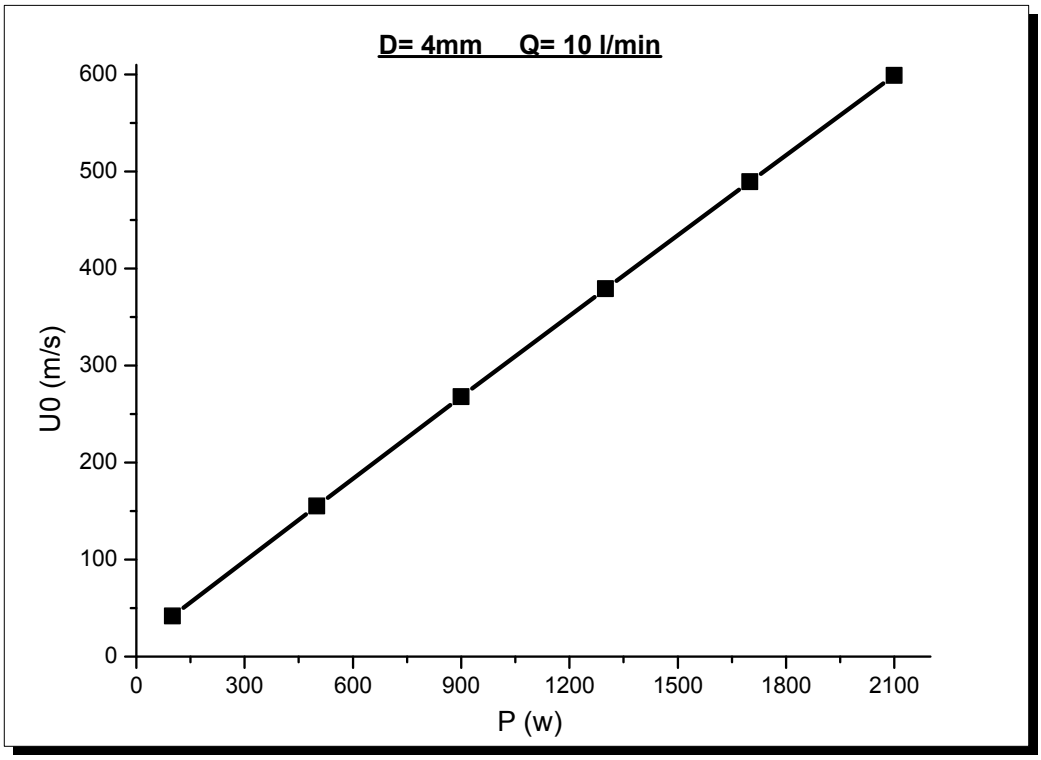


Figure III.2 : *Vitesse U_0 en fonction de P*

III.2.1 Effet du débit d'argon Q sur la température du plasma T_0

Sur la Figure III. 3 nous avons porté la variation de la température T_0 en fonction de la puissance effective obtenues pour différents débits d'argon et un diamètre de buse de 4 mm. Cette Figure montre que l'augmentation du débit d'argon entraine la diminution de la température T_0 du gaz. Ce comportement est dû par le fait que pour une même puissance l'augmentation du débit entraine le refroidissement du plasma.

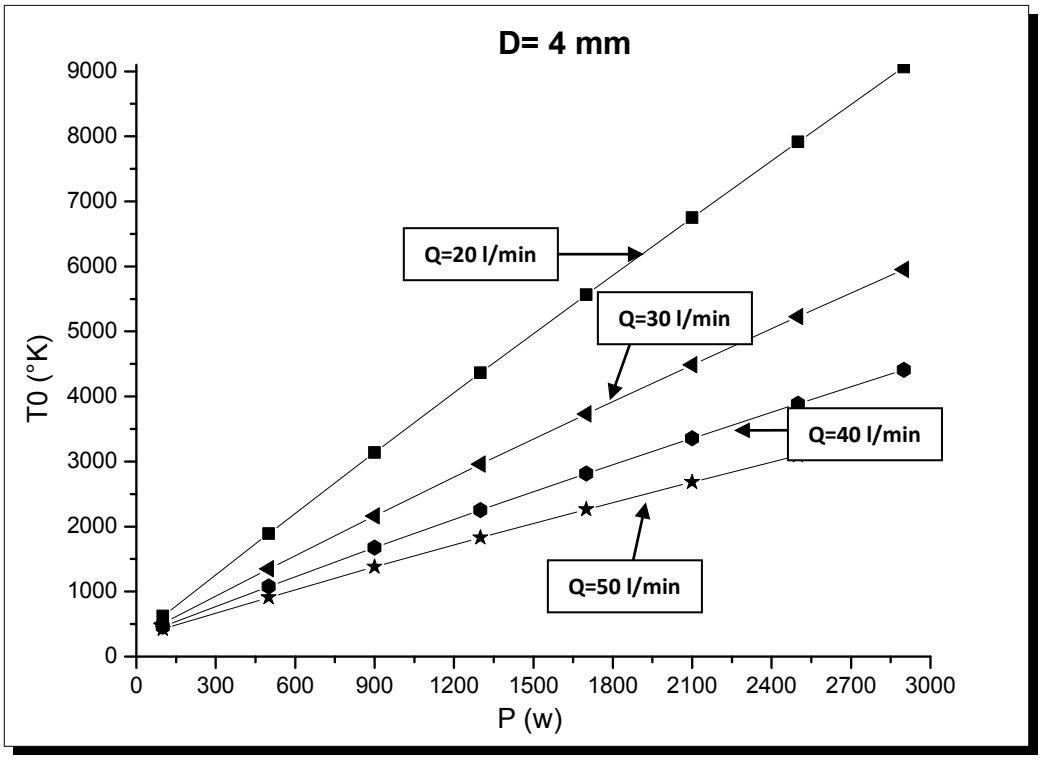


Figure III.3 : *Variation de T_0 en fonction de P pour diverses valeurs du débit d'argon Q*

III.2.2 Effet du diamètre D de la buse sur la température du plasma T_0

La Figure III-4 illustre la variation de la température T_0 en fonction de la puissance effective pour diverses valeurs du diamètre de buse D pour un débit d'argon de 10 l/mn. Sur cette figure on constate que la température T_0 augmente avec le diamètre D. Pour rappel, la buse est l'anode donc l'augmentation du diamètre D se traduit par l'augmentation de la section d'arc entre l'anode et la cathode d'ou la décharge électrique devient importante se qui se traduit physiquement par l'augmentation de la température T_0 du plasma.

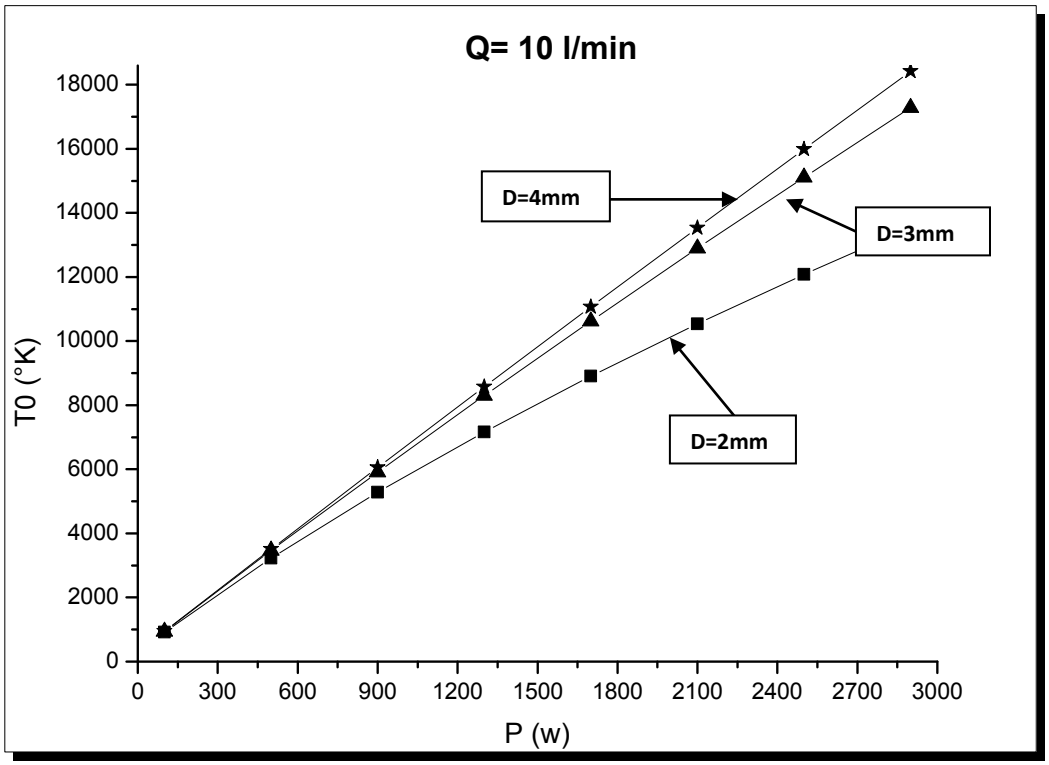


Figure III.4 : *Variation de T_0 en fonction de P pour différentes valeurs de diamètre de buse D*

III.3 Température et vitesse le long du jet

Comme nous l'avons déjà signalé dans le chapitre II la température et vitesse du jet loin de la buse sont déterminées par l'application du théorème de CROCOO

III.3.1 Théorème de CROCCO

Ce théorème stipule que pour un écoulement bidimensionnel en régime d'écoulement établit et des nombres de Prandtl et Schmidt égaux à l'unité l'enthalpie h et la vitesse du gaz U en écoulement en tout point du jet vérifient la relation suivante:

$$h + \frac{U^2}{2} = A.U + B \qquad \text{(III-5)}$$

Et

$$X + \mathrm{C}.U = \mathrm{D} \qquad \text{(III-6)}$$

Avec :

X : fraction d'un constituant de l'écoulement.

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

- à grande distance du jet Z=∞ $U = 0$ soit :

$X_{air} = 1 \longrightarrow D = 1$

$h = h_{air}$ (Enthalpie d l'air à température ambiante) $\longrightarrow B = h_{air}$

- à la buse $U = U_0$ soit :

$X_{air} = 0 \longrightarrow C = \frac{1}{U_0}$

$h = h_T^{Ar}$ (Enthalpie du jet à la buse) $\longrightarrow A = \frac{h_T^{Ar} - h_{air}}{U_0}$

Où h_T^{Ar} désigne l'enthalpie totale du jet à la buse avec :

$h_T^{Ar} = h_0^{Ar} + \frac{U_0^2}{2}$

Les relations précédentes conduisent à l'expression de l'enthalpie $h(U)$ du jet :

$$h = h_{air} + (h_T^{Ar} - h_{air})\left(\frac{U}{U_0}\right) - \left(\frac{U_0^2}{2}\right)\left(\frac{U^2}{U_0^2}\right) \quad \text{(III-7)}$$

Où U désigne la vitesse du jet loin de la buse

La température du jet peut être exprimer par la relation suivante :,

$$h = C_p \,.\, T \quad \text{(III-8)}$$

Avec : $C_p = (X_{Ar} \,.\, C_p^{Ar} + X_{air} \,.\, C_p^{Air})$

D'ou :

$$T = \frac{h_{air} + (h_T^{Ar} - h_{air})\left(\frac{U}{U_0}\right) - \left(\frac{U_0^2}{2}\right)\left(\frac{U^2}{U_0^2}\right)}{C_p} \quad \text{(III-9)}$$

$$X_{Ar} = \frac{U}{U_0} \qquad \text{(III-10)}$$

Les équations III-9 et III-10 représente le modèle déduit du théorème de CROCCO. Ce modèle regroupe la fraction du gaz plasmagène, la vitesse et la température du gaz loin de la buse.

En d'autre terme, connaissant la fraction du gaz plasmagène (argon dans notre étude) nous pouvons déterminer la température du plasma à partir de l'équation III-9 et de la vitesse du jet à partir de l'équation III-10.

III.3.2 Validation du modèle

Pour valider ce modèle (déduit du théorème de CROCOO) on s'est référé au travail de Pfender [10] qui expérimentalement avait mesuré la fraction d'argon et température d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air par une sonde enthalpique (voir paragraphe II.V, Chapitre II.).

Sur la Figure III.5 nous avons confronté les valeurs de la température centrale du jet calculée à partir du modèle avec la température expérimentale mesurée par Pfender pour les mêmes conditions opératoire : débit d'argon Q = 47.2 l/mn une puissance effective P = 8387.56 w et diamètre de la buse D = 7.88 mm. Cette figure montre que les résultats offerts par le modèle coïncident d'une manière satisfaisante avec les résultats de l'expérience.

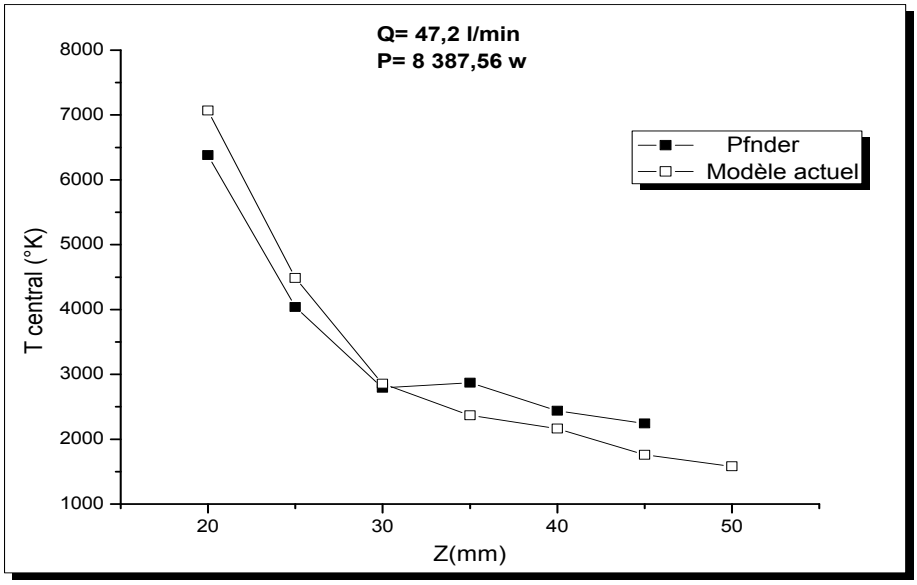


Figure III.5 : *Evolution de la température centrale du jet (Pfender et modèle) P =8387.56 watts, Q=47.2 l/mn, D = 7.88 mm*

Dans ce qui suit les résultats de températures et vitesses centrales sont déterminées par le modèle à partir des fractions d'argon mesurées expérimentalement par Pfender (Figure II.4 Chapitre 2)

III.3.3 Effet de la puissance effective sur la température et la vitesse centrales du jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air

Les Figures III.6 et III.7 illustrent les variations respectivement de la température et vitesse centrales le long du jet pour des distances loin de la buse allant de 15 mm à 50 mm pour deux valeurs de puissances effectives, P = 8387.56 watts et P = 6265.86 watts avec un débit d'argon et un diamètre de buse invariables, Q= 47.2 l/mn D = 7.88 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. Ce phénomène ce traduit par l'augmentation de la température et de la vitesse le long du jet. En d'autres termes, le jet devient plus chaud et rapide avec P.

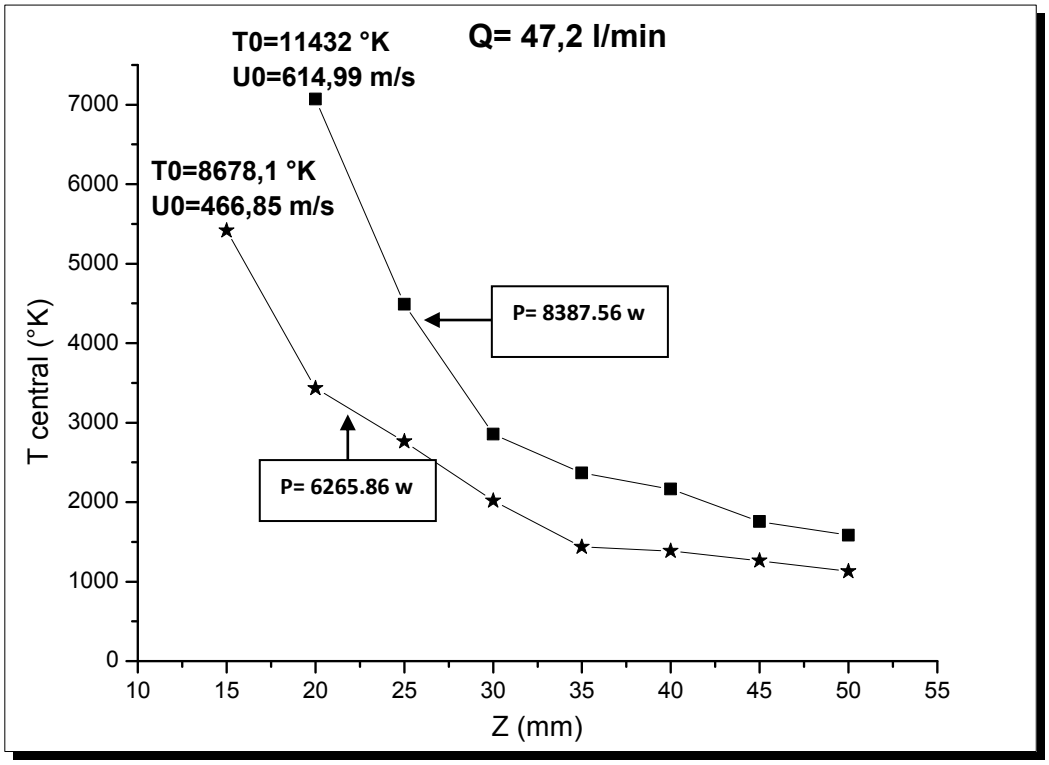


Figure III.6 : *Effet de la puissance sur la température centrale du jet Q= 47.2 l/mn, D = 7.88 mm*

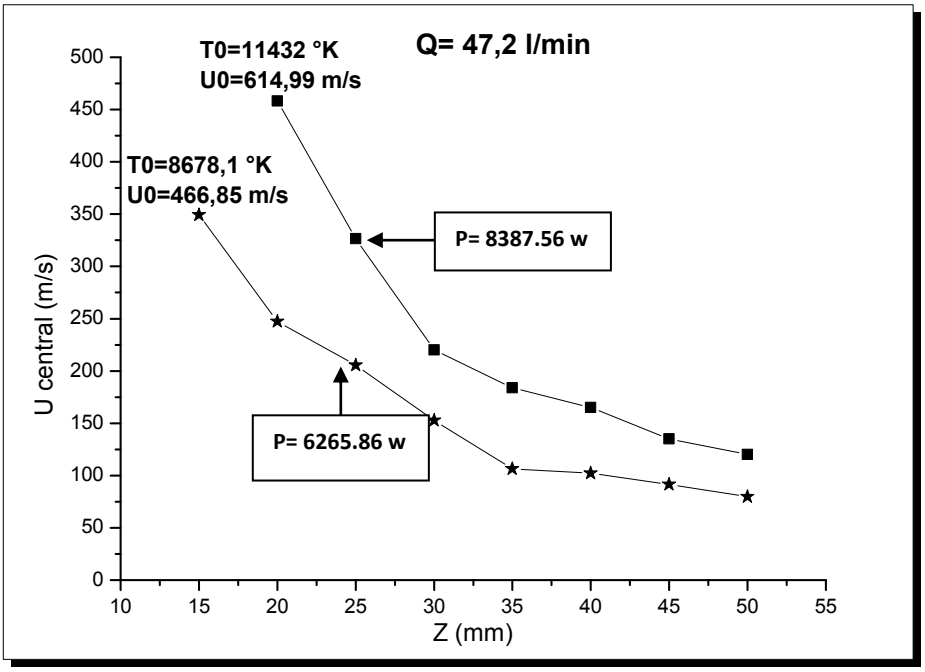


Figure III.7 : *Effet de la puissance sur la vitesse centrale du jet*
Q= 47.2 l/mn, D = 7.88 mm

Les mêmes résultats sont obtenus avec un débit d'argon Q = 23.6 l/mn et un diamètre de buse D = 7.88 mm (voir les Figures III.8 et III.9)

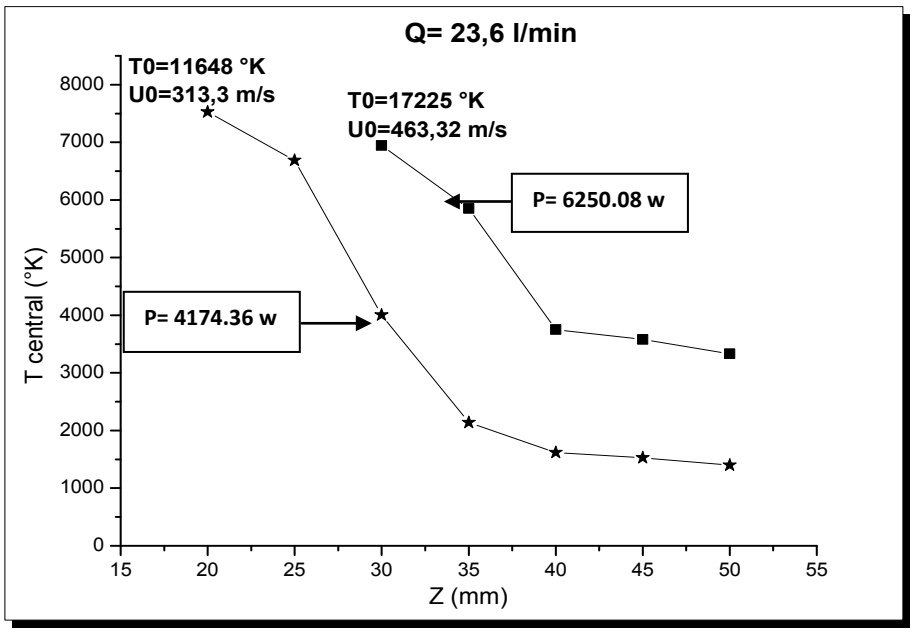


Figure III.8 : *Effet de la puissance sur la température centrale du jet*
Q= 23.6 l/mn, D = 7.88 mm

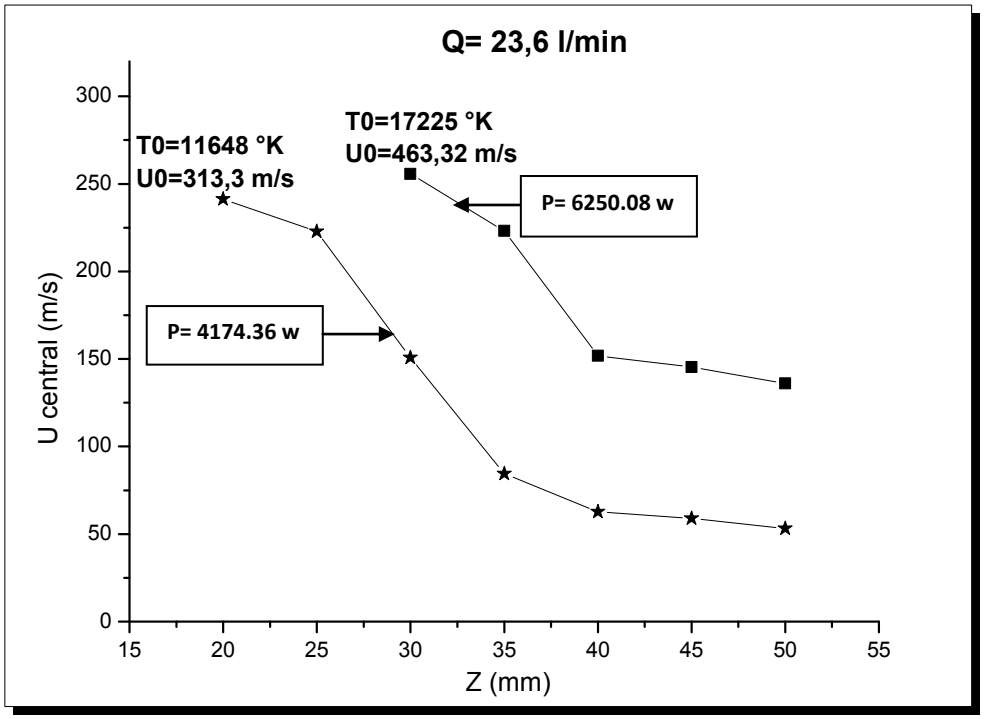


Figure III.9 : *Effet de la puissance sur la vitesse centrale du jet*
Q= 23.6 l/mn, D = 7.88 mm

III.3.4 Evolution radiale de la température et de la vitesse le long du jet

Sur les Figures III.10 et III.11 nous avons porté les distributions radiales de la température et de la vitesse à diverses position centrales Z le long du jet pour une puissance effective P= 6265.86 Watts, débit d'argon Q = 47.2 l/mn et diamètre de buse D = 7.88mm. Les profils radiaux de température et de vitesse ressemblent exactement aux résultats de la littérature. En effet le profil de température à tendance de s'aplatir loin de la buse. Cela est du au mélange de l'air ambiant dans le jet de plasma qui a tendance de refroidir le jet et d'homogénéiser la température au niveau de l'axe centrale. Il en est de même pour la distribution radiale de la vitesse le long du jet.

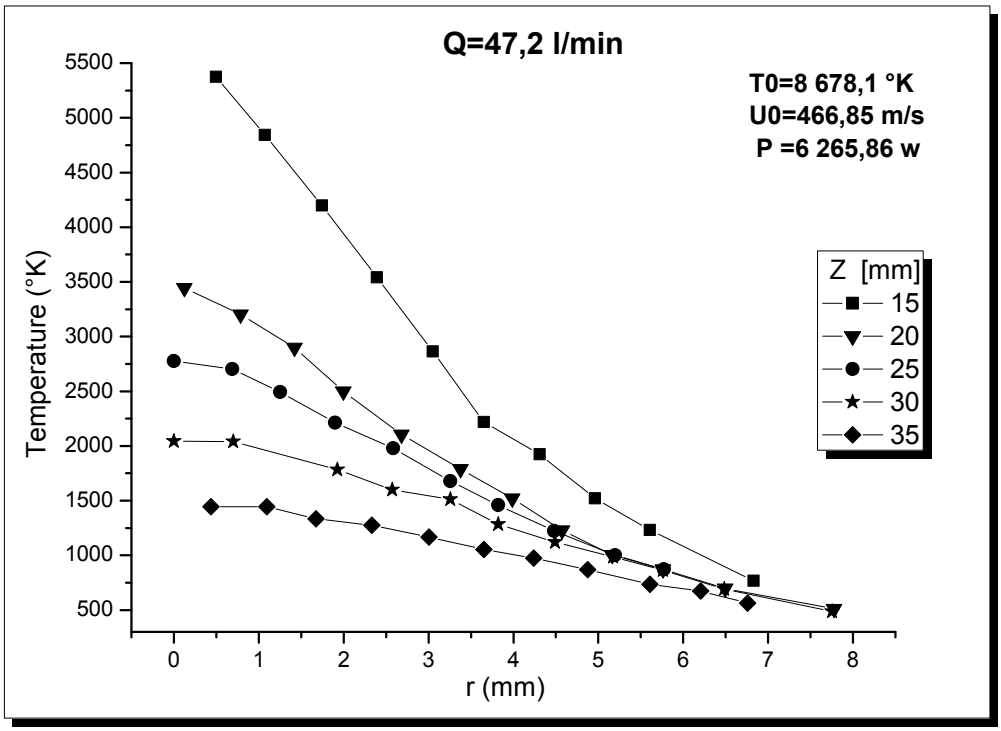


Figure III.10 : *Température radiale le long du jet à différentes valeurs Z*
P = 6265.86 Watts Q= 47.2 l/mn, D = 7.88 mm

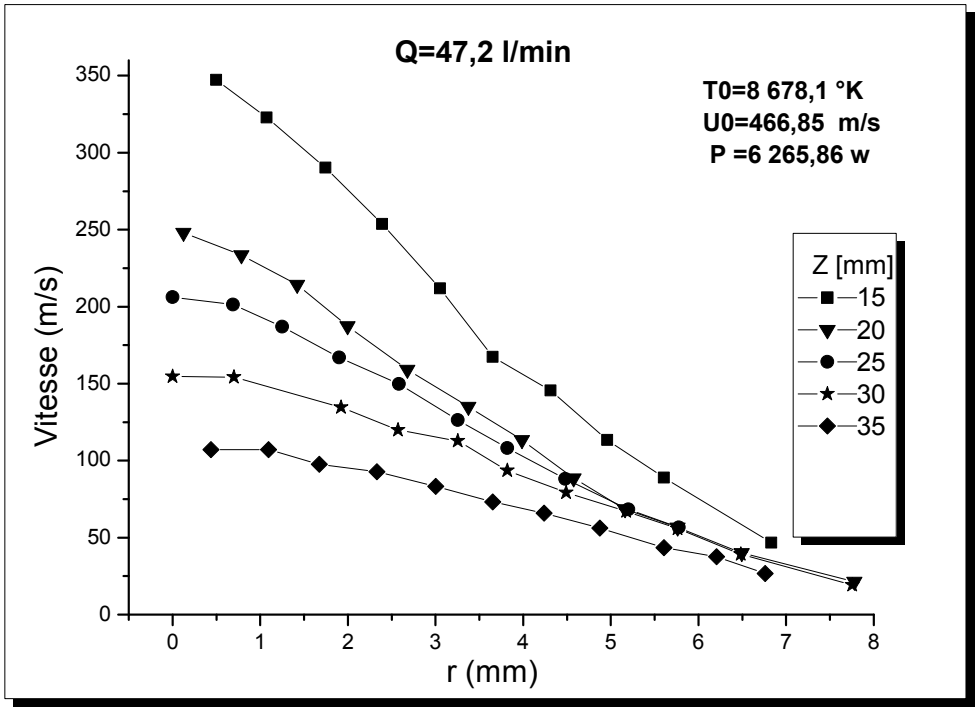


Figure III.11 : *Vitesse radiale le long du jet à différentes valeurs Z*
P = 6265.86 Watts Q= 47 l/mn, D = 7.88 mm

Les mêmes profils sont obtenus avec un débit d'argon Q = 23.6 l/mn et un diamètre de buse D = 7.88 mm (voir les Figures III.12 et III.13)

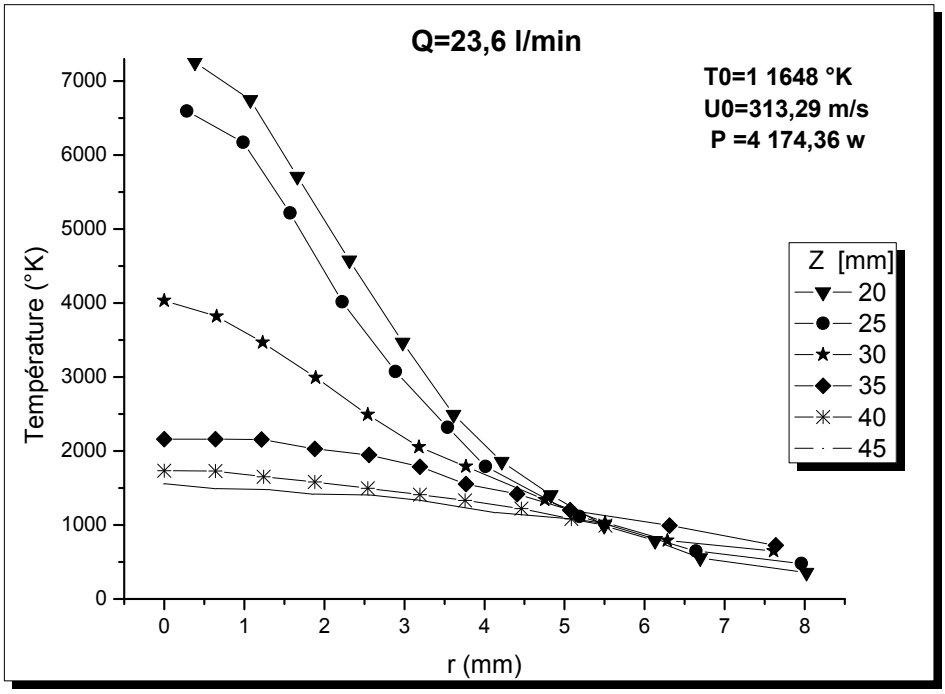


Figure III.12 : *Température radiale le long du jet à différentes valeurs Z P = 6265.86 Watts Q= 23.6 l/mn, D = 7.88 mm*

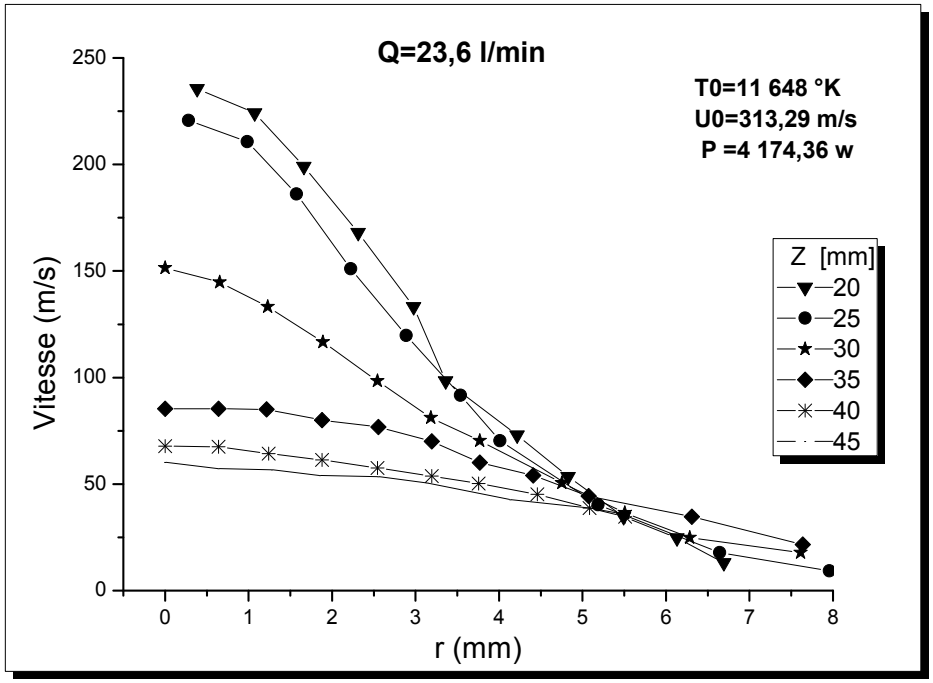


Figure III.13 : *Vitesse radiale le long du jet à différentes valeurs Z P = 6265.86 Watts Q= 23.6 l/mn, D = 7.88 mm*

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est de caractériser la température et la vitesse d'un jet de plasma d'argon déchargeant dans l'air ambiant à partir de la concentration du gaz plasmagène mesurée expérimentalement en tout point du jet.

Dans la première partie nous avons fait une étude bibliographique sur les jets de plasma thermique. Cette partie nous a permis de voir la complexité de ce type de fluide quant à la mesure de la température par les différentes techniques expérimentales et la modélisation des équations de la convection. A travers des références bibliographiques très signifiantes nous avons pu présenter une approche pour la présentation du modèle analytique.

Dans la dernière partie du travail, en premier lieu nous avons déterminé, à partir d'un bilan énergétique, la température T_0 et la vitesse du jet U_0 à la buse (sortie du chalumeau) en fonction de la puissance effective fournie au gaz plasmagène. Nous avons ensuite examiné l'effet du débit d'argon et le diamètre de buse sur la température du jet à la buse. En effet, les résultats obtenus montrent une baisse de température avec l'augmentation du débit d'argon et contrairement au débit, la température du jet à la buse augmente avec le diamètre.

Quant à la détermination de la température et de la vitesse loin de la buse, nous avons présenté le modèle analytique basé sur le théorème de CROCCO. A partir des équations de ce modèle nous avons évalué la température et la vitesse du jet axialement et radialement. Ce modèle a été confronté avec les données de la littérature et la comparaison est satisfaisante. Nous avons ensuite examiné l'effet de la puissance effective sur le profil de la température et de la vitesse centrales du jet pour deux différents débits d'argon Q=47.3 l/mn et Q=23.7 l/mn. Les résultats obtenus montrent que la température et la vitesse augmente avec la puissance effective. Ces résultats sont en accord avec les observations trouvées dans la littérature. Et enfin, Nous avons aussi déterminé les profils radiales de température et de vitesse à diverses positions centrale par rapport à la buse pour des conditions opératoires imposés (Puissance P et débit Q).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Claire Tendero, Christelle Tixier, Pascal Tristant, and Jean Demaison. Atmospheric pressure plasmas : A review. *Spectrochimica Acta Part B : Atomic Spectroscopy*, 61 :30, (2006).

[2] J AMOUROUX, « *Les plasma dans l'industrie »* , collection electra , EDF-DOPEE ,(1991) .

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

[1] FAUCHAIS P., BOURDIN E., COUDERT J.F, *« Généralités sur des traitements physiques et chimiques en plasma thermique »*, L'actualité chimiques, pp : 15-35, (Décembre, 1981).

[5] 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).

[6] BRUCE K R , LEE J , FREED D , HERDEDY L , « *Evaluation of plasma –based thermal threatment system for destruction of difficult to remediate wast »* , International conference on incineration and thermal treatment technology , Salt Lake city , USA ,pp .559-564 (1998) .

[7] SPRINGER M.D , BARKLEY T , CASTELON O , FORSBERG B , STUTTS G « *A thermal destruction and recovery process for medical waste powered by a thermal plasma arc torch »* , International symposium on Environmental technologies , Atlanta , USA , pp , 671-682 5(1995) .

[8] BARTHELEMY B , CERQUERIA N , GIROLD C , VANDENSTEENDAM C , BARRONET J.M , «*Modeling of oxygen plasma post combustion of pyrolysis gases», P*rocess in plasma processing of materials , ed , FAUCHAIS , (2001) .

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

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

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

[12] DONALDSON C.D and GRAY K.E, «*theoretical and experimental investigation of the compressible free mixing of tow dissimilar gases* », AIAA Journal vol. (4, 11, 2017-2025) (November 1966) .

[13] internet, *site web : http://slideplayer.fr/slide/466161/*

[14] J .M Badie , R Delmas,G Flamand , G,olalde et G.Vallbona , « P*lasma thermique ,recents devlopments et prespectives de recherche a* l'I.M.P » , CNRS d'odeille France .

[15] 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).

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

[16] P. *S*nabre, M.Announ, JM Badie, B. Granier, , « *Heat transfert around spherical particle levited in argon plasma jet,* », Eur. Phys.J. AP3, 287-293 (1998).