## **UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA**

FACULTÉ DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGÉNIEUR \*\*\*\*\*



### DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

$\bigwedge$ N° d'ordre :	١
$\backslash$ N° de série : /	/

## Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER

Spécialité: Physique **Option : Physique des matériaux** Par : DAOUI Hafsa

# Contribution à l'étude du

# comportement fluide de plasma lors

# de l'interaction des torches à plasma

# avec les métaux

Soutenu publiquement le : 25 /11 /2008

### Devant le jury composé de:

Dr.	<b>BOUZID</b> Noureddine	M.C.	Université Kasdi Merbah Ouargla	Président
Dr.	BOUKRAA Aomar	M.C.	Université Kasdi Merbah Ouargla	Examinateur
Dr.	CHIHI Ismail	M.C.	Université Kasdi Merbah Ouargla	Examinateur

M.C. Dr. **GUEDDA El-Habib** 

Prof. **KHELFAOUI** Fethi

Centre Universitaire El-Oued

Professeur Université Kasdi Merbah Ouargla

Examinateur

Examinateur

Rapporteur

# <u>Dédicace</u>

Je dédie ce travail à :

Les plus chères personnes dans la vie : ma mère et mon père.

Mon cher époux Monsieur Ahmed Felkat, pour sa compréhension et son aide durant la réalisation de ce travail

Mon adorable fille : Soundous.

Mes chers frères et sœurs.

Toute ma famille.

Que Dieu le tout puissant les garde pour moi.

Mes amis et collègues et tous ceux qui m'ont encouragé.

## **Remerciements**

Ce travail a été réalisé au laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les Zones Arides et Sahariennes (LENREZA), de l'Université Kasdi Merbah Ouargla.

Je tiens tout particulièrement à exprimer ma plus profonde reconnaissance, et mes plus vifs remerciements à mon encadreur et directeur de recherche, le Professeur KHELFAOUI Fethi, qui a proposé le sujet, et qui a dirigé ce travail avec beaucoup d'attention et de rigueur.

Je remercie messieurs les membres du jury d'avoir accepté de participer au jury de soutenance :

Dr. BOUZID Nour-Eddine, Maître de Conférence à l'Université Kasdi Merbah Ouargla;

Dr. CHIHI Ismail, Maître de Conférence à l'Université Kasdi Merbah Ouargla ;

Dr. BOUKRAA Aomar, Maître de Conférence à l'Université Kasdi Merbah Ouargla ;

Dr. GUEDDA El-Habib, Maître de Conférence à Centre Universitaire El-Oued.

J'exprime enfin mes vifs remerciements à tous mes enseignants de graduation et de post-graduation spécialement : AIADI Kamel Eddine, BOUGATAIA Hamza, BECHKI Djamel et MEFTAH M<sup>ed</sup> Tayeb.

Je voudrais remercier tous ceux et toutes celles qui m'ont aidé de loin à réaliser ce travail et spécialement : L. Benmabrouk, Y. Benzahi, K. Chenini, Z. Ballah, C. SOUDANI, L. Khiari, H. Benzair, M. Dakmouche, A. Boualati, A. Naam, R. Charbi, Z. Rahmani, L. Bouras, H. Ababsa, S. Babay et B. R. Gkal.

J'exprime enfin mes vifs remerciements à tous mes enseignants de graduation et de post-graduation et à tous mes collègues de promotion : O. Bentouila, M. Ghoughali, F. Chelghem, H. Lorgot, Z. Ayat et madame S. Lemkeddem.

Je remercie tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de la proche à réaliser ce travail. Je remercie messieurs : Belfare Med et Benterbah ...

# <u>SOMMAIRE</u>

Dédicace	ì
Remerciements	ii
Sommaire	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
Introduction générale	01
Chapitre I: Notions généralités sur le soudage et le plasma	
I-1- Introduction	06
I-2- Définition de soudage	06
I-3- Classification des techniques de soudage	07
I-4- Classification des procédés de soudage	07
I-5- Historique de soudage à l'arc électrique	08
I-6- Définition de soudage à l'arc électrique	09
I-6-1- Définition de l'arc électrique	09
I-6-2- Propriétés de l'arc de soudage	10
I-6-2-1- Propriétés électriques	10
I-6-2-2- Propriétés thermiques	11
I-6-2-3- Principaux procédés de soudage à l'arc	12
I-7- Différents types de soudage à l'arc électrique	12
I-7-1- Soudage à l'électrode enrobée	12
I-7-2- Soudage semi-automatique MIG et MAG	14
I-7-3- Soudage à l'arc sous gaz avec électrode de tungstène (procédé TIG)	16
I-8- Le soudage plasma	18
I-8-1- Définition de plasma	18
I-8-2- Classification de plasma	18
I-8-3- Définition du soudage plasma	19
I-8-4- Appareillage	20
I-8-5- Torche à plasma	21
I-8-6- Formes du soudage plasma	22
I-8-7- Domaines d'application	22

I-8-8- Avantages du soudage plasma	22
I-8-9- Comparaison entre une torche TIG et une torche	23
I-8-10- Comportement Du Bain liquide	25
I-8-11- Energie de soudage	27
I-9- Equations sur les champs électromagnétiques	27
I-10- Le fluide	29
I-10-1- Définition du fluide	29
I-10-2- Généralités et les lois de conservation	30
I-10-2-1- Equations des conservations	31
Chapitre II: Modélisation numérique du comportement fluide des	

### torches à plasmas

II-1- Introduction	35
II-2- Description de la torche à plasma	36
II-3- Définition du phénomène physique	37
II-4- Définition du modèle mathématique	38
II-4-1- Cas du fluide incompressible	38
II-4-2- Cas du fluide compressible	39
II-4-3- Equations sur les champs électromagnétiques	41
II-5- Conditions initiales et conditions aux limites	42
II-6- Description des méthodes numériques de résolution	43
II-6-1- Calcul des vitesses	44
II-6-1-1- Calcul de la vitesse dans le cas du fluide incompressible	44
II-6-1-2- Calcul de la vitesse dans le cas du fluide compressible	46
II-7- Organigramme de calcul de la vitesse	49
Références Bibliographiques	52

## Chapitre III: Résultats et discussions

III-1- Introduction	53
III-2- Profils de vitesses de la torche à plasma	54
III-2-1- Profils de vitesses pour fluide incompressible	54
III-2-1-1- Profils de la composante V de la vitesse suivant l'axe z	54
III-2-1-2- Profils de la composante U de la vitesse suivant l'axe r	55

III-2-2- Profils de vitesses pour fluide compressible:	57
III-2-2-1- Profils de la composante V de la vitesse suivant l'axe z	57
III-2-2-2- Profils de la composante U de la vitesse suivant l'axe r	58
III-3- Les propriétés de la torche à plasma	59
III-3-1- Profils de la densité du courant	59
III-3-2- Profils du champ magnétique B	61
III-3-3- Profils du champ électrique E <sub>ez</sub>	62
III-3-4- Profils de densité d'énergie électromagnétique	63
III-3-5- Profils de la différence de potentielle	65
III-4- Comparaison entre le fluide incompressible et le fluide compressible	
III-4-1- L'apport de vitesse ( $\Delta V/V$ ) %	65
III-4-2- L'apport de vitesse (ΔU/U) %	66
III-5- Comparaison des résultats obtenus avec d'autres travaux	67
Références Bibliographiques	69
Conclusion générale	70

# <u>Liste des figures</u>

Numéro	T ágar Ja	<b>D</b> a
de figure	Legende	Page
I-1:	Soudage	06
I-2:	Classification des procédés de soudage	08
I-3 :	Arc électrique	09
I-4:	Tension secondaire par la soudeuse à partir de la tension primaire	10
	d'alimentation	10
I-5 :	Différents types de transfert de métal	11
I-6 :	Soudage à l'électrode enrobée	13
I-7:	Soudage semi-automatique (MAG, MIG)	15
I-8:	Torche TIG	17
I-9:	Torche à plasma	20
I-10:	Comparaison entre une torche TIG et une torche plasma [18]	24
I-11:	Les différents courants du bain de fusion	25
II-1:	Schéma d'une torche à plasma	37
II-2:	Phénomènes de constriction	37
II-3 :	Conditions aux limites et conditions initiales de la torche	42
II-4 :	Description de la torche à plasma	43
III-1:	Profils de la composante de vitesse V en fonction de r	54
III-2:	Profils de la composante de vitesse V en fonction de Z	55
III-3 :	Profils de la composante de vitesse V en fonction de r et Z	55
III-4 :	Profils de la composante de vitesse U en fonction de Z	56
III-5 :	Profils de la composante de vitesse U en fonction de r	56
III-6 :	Profils de la composante de vitesse V en fonction de r	57
III-7:	Profils de la composante de vitesse V en fonction de Z	57
III-8:	Profils de la composante de vitesse V en fonction de r et Z	58
III-9:	Profils de la composante de vitesse U en fonction de Z	57
III-10:	Profils de la composante U en fonction de r	59
III-11:	Profils de la composante de vitesse U en fonction de r et Z	59

III-12:	Densité du courant en fonction de Z	60
III-13 :	Densité du courant en fonction de r	60
III-14 :	Profils du champ magnétique B en fonction de r	61
III-15:	Profils du champ magnétique B en fonction de Z	62
III-16 :	Profils du champ électrique E <sub>ez</sub> en fonction de Z	62
III-17:	Profils du champ électrique $E_{ez}$ en fonction de Z	63
III-18 :	Energie électromagnétisme en fonction de r	64
III-19:	Energie électromagnétisme en fonction de Z	64
III-20:	Variation du rapport ( $\Delta V/V$ ) % en fonction de Z	65
III-21:	Vitesse V en fonction de B	65
III-22:	Variation du rapport ( $\Delta U/U$ ) % en fonction de r	66
III-23 :	Variation du rapport ( $\Delta U/U$ ) % en fonction de Z	66
III-24:	Profil de la composante de vitesse en fonction de Z (r=0) [5]	67
III-25 :	Profil de la composante de vitesse en fonction de Z (r=0) [3]	67
III-26 :	Profil de la composante de vitesse en fonction de Z (r=0)	68
III-27:	Profil de la composante de vitesse en fonction de Z (r=0)	68

# Liste des tableaux

Numéro		
de	Légende	Page
tableau		
II-1:	Résumé de l'équation de conservation	40
II-2:	Conditions initiales et conditions aux limites	42

## Introduction générale

Les procédés de soudage et de coupage occupent une place importante dans l'univers de la construction des bateaux, fusées et automobiles ; et ils sont très largement utilisés dans les industries aéronautiques ou navales.

De nouvelles technologies de soudage et de coupage, largement robotisées, mettent en œuvre le laser et le plasma.

L'étude des arcs électrique a débuté il y a plus de deux siècles. Ainsi, la première expérience concernant un arc électrique fut menée par Davy en 1813. Cet arc était créé entre deux charbons dans cage de verre sous vide. A cette époque, les études étaient limitées par les connaissances scientifiques et les appareils de mesures existants. Il n'était ainsi possible que de mesurer des grandeurs macroscopiques telles que la tension ou l'intensité de l'arc. Cela n'a pas empêché les scientifiques d'alors, d'envisager les prémices des applications industrielles plasmas présentes aujourd'hui. Ces applications reposaient sur les différentes constatations plus où moins empiriques concernant les fortes températures régnant dans le plasma .il faudra cependant attendre le développement de l'aire industrielle pour voir apparaître les procédés plasma dans l'industrie. Ainsi, au début du XX<sup>ème</sup>, le plasma fut utilisé pour la production d'oxyde d'azote et d'acétylène. Quelques essais furent menés sur la soudure à l'arc ou sur le chauffage de coulées de métal dans la métallurgie. A cette époque, le milieu plasma n'était toujours pas caractérisé et ce n'est que dans les années 30 que Langmuir fit des études plus théoriques sur les gaz ionisés. C'est cependant la seconde guerre mondiale qui favorise le plus le développement de nouvelles techniques industrielles plasma. Ainsi, c'est à cette période qu'apparurent aux Etats-Unis les premières torches de soudage sous flux de gaz. Puis dans les années 50 se développa le procédé de découpe plasma. A l'heure actuelle, les plasmas thermiques sont utilisés dans de nombreux autres domaines d'applications tels que la métallurgie, la sidérurgie, le traitement des déchets, le traitement de pièces mécaniques, la chimie et pétrochimie ou encoure la cimenterie [1].

On appelle soudage l'opération qui consiste à assembler des métaux à l'aide de la pression, de la chaleur, d'une flamme ou d'un arc électrique. Dans cette opération, le métal d'apport et les pièces à assembler sont chauffés au moyen d'un arc électrique ou d'un gaz de combustion afin de réaliser un joint. De nos jours, le soudage à l'arc est le procédé de soudage le plus couramment utilisé [2].

On peut distinguer les types de soudage à l'arc électrique suivants : soudage à l'électrode enrobée, soudage MAG, soudage MIG, soudage plasma.....etc.

Dés 1923, avec son collègue Levy Tonks, Langmuir observe le mouvement d'oscillation collective d'un nuage d'électrons pendant une décharge dans le mercure à basse pression. Ce nuage, brillant et ondulant comme une substance gélatineuse, lui fait alors penser à un plasma sanguin. En fait, pour Langmuir, le plasma désigne essentiellement la zone centrale globalement.

Les premières petites torches à plasmas d'arc ont été développées industriellement vers 1954 aux Etats-Unis pour le soudage de l'aluminium en atmosphère inerte. Dans une torche à plasma, un arc électrique La torche à plasma représente une innovation importante qui fait progresser les procédés industriels dans tous les secteurs.

Les torches à plasma d'arc couvrent maintenant une gamme de puissance variant de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts. Dans une torche à plasma, un arc électrique est créé au sein d'une atmosphère de gaz inerte entre deux électrodes. Pour le soudage, l'arc apporte l'énergie de fusion entre les matériaux à assembler. Le gaz plasmagène est souvent injecté entre la cathode en tungstène et la buse de constriction. Elles sont utilisées dans des applications variées dont les principales sont : le découpage, le soudage, le rechargement par arc transférés, la projection par plasma, la refusion - purification de métaux, le chauffage de répartiteurs de coulée et la métallurgie extractive par des fours à électrodes en graphite[3].

Les installations industrielles utilisent principalement trois types de configurations : les torches à plasma soufflé, les arcs transférés et les torches à plasma inductif. Si la maturité industrielle semble atteinte pour beaucoup de procédés plasmas, étrangement, ce ne sont que des études plus ou moins semi empiriques qui ont permis de faire évoluer ces techniques jusqu'au milieu des années 70. Les ingénieurs, se sont rendus compte alors de la nécessité d'études plus fondamentales pour obtenir des procédés optimisés et une meilleure connaissance de « l'outil » plasma [1]. L'objectif de ce travail est l'étude des vitesses, de la densité de courant, du champ magnétique, du champ électrique, et l'énergie électromagnétique de la torche à plasma.

Ce travail est constitué de trois chapitres. Le premier chapitre est introductif et présente les définitions de soudage, de la classification des techniques du soudage, et l'exposition de la classification des procédés du soudage. Après une présentation d'importantes notions des types du soudage, nous présentons les équations nécessaires au traitement fluide du problème ; il s'agit de :

L'équation de conservation de la masse.

L'équation de conservation de la quantité de mouvement

Les équations de l'électromagnétisme.

Dans le second chapitre est une présentation de la modélisation numérique, où nous présentons la définition du phénomène physique ; le plasma considéré est un plasma d'argon. Nous avons supposé que le plasma est un fluide newtonien et nous avons utilisé les équations de conservation, et les équations de l'électromagnétisme, ainsi nous avons présenté quelques hypothèses sur les conditions aux limites et les conditions initiales du phénomène physique. Pour la modélisation numérique, nous avons choisi la méthode des différences finies [4]. Dans ce chapitre, nous montrons que la méthode itérative de Gauss- Seidel est adéquate pour la résolution de problème. Nous présentons aussi les différents organigrammes du programme.

Le troisième chapitre porte sur le calcul de la vitesse, le champ magnétique, le champ électrique, la densité du courant, la densité d'énergie électromagnétique, et la différence de potentielle de la torche à plasma. Puis d'autre part, nous présentons une comparaison des résultats obtenus dans le cas d'un fluide incompressible et dans le cas d'un fluide compressible.

Et enfin, le mémoire porte des conclusions générales et des perspectives.

# <u>Références bibliographiques</u>

- P. Ferton ; Etude d'un arc de découpe par plasma d'oxygène modélisation expérience ; Université Paul Sabatier ; Toulouse III ; novembre 2002.
- [2] C. Ferdinand; Mise en œuvre et caractérisation d'assemblages soudes par procèdes TIG et laser de totales d'alliages de titane réfractaires; Docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse; novembre 2005
- [3] P. Bradu ; L'univers des plasmas ; Edition Paris ; 1999.
- [4] . M. Hamimid ; Mémoire de la Magister ; Université de Batna, Juillet 2001.

### **Chapitre I**

### Notions générales sur le soudage et le plasma

#### **I-1- Introduction :**

Les procédés d'assemblage permanent des pièces métalliques sont : l'agrafage, le collage, le rivetage et le soudage.

L'assemblage par soudage est la technique utilisée dans les domaines de la fabrication (de produits en métal et de produits électriques) et des assemblages métalliques à partir de la micro électronique jusqu'à la fabrication de grands corps de presses hydrauliques. On peut souder aujourd'hui les éléments d'épaisseur de 0,01-100 mm et plus [1].

Les origines du soudage moderne datent de la fin du 19<sup>éme</sup> siècle. On estime aujourd'hui que 60 à 80 % de la production mondiale de l'acier est destinée à la fabrication des produits soudés [1].

De nouvelles technologies de soudage et de coupage, largement robotisées, mettent en œuvre le laser et le plasma.

#### I-2- Définition de soudage :

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents [2].

Le soudage est un procédé qui se caractérise par une grande complexité de phénomènes physico-chimiques [1]. Dans l'opération de soudage, la liaison atomique réalisée au niveau du joint nécessite l'intervention d'une source d'énergie extérieure qui crée élévation de la température dans les pièces de soudés. La continuité entre les pièces est schématisée sur la figure (I-1) [2].



Figure (I-1) : Le soudage.

Souder deux éléments métalliques pour constituer un ensemble continu implique, la réalisation des opérations qui suivent [3] :

- 1- Accostage.
- 2- Maintien des pièces pendant soudage.
- 3- Mise en mouvement.

Le montage des pièces à souder sera abordé selon les deux aspects suivants [3] :

- préparation en atelier des pièces à souder, en ce qui concerne l'accostage des bords, les moyens de maintien des pièces pendant le soudage, et le bridage vis-à-vis des déformations.

- description des machines et outillages de mise en mouvement des pièces et des torches de soudage, en vue d'une automatisation de l'opération.

#### I-3- Classification des techniques de soudage :

Il y a trois techniques d'assemblages [4] :

- Le soudage : c'est une opération qui consiste à provoquer la fusion de proche en proche des bordes des pièces à assembles, généralement de natures très voisine. L'emploi d'un métal d'apport peut être utilisé.
- 2. *Le brasage* : c'est une opération qui consiste à assembler deux pièces métalliques de natures identiques ou différentes par capillarité d'un métal d'apport dans un joint à recouvrement. Ce denier a un point de fusion toujours inférieur à ceux des métaux de base qui ne fondent pas durant l'opération.
- 3. *le soudobrasage* : technique qui se rapproche du soudage par son mode opératoire (joint réalisé de proche en proche) et du brasage (utilisation de métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à ceux des deux métaux de base).

#### I-4- Classification des procédés de soudage :

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes de la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres les continuités métalliques sont obtenues sans fusion par effets purement mécaniques. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme présenté sur la Figure (I-2) [4].



Figure (I-2): Classification des procédés de soudage.

#### I-5- Historique de soudage à l'arc électrique :

Le procédé de soudage à l'arc a une histoire internationale. Les dates suivantes soulignent brièvement ce développement :

- ✓ 1801 Sir Humphrey Davy, d'Angleterre, découvre qu'un arc électrique se forme à travers un vide.
- ✓ 1881 De Meritans, en France, unit deux plaques de plomb avec un arc de carbone.
- ✓ 1887 Rarnados en Russie perfectionne l'arc de carbone et le brevette.
- ✓ 1889 Charles Coffin aux Etats-Unis reçoit le premier brevet pour l'arc métallique.
- ✓ 1910 En Suède, Oscar Kjellborg fait breveter la première électrode plaquée.

Entre 1917 et 1945, et surtout durant les deux guerres mondiales, des progrès considérables sont faits dans le soudage à l'arc électrique.

#### I-6- Définition de soudage à l'arc électrique :

#### I-6-1- Définition de l'arc électrique :

Un arc est une décharge électrique établi et entretenu dans un gaz entre deux électrodes reliées aux pôles d'un générateur en dégageant lumière et chaleur ; il forme une colonne ionisée conductrice qui répond à des lois physiques, essentiellement [5] :

- électriques, reliant tension et courant, auxquelles se rattachent les caractéristiques et le fonctionnement des générateurs.
- thermiques aux quelles se rattachent les phénomènes de fusion.

On peut représenter l'arc électrique dans la figure (I-3) [4], où on distingue classiquement trois zones dans l'arc électrique qui sont la chute anodique, la chute cathodique et la colonne d'arc [4].



Figure (I-3) : Arc électrique.

- *La cathode*: C'est la zone d'émission des électrons qui peut se faire de deux modes distincts appelés émission thermoïonique et non thermoïonique. Le rôle de la cathode est de fournir les électrons à l'arc [4].
- *I'anode* : C'est le collecteur d'électrons.
- *cala colonne d'arc :* C'est la zone de passage des électrons entre les électrodes.

#### I-6-2- Propriétés de l'arc de soudage :

#### I-6-2-1- Propriétés électriques :

- La propriété du courant : si le courant est élevé, le volume et la température sont élevés.

- La propriété de la polarité : un arc électrique peut fonctionner en courant continu ou alternatif.

- *Courant continu* : deux modes de polarité sont possibles, polarité directe et polarité inverse.
- *Courant alternatif* : l'électrode et les pièces sont alternativement anode et cathode. On dit alors que la polarité est variable [4].

- La propriété de la puissance : le produit UI (U : la tension et I : le courant) donne à chaque instant la puissance p instantanée dans l'arc. Il est important de rappeler qu'un arc électrique ne répond pas à la loi de joule (de forme  $RI^2$ ) [5].

#### -La propriété de la tension :

Pour souder, il est nécessaire d'abaisser la tension fournie par le réseau d'alimentation électrique, où on peut distinguer deux types pour la tension :

La tension primaire est la tension disponible dans l'atelier; elle permet l'alimentation électrique de l'équipement de soudage. La tension primaire est réduite par un transformateur localisé dans le poste de soudage (soudeuse) .C'est la tension réduite qui alimente le pistolet on appelle la tension secondaire (Figure (I-4) ) [6] :



Figure (I-4) : Tension secondaire par la soudeuse à partir de la tension primaire d'alimentation.

#### I-6-2-2 Propriétés thermiques :

- *Répartition de la chaleur* : la puissance *P* dissipée dans l'arc se transforme en quantité de chaleur  $Q_T$  par unité de temps qui se répartit en trois  $(Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3)$ :

- Q<sub>1</sub> et Q<sub>2</sub> absorbées respectivement par l'électrode et par les pièces et servant seules au soudage.
- $Q_3$  rayonnée et perdue dans l'espace environnant.

Le rendement  $\eta$  est égal à  $(Q_{1+}Q_2)/Q_T$  [5].

Transfert de métal : On distingue dans la pratique trois modes de transfert de métal qui apparaissent en fonction de la densité du courant et de la viscosité du métal de l'électrode (Figure (I-5)) [5] :

-Le transfert par gouttes isolées ou globulaire (drop), transfert discontinu ;

-Le transfert par fines gouttelettes (transition), transfert continu ;

-Le transfert par pulvérisation (spray), transfert continu.



Figure (I-5) : Différents types de transfert de métal.

#### I-6-2-3Principaux procédés de soudage à l'arc :

Les différents procédés de soudage se caractérisent chacun par deux éléments essentiels: -la nature de l'électrode : baguette, fil fusion ou tige réfractaire.

-la nature du milieu: gaz ou vapeurs, dans lequel s'établit la décharge électrique et qui doit avoir des propriétés protectrices vis-à-vis de l'atmosphère ambiante.

#### I-7- Différents types de soudage à l'arc électrique :

On peut distinguer les types de soudage à l'arc électrique suivants :

#### I-7-1 Le soudage à l'électrode enrobée :

La première électrode enrobée est fabriquée en 1907 [7], où le soudage à l'électrode enrobée, il a été la première technique à utiliser l'électricité. L'utilisation de la baguette est manuelle.

#### ♦ L'appareillage :

Une électrode enrobée se présente sous la forme d'une baguette composée de deux parties bien distinctes [1] :

- L'âme : partie centrale en fil rond, généralement en acier doux (parfois en cuivre ou en bronze etc....) dont le rôle est de concourir à conduire le courant électrique et à constituer le métal déposé.

- *Une partie extérieure* : cylindrique, concentrique à l'âme dénommée ENROBAGE. L'appareillage est présenté sur la figure (I-6) [6].



Figure (I-6) : soudage à l'électrode enrobée.

#### • Domaine d'application :

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée permet de souder tous les types de joints, en toutes positions et toutes épaisseurs à partir de 1mm [1]. Principalement le soudage à l'arc avec électrodes enrobées peut s'appliquer aux aciers de construction non alliés, pour des épaisseurs en général supérieures ou égales à 1,5 mm et pour des diamètres d'électrode compris entre 1,5 et 6,3 mm [7].

#### • Avantages et inconvénients du procédé [1] :

#### a – Avantages :

- faible coût d'équipements ;
- soudage de joints de différents types en toutes positions ;
- gamme d'épaisseurs très étendue.

#### **b** – Inconvénients :

- faible productivité ;
- opérateurs adroits pour une soudure d'excellente qualité
- enlèvement du laitier de protection.

#### I-7-2 Soudage semi-automatique MIG et MAG :

#### • Définition :

Les expressions MIG (MIG : Métal Inerte Gaz) et MAG (MAG : Métal Active Gaz) selon que le type de gaz de protection est respectivement inerte ou actif [4]. On peut utiliser le terme MIG lorsque l'atmosphère de protection est inerte (argon, hélium) et MAG lorsqu'elle est active ( $CO_2$  pur) ou activée (mélange argon- $CO_2$ ). Les principaux gaz ou mélanges de gaz utilisés sont [7] :

- L'argon pour les alliages légers, les non ferreux divers et les aciers faiblement alliés.
- L'hélium ou l'argon pour les aciers inoxydables.
- Le CO<sub>2</sub> ou les mélanges argon-CO<sub>2</sub> pour les aciers non alliés.

#### • L'appareillage :

L'appareillage comporte une source de courant continu, un ensemble de dévidage d'une bobine de fil constitue par un dévidoir et un entraîneur, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires [5].

En pratique, les conditions de soudage dépendent de la nature des matériaux à souder et de leurs épaisseurs qui déterminent la qualité de fil, son diamètre et une fourchette de courant. La tension du générateur est ensuite réglée pour ajuste la longueur d'arc [5]. L'appareille du soudage semi-automatique (MAG, MIG) est indiquée sur le schéma de la figure (I-7) [6].

#### • Domaines d'application :

On peut utiliser les procédés MAG et MIG dans l'installation de charpentes métalliques et dans tous les alliages commerciaux. Le premier procédé est utilisé pour le soudage des aciers doux et le deuxième procédé permet de réaliser des soudures en toutes positions, il est utilisé pour l'assemblage de métaux semblables, ferreux et non ferreux.



Figure (I-7) : Soudage semi-automatique (MAG, MIG).

#### ♦ Avantages et inconvénients du procédé [1]:

#### a – Avantages :

- Procédé semi-automatique ou automatique ;
- Soudage de l'acier et de l'aluminium en toutes positions ;
- Productivité nettement supérieure à celle du soudage à l'arc.

#### **b** – Inconvénients :

- Le soudage ne peut être effectué à une très grande distance de la source de courant à cause de l'alimentation en fil électrode.

- l'intensité est liée au débit du fil électrode, ce qui peut conduire à certaines difficultés dans le choix des paramètres de soudage.

#### I-7-3 Soudage à l'arc sous gaz avec électrode de tungstène (procédé TIG):

#### Principe du soudage TIG:

Le soudage à l'électrode réfractaire est appelé soudage TIG (abréviation de Tungstène Inerte Gaz). Il a vu le jour aux États-Unis en 1924 et n'a réellement pris son essor aux U.S.A. et en Angleterre que durant deuxième guerre mondiale [7].

Le principe du TIG est de créer un arc électrique entre une électrode réfractaire (c'est-àdire non fusible) en tungstène et la pièce à souder, où cette électrode en tungstène pur peut contenir des éléments d'addition comme le thorium (1-2 %) ou l'yttrium, et ou zirconium (0,5 %) qui favorisent l'émission électronique. L'arc et le bain fondu sont protégés par l'utilisation d'un gaz neutre (l'argon, ou mélangé avec l'hélium ou de l'hydrogène pour améliorer la soudabilité). Ce procédé peut s'appliquer avec ou sans métal d'apport [5].

Le soudage TIG est très largement utilisé manuellement ou sur les machines automatiques pour réaliser des assemblages d'épaisseur 1mm.

Le matériel nécessaire pour réaliser des soudures TIG est relativement simple, et peut être décomposé suivant trois fonctions [5] :

- Générateur de courant : La source électrique délivre un courant continu lisse, continu pulsé ou alternatif. La plage d'intensités s'étend de quelques ampères à plus de 400 A pour les postes automatisés. La tension de soudage varie de 8 à 30V. Toute l'électronique de commande

du cycle de soudage (temporisation avant et après soudage, amorçage haute fréquence et intensité des pulsations) est intégrée dans la source et le cycle est programmé via un pupitre de commande.

- Arc électrique : Il est réalisé en bout de la torche de soudage, cette dernière est composée d'une électrode de tungstène, d'une buse céramique canalisant le flux de gaz neutre et d'une gâchette utilisable en soudage manuel pour commander l'arc.

- *Protection de l'électrode* : Le système de protection gazeuse est incorporé à la torche pour protéger l'arc et le bain.

- Direction de soudage Buse de protection Métal d'apport Protection envers
- L'appareillage : est présenté sur la figure (I-8) :

Figure (I-8) : torche TIG [5].

#### • Domaine d'application :

Il est très souvent utilisé pour les métaux ferreux et non ferreux, et les alliages de titane, de nickel ou zirconium, ou bien pour des applications dans les industries agroalimentaires, pétrochimiques, nucléaires, aéronautiques et aérospatiales. Le TIG est un procédé facilement mécanisable. Ce procédé permet le soudage des aciers inoxydables, de l'aluminium, du cuivre, du titane, et de leurs alliages, sur des épaisseurs comprises généralement entre 0,5 et 8 mm [7].

Le soudage se fait en courant continu pour les métaux " lourds ", aciers et titane par exemple (le pôle négatif du générateur relié à l'électrode), et en courant alternatif pour les métaux légers.

#### ♦ Avantage et inconvénients du procédé [1]:

#### a – Avantages :

- joints de haute qualité ;
- automatisé dans le cas du soudage sans métal d'apport.

#### **b– Inconvénients :**

Préparation soignée des joints, grande précision dans la réalisation des chanfreins et la propreté des pièces à souder.

#### I-8- Le soudage plasma :

#### I-8-1- Définition de plasma:

Le terme de plasma désigne le quatrième état de la matière, où le milieu est partiellement ou totalement ionise et généralement globalement neutre. Il est constitué d'un mélange d'ions, d'électrons et d'espèces neutres, excitées ou non, où les températures sont supérieures à 300°C à la pression atmosphérique, pour ça on peut considérer le plasma conducteur d'électricité. Le plasma possède une grande viscosité et un coefficient d'échanges thermiques élevé [8].

#### I-8-2- Classification de plasma :

Deux catégories de plasmas sont définies : les plasmas naturels qui composent 99% de l'univers, et les plasmas créés par l'homme [9].

Selon le degré d'ionisation du milieu et sa densité, on peut distinguer schématiquement trois types de plasmas :

a. Les plasmas froids : Ce sont des milieux faiblement ionisée et peu denses de sorte que les électrons ont une température élevée (inférieure à 1000 K). Les plasmas froids sont utilisés dans les applications au traitement de surface, à l'élaboration de matériaux

nouveaux, et à la chimie assistée par plasma,...etc., et sont obtenus en laboratoire depuis une centaine d'années [8].

- b. Les plasmas de fusion : ils sont les gaz totalement ionisées et très chauds. Ces plasmas sont les plus fréquents dans l'univers (étoile, soleil). La température est de quelques dizaines de millions de degrés. Les plasmas chauds sont obtenus en laboratoire depuis une cinquantaine d'années [8].
- *c. Les plasmas thermiques :* on réserve ce non aux plasmas relativement denses, en équilibre thermodynamique (au moins localement), et produits par des décharges du types arcs électriques ou de type radiofréquence, ou par des torches à couplage inductif. Ces plasmas sont essentiellement présents ou utilisés dans les appareils de coupure électrique (interrupteur à plasma en électronique de puissance), dans le traitement métallurgique, le traitement thermique, la soudure, ou le traitement des déchets ou des polluants [10].

Les plasmas thermiques sont aussi utilisées depuis dix à trente ans dans le travail des matériaux, les revêtements de surface, et notamment en sidérurgie : fusion du titane et de ses alliages; fabrications de fibres optiques, élaboration d'aciers spéciaux. L'avantage du plasma thermique consiste en des densités énergétiques et des capacités de chauffage à haute température très supérieurs. On peut distinguer deux types des plasmas thermiques sont les plasmas d'arc (à électrodes) et les plasmas inductifs (sans électrodes).

#### I-8-3- Définition du soudage plasma :

L'arc plasma se caractérise par un faisceau concentré, orientable et de meilleure productivité. Maintenant l'arc plasma est utilisé en soudage, découpage, chimie et en contraction mécanique, mais dans ce travail on va voir l'utilisation d'arc plasma en soudage.

Le soudage plasma est essentiellement complémentaire du soudage TIG, dont la densité d'énergie et la vitesse d'éjection du plasma sont plus importantes, ainsi que la puissance volumique est grande, ce qui fait que les arcs de plasma peuvent atteindre des températures allant jusqu'à 24000°C. D'autre part, il est possible d'obtenir des vitesses de soudage plus élevées. L'apport d'énergie est assuré par un arc électrique jaillissant sous une atmosphère de gaz neutre.

#### I-8-4- L'appareillage :

Les plasmas sont produits par des générateurs à arc appelés *torches à plasma* ou *chalumeaux à plasma*. Ces générateurs sont constitués de deux électrodes alimentées en courant continu ou alternatif. Ils refroidies à l'eau (l'appareillage est représenté sur la figure (I-9)) [11]. Le procédé de soudage plasma nécessite deux flux de gaz :

**a-Gaz central** (pour la constriction de l'arc) : l'est le gaz plasmagène, où le gaz plasmagène est entre une électrode en tungstène et les pièces à assembler, en général il est constitué d'un gaz primaire de densité élevée (argon, azote), et d'un ou deux gaz secondaires d'enthalpie et de conductivité thermique plus élevées (hydrogène, hélium), le mélange de ces gaz est injecté dans la torche au niveau de la cathode. L'injection des gaz plasmagènes peut être [12, 13]:

- *Injection axiale:* la bague d'injection est percée de trous parallèles à l'axe de la cathode. Les gaz ont donc une composante de vitesse longitudinale.
- *Injection en vortex:* la bague d'injection est percée de trous qui présentent un certain angle par rapport à l'axe longitudinal, de manière à créer une composante de rotation des gaz plasmagènes.
- *Injection radiale:* la bague d'injection est percée de trous orthogonaux à l'axe longitudinal de la cathode. Au départ, la vitesse des gaz présente donc une forte composante radiale qui s'atténue ensuite.

**b- Gaz extérieur** (un gaz de protection) : qui est formé d'un mélange d'argon et d'hydrogène, il peut également être utilisé comme gaz d'orifice.



Figure (I-9): torche à plasma.

#### I-8-5- Torche à plasma :

#### • L'arc transféré et l'arc non transféré

On distingue deux modes de fonctionnement appelés arc transféré ou arc non transféré, suivant que l'arc est réalisé entre l'électrode et la pièce à souder ou qu'il est établi entre l'électrode et la buse de constriction.

Le mode par arc transféré fourni une énergie incidente plus importante coupant l'énergie du plasma et de l'arc; c'est le mode couramment utilisé en soudage.

Le mode par arc non transféré permet de ne pas faire entrer la pièce dans le circuit électrique (soudage de pièces non conductrices) mais fournit une énergie moins concentrée que précédemment; il est principalement utilisé pour la découpe [3].

#### Utilisation potentielle de la torche à plasma d'arc :

La torche à plasma d'arc peut être employée suivant divers modes [14]:

- 1- En tant que source d'énergie thermique, elle est plus souvent utilisée en générateur monoénergie (électrique) avec arrivée de gaz plasmagène au niveau de la torche et appoint de gaz mélangé en sortie de torche. Le gaz plasmagène peut être de l'air. Elle peut aussi être utilisée en générateur thermique bi-énergie. Les gaz plasmas se mélangent en sortie de torche avec un combustible fossile, dont le plasma facilitera la combustion. Le poids relatif des sources d'énergie dépendra à l'évidence des coûts relatifs de chaque source d'énergie (gaz, fioul, charbon...).
- 2- Dans un processus réactionnel, elle peut d'une part : créer une flamme avec des capacités réactionnelles. Le gaz ionisé, injecté à haute température, créera dans un réacteur distinct de la torche, le régime thermique et les mélanges gazeux, nécessaires aux équilibres physico –chimiques des réactions. D'autre part, la torche peut constituer le réacteur du
- 3- procédé, la réaction de synthèse se produisant au niveau de l'arc électrique. C'est le cas du procédé de synthèse de l'acétylène (procédé HULS) ou des oxydes d'azote.

#### I-8-6- Les formes du soudage plasma :

Le soudage plasma est utilisé sous les formes suivantes :

• *Le soudage micro plasma* : le procédé micro plasma est employé pour le soudage des métaux nobles de faible comme les aciers, titane, zirconium, alliages argent...

Il trouve son les applications dans les industries produisant des composants électriques, filtres métalliques et dans applications de faible puissance avec des courants de soudage de l'ordre de l'ampère (L'intensité de 0,1 à 20 ampères).

• Le soudage plasma moyen : intensités de 20 à 100 ampères.

• Le soudage au plasma proprement dit : on s'est aperçu que pour des applications industrielles favorables à l'emploi du TIG, le plasma présentait un avantage pratique déterminant quant à la protection de l'électrode des vapeurs polluants. Mais c'est surtout pour son effet de pénétration que le soudage au plasma est utilisé. Il permet de développer des soudures en une passe sur des épaisseurs moyennes et d'éviter la réalisation toujours coûteuse d'un chanfrein ; les intensités son alors de 100A et plus [5].

#### I-8-7- Domaine d'application :

Les plasmas d'arc d'introduction ont été appliqués dans le traitement industriel des matériaux, par exemple dans les fours à arc électrique, le traitement des minerais et dans la fonte d'arc (l'application la plus importante est probablement la soudure à l'arc électrique). Il sert à l'assemblage de pièces jusqu'à une épaisseur 8 mm avec le procède de soudage plasma.

Le soudage permet l'assemblage de la plupart des métaux, et l'épaisseur de 3 à 7 mm pour le soudage au plasma et 0.05 à 3 mm pour le soudage au micro plasma [1].

#### I-8-8- Avantages du soudage plasma:

On peut noter quelques avantages du soudage plasma [15]:

 Possibilité de souder des pièces de très faibles épaisseurs (0,05 mm dans le cas du micro plasma).

- ✓ Possibilité d'obtenir de faibles valeurs de pénétration.
- ✓ Procède automatisé (précision et qualité dimensionnelles des soudures réalisées).

#### I-8-9- Comparaison entre une torche TIG et une torche plasma:

On peut remarquer quelques différents avantages de soudage plasma par rapport au soudage TIG [4]:

- La concentration d'énergie permet d'utiliser des vitesses opératoires plus grandes ou des intensités plus faibles pour une profondeur de pénétration souhaitée. Les pénétrations maximales sont plus importantes qu'en TIG, permettant de réaliser de nombreuses applications en une passe, sans préparation de bords, ni de métal d'apport ;
- Le volume fondu et la zone thermiquement affectée sont plus étroits ;
- La stabilité et la rigidité d'arc sont améliorées et le jet de plasma est partiellement orientable;
- > Le procédé plasma constitue l'évolution technologique majeure du procédé TIG ;
- Dans le procédé au plasma les vitesses de soudage sont supérieures.

Il apparaît clairement à partir des isothermes présentées dans la figure (I-10) [15].

#### • En plasma :

- La zone des températures de 16000 à 24000 K est hors de la tuyère.
- La zone des températures de 10000 à 16000 K est entre la cathode et la pièce.

#### • *En TIG* :

La zone des hautes températures est trop proche de la cathode.

Si l'on considère la zone des températures comprises entre 4000 et 10000 K on constate qu'elle est étroite en plasma et plus largement épanouie en TIG.



**Figure (I-10)** : Comparaison ente une torche TIG et torche plasma (J. Philippe Pérez et al [17])

#### I-8-10- Comportement du bain liquide :

On peut étudier les différents courants propres au bain de fusion ainsi que les effets de l'arc sur la surface du bain. Le bain fondu est soumis à plusieurs forces présentées en figure (I-11) :



Figure (I-11) : les différents courants du bain de fusion.

#### - La pression d'arc :

La dépression d'arc en surface du bain, selon BURGARDT et HEIPLE, va favoriser la pénétration en diminuant l'épaisseur du film liquide, celui-ci joue un rôle d'isolant face à la source thermique. EROKHIN décrit la répartition de la pression d'arc par une loi gaussienne dont la valeur maximale est fonction du carré de l'intensité [3] :

$$P(r) = KI^2 e^{(-ar)} \tag{I-1}$$

Où k et a sont fonction de la longueur d'arc, du diamètre et de la géométrie de l'électrode.

#### - Le cisaillement aérodynamique :

Ce cisaillement est le résultat du passage du gaz de protection à la surface de bain. Il crée en surface des courants centrifuges qui vont élargir le bain. L'intensité de cet effet est fonction de la nature de gaz de protection.

#### - Les forces de Lorentz :

Pour ce qui est du champ magnétique induit par l'arc électrique, il est la source des forces de Lorentz intervenant au sein du métal fondu. Les courants résultants peuvent être importants, modifiant fortement la géométrie fondue obtenue. La célérité de convection dépend de l'intensité du champ magnétique et donc de l'intensité et de la densité de courant appliqué. Cette densité évolue fortement avec la hauteur d'arc et la géométrie d'électrode [4].

#### - Les forces de flottabilité :

Les forces de flottabilité sont issues des gradients thermiques dans les fluides qui, en fait, provoquent des variations de masse volumique. Les champs de température au sein du bain conduisent, de plus, à des vitesses d'écoulements très réduits.

#### -Microchimie et morphologie de bain-courants de Marangoni :

HEIPLE et ROPET sont les premiers à suggérer l'influence prédominante des courants de Marangoni issus des modifications spatiales des tensions de surface Dopage des nuances étudiées, ils mettent en évidence des courants de convection qui peuvent être centrifuges ou centripètes et qui vont conduire, s'ils sont suffisamment intenses, à des morphologies de bain radicalement différentes.

#### -La tension de surface :

C'est à la fin de XIX<sup>e</sup> siècle que G.C.M. MARANGONI a constaté et mis en évidence ce phénomène. Il avait remarqué les déplacements de gouttes de vin sur une surface d'eau et les mouvements à l'existence d'un gradient de tension de surface sur le liquide.

On associe alors volontiers une relation linéaire entre la valeur de la tension de surface et la température du liquide par :

$$\gamma(T) = \gamma_{Tf} - \left(T - Tf\right) \left(\frac{\partial \gamma}{\partial T}\right)$$
(I-2)

Où :  $\gamma_{Tf}$  est la tension de surface à la température de fusion  $T_{f}$ .
MILLS et KEENE définissent, dans le cas du soudage à l'arc, un nombre caractéristique des écoulements thermo capillaires de Marangoni par :

$$Ma = \left(\frac{d\gamma}{dT}\right)\left(\frac{dT}{dX}\right)L^2 \alpha\mu \tag{I-3}$$

Où : *L* caractérise la largeur caractéristique du bain,  $\mu$  la viscosité dynamique du métal liquide et  $\alpha$  le coefficient de diffusivité thermique du métal  $\mu$ .

Ce nombre permet de caractériser les perturbations d'écoulement du bain métallique, notamment l'apparition d'oscillations et de déformations du bain [4].

#### I-8-11- Energie de soudage :

1- Energie nominale : c'est l'énergie directement fournie par l'arc, elle est exprimée en KJ/cm.

$$E_n = \frac{(60 \cdot U \cdot I)}{(1000 \cdot V)} \tag{I-4}$$

V : vitesse de soudage (vitesse de dépôt), en cm/min, U en Volt et I en Ampère.

**2-Energie équivalente :** elle résulte d'une correction de l'énergie nominale en fonction du coefficient K et du rendement de l'arc n ( $E_{eq}=K.E_n.n$ ; *n* est fonction du procédé de soudage, du type de courant, de l'épaisseur des pièces assemblées et de la nature des métaux) [1].

## I-9- Equations sur les champs électromagnétiques :

Le phénomène physique de l'électromagnétisme est souvent décrit par les modèles mathématiques (les équations de J-C MAXWELL).

Les équations de MAXWELL sont données par [16,17]:

$$div\vec{B} = 0 \Leftrightarrow \oiint \vec{B}.\vec{ds} = 0 \tag{I-5}$$

$$ro\vec{t}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \Leftrightarrow \oint_{c} \vec{E}.\vec{dl} = -\frac{d}{dt} \iint_{s} \vec{B}.\vec{ds}$$
(I-6)

$$ro\vec{t}\vec{E} = \vec{0} \tag{I-7}$$

$$div\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \Leftrightarrow \oiint \vec{E}.\vec{ds} = \frac{1}{\varepsilon_0} \iiint_r \rho.d\tau$$
(I-8)

$$\overrightarrow{rotB} = \mu_0 \vec{j} \Leftrightarrow \oint_C \vec{B}.\vec{dl} = \mu_0 \iint \vec{j}.\vec{ds}$$
(I-9)

La première formule représente la conservation du flux magnétique, et les équations (I-6), (I-8), (I-9) décrit la loi de faraday, la loi de Gauss, et la loi d'ampère respectivement.

En utilisant du potentiel vecteur magnétique  $\overrightarrow{A}$  et du potentiel scalaire électrique V dans les équations (I-4) et (I-6), nous déduisons la valeur de la composante azimutale du champ magnétique par la relation suivante [16, 18,19]:

$$(I-5) \Rightarrow div\vec{B} = 0 \Rightarrow \vec{B} = ro\vec{t}\vec{A}$$
 (I-10)

Le problème est géométrie cylindrique et en considérant les composantes du potentiel vecteur magnétique  $\overrightarrow{A} : A_r \text{ et } A_z$ , on obtient :

$$B_{\theta} = \left(\frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r}\right) \tag{I-11}$$

Le champ électrique est rotationnel  $(rot \vec{E} = \vec{0})$  donc il dérive d'un potentiel noté V :

$$\left(\vec{E} = -\overrightarrow{grad}V\right) \tag{I-12}$$

#### -La densité de courant J :

Dans la région du plasma la densité de courant s'écrit comme suit [18, 19] :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$
 (Loi d'ohm) (I-13)

En combinant les équations précédentes (I-5), on obtient :

$$\vec{j} = -\sigma \cdot \overrightarrow{grad} V \tag{I-14}$$

Les composants de la densité de courant sont  $J_r$  et  $J_z$ , qui sont déduits du potentiel scalaire électrique V :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \Rightarrow j_r = -\sigma \frac{\partial V}{\partial r}, j_z = -\sigma \frac{\partial V}{\partial z}$$
 (I-15)

## I-10- Le fluide :

#### I-10-1- Définition du fluide:

Le fluide est un matière (gaz ou liquide) caractérisé par ses molécules qui sont très mobiles, les unes par rapport aux autres. Le fluide peut se déplacer sous l'action de très faible effort ; il est facilement déformable.

Tous les gaz et un grand nombre de liquides usuels comme l'eau, les alcools, le benzène sont newtoniens. Il existe, cependant, beaucoup de liquides qui ne suivent pas la loi de newton; comme les solutions des polymères, les graisses, les solutions de caoutchouc, le sang, on les appelle des fluides non newtoniens [20].

Les propriétés des fluides sont :

- l'isotropie,
- les mobilités,
- les compressibilités,
- la viscosité.

On appelle fluide incompressible le liquide à gouttes ou le gaz pour lesquels la dépendance entre la densité et la pression peut être négligée dans le problème considéré.

On appelle fluide compressible le gaz pour lequel la dépendance entre la densité et la pression ne peut être négligée dans le problème considéré [21].

#### I-10-2- Généralités et lois de conservation :

On distingue deux types de fluides :

-Le fluide incompressible: la masse volumique constant ( $\rho$  = cte).

-Le fluide compressible : sa masse volumique varie ( $\rho \neq$  cte).

#### I-10-2-1- Equations de conservation :

L'étude de la dynamique des fluides est basée sur trois principes fondamentaux qui sont : le principe de conservation de la masse, le principe de conservation de la quantité de mouvement et le principe de conservation de l'énergie [22, 23, 24].

#### • Equation de continuité (Conservation de la masse) :

On peut exprimer l'équation de continuité sous la forme suivante:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \vec{V}) = 0 \tag{I-16}$$

Où  $\rho$  représente la masse volumique,  $\vec{V}$  la vitesse du fluide  $\vec{V} = (V_r, V_\theta, V_z)$ .

L'équation de continuité pour un fluide incompressible ( $\rho = cte$ ) s'écrit comme suite :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho.div \quad \vec{V} = 0 \tag{I-17}$$

Dans le cas le fluide compressible (c.-à-d.  $\rho \neq$  cte) l'équation de continuité est donnée par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho.div \ \vec{V} + \vec{V}. \ \vec{grad} \ \rho = 0 \tag{I-18}$$

Équation de Navier Stokes (Conservation de la quantité de mouvement d'un fluide) :
 L'équation du mouvement d'un fluide incompressible en coordonnées cylindriques est :

$$\begin{cases} \rho \left( \frac{dV_r}{dt} - \frac{V_{\theta}^2}{r} \right) = g_r \rho - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left( \Delta V - \frac{V_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_{\theta}}{\partial \theta} \right) \\ \rho \left( \frac{dV_{\theta}}{dt} + \frac{V_r V_{\theta}}{r} \right) = g_{\theta} \rho - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left( \Delta V_{\theta} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_{\theta}}{\partial \theta} - \frac{V_{\theta}}{r^2} \right) \\ \rho \frac{dV_z}{dt} = g_z \rho - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \Delta V_z \end{cases}$$
(I-19)

Où *p* est la pression et  $\vec{g}$  est la gravité.

L'équation du mouvement pour un fluide compressible est de la forme [23, 24] :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) + S_{ij}(-\frac{2}{3}\mu)div\vec{V}) \quad (I-20)$$

Avec : i=1, 2,3 ; j=1, 2,3

On peut écrire cette équation en coordonnées cylindriques sous la forme suivante :

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rV_{r}\rho\Phi) + \frac{1}{r}\frac{\partial(V_{\theta}\rho\Phi)}{\partial\theta} + \frac{\partial}{\partial z}(V_{z}\rho\Phi) = \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma\Phi\frac{\partial\Phi}{\partial z}) + \frac{1}{r^{2}}\frac{\partial}{\partial\theta}(\Gamma\Phi\frac{\partial\Phi}{\partial\theta}) + \frac{1}{r^{2}}\frac{\partial}{\partial\theta}(\Gamma\Phi\frac{\partial\Phi}{\partial\theta}) + \frac{1}{r^{2}}\frac{\partial}{\partial\theta}(\Gamma\Phi\frac{\partial\Phi}{\partial\theta})$$
(I-21)

Donc :

L'équation de la vitesse suivant *r* :

$$\frac{\partial(\rho V_r)}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho V_r V_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial(\rho V_\theta V_r)}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z V_r) = \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma^{Vr}\frac{\partial V_r}{\partial z}) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}(\Gamma^{Vr}\frac{\partial V_r}{\partial \theta}) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma^{Vr}\frac{\partial V_r}{\partial r}) + S\Phi$$
(I-22)

L'équation de la vitesse suivant  $\theta$  :

$$\frac{\partial(\rho V_{\theta})}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho V_{r}V_{\theta}) + \frac{1}{r}\frac{\partial(\rho V_{\theta}V_{\theta})}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_{z}V_{\theta}) = \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma^{\theta}\frac{\partial V_{\theta}}{\partial z}) + \frac{1}{r^{2}}\frac{\partial}{\partial \theta}(\Gamma^{V\theta}\frac{\partial V_{\theta}}{\partial \theta})$$
(I-23)
$$+ \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma^{V\theta}\frac{\partial V_{\theta}}{\partial r}) + S^{\theta}$$

L'équation de la vitesse suivant *z* :

$$\frac{\partial(\rho V_{z})}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho V_{r}V_{z}) + \frac{1}{r}\frac{\partial(\rho V_{\theta}V_{z})}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_{z}V_{z}) = \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma^{Vz}\frac{\partial V_{z}}{\partial z}) + \frac{1}{r^{2}}\frac{\partial}{\partial \theta}(\Gamma^{Vz}\frac{\partial V_{z}}{\partial \theta}) + \frac{1}{r^{2$$

## • Equation de l'énergie (Conservation de l'énergie) :

L'équation de l'énergie d'un fluide incompressible est écrite en coordonnées cylindriques Sous la forme suivante [21] :

$$C\rho \frac{dT}{dt} = div \left( K \cdot \overrightarrow{grad} T \right)$$
(I-25)

et *K* est la conductivité thermique.

Ainsi, l'équation de l'énergie d'un fluide compressible en coordonnées cylindriques devient :

$$C\rho \frac{\partial(\rho VT)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho V_r T)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(\rho V_\theta T)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho V_z T)}{\partial z} = div(KgradT) + \varphi$$
(I-26)

Où :

$$\varphi = \mu \begin{bmatrix} 2 \left[ \left( \frac{\partial V_r}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial V_{\theta}}{\partial \theta} + \frac{V_r}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + \frac{\partial V_{\theta}}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right)^2 \\ + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial V_{\theta}}{\partial r} - \frac{V_{\theta}}{r} \right)^2$$

$$+ \mu \left[ \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{\partial r} \frac{\partial V_{\theta}}{\partial \theta} + \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right]^2$$

$$(I-27)$$

Les équations de continuité, de la quantité de mouvement et de l'énergie d'un fluide compressible se résument sous la forme suivante [2,18, 19] :

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + div(\rho\vec{V}\Phi) = div(\Gamma\Phi grad\Phi) + S\Phi$$
(I-28)

Où *S* représente le terme source

# <u>Références bibliographiques</u>

- S. Benissaad ; 'Le soudage TEC 340', Université de Constantine ; Institut de Génie Mécanique ; édition OPU ; Algérie ; 1991.
- [2] C. Ferdinand ; Doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse ; Novembre ; 2005.
- [3] R. Cazes; 'Montage des pièces pour soudage à l'arc électrique'; Technique de l'ingénieur; traité génie mécanique (centre France) (BM7610); 1995.
- [4] P. Nicolas ; Thèse de doctorat; Université de Nantes , juin 2000.
- [5] R. Cazes ; Soudage à l'arc ; Technique de l'ingénieur ; traité génie mécanique (centre France) (B7730) ; 1995.
- [6] Ca. Godin ; 'Guide de prévention soudage –coupage' ; Canada ; 2000.
- [7] M. Cluade Michel ; De l'institut de soudage du Québec ; pp 446-136.
- [8] P. Bradu ; 'L'univers des plasmas' ; Edition : Paris ; 2001.
- [9] L. Benmebrowk ; Mémoire de magister ; Université de Ouargla ; 2003.
- [10] Y. Benzehi, Mémoire de magister ; Université de Ouargla ; 2003.
- [11] S. M. Aithal et V. V. Subramaniam; J. Appl. Phys, Vol. 84, No. 7; 1998.
- [12] J. Patru ; Doctorat de l'université de Limoges ; décembre 2005
- [13] Introduction générale Thèse body (titre rechargé : torche à plasma ; soudage Mécanique de fluide) ; Article sur intrnet.
- [14] M. Labrot; M. Moneuse et C. Boisdon; 'Torche à plasma'; Edition Paris.
- [15] Procédés plasma et TIG, SAF, www.saf-airliquide.com.
- [16] M. Bertin; J. P. Froux et J. Renault ; 'Cours de physique- Electromagnétisme' ; 3<sup>eme</sup>
   Edition Bordas ; Paris ; 1986.
- [17] J. Philippe Pérez, R. Calet et R. Fleckinger ; 'Electromagnétisme' ; Paris ; 2002.
- [18] P. Freton, J. J. Gonzalez et A. Gleize ; 'Comparison between a two and a three dimensional arc plasma configuration' ; J. Phys. D: Appl. Phys. 33, pp2442-2452; 2000.
- [19] P. Freton, J. J. Gonzalezm, A. Gleizes, F Camy Peyret, G.caillibotte et M.Delzenne ; 'Numerical and experimental study of a plasma cutting troche'; J. Phys.D : appl.Phys.

**35**; pp 115-131; 2000.

- [20] O. Babahani ; Mémoire de magister ; Université de Ouargla ; Mai 2004.
- [21] B. Yavorski et A. Detlaf, 'Aide mémoire de physique' ; Edition Mir Moscou; 1986
- [22] R. Comolet ; 'Mécanique expérimentale des fluides' ; Edition Masson, Paris Milan Barcelone ; Paris ; 1994.
- [23] N. Duodi ; Mémoire de magister ; Université de Ouargla ; 2006.
- [24] H.K. Versteeg et W. Malalase Kera; 'An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method'; Malaysia; 1995.

# **Chapitre II**

# Modélisation numérique du comportement fluide des torches à plasmas

## **II–1- In0troduction :**

Les torches à plasma d'arc couvrent maintenant une gamme de puissance variant de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts. Elles sont utilisées dans des applications variées dont les principales sont : le découpage, le soudage, le rechargement par arc transférés, la projection par plasma. Les applications en cours de développement concernent la destruction des déchets, la fabrication de pièces de forme par plasma formage et le chauffage de l'air (production de métaux) [1]. Dans une torche à plasma, un arc électrique est créé au sein d'une atmosphère de gaz inerte entre deux électrodes.

Pour étudier les propriétés de la torche à plasma, nous allons utiliser les équations de conservation, et nous allons utiliser la modélisation mathématique et numérique d'une torche à plasma pour trouver la solution de ces équations. Il y a de nombreuses méthodes numériques comme la méthode des différences finies, des éléments finis, et de volumes finis. On peut définir ces méthodes respectivement comme suit [2] :

La méthode de différence finie (MDF) est basée sur la discrétisation du domaine d'étude et le développement limité en série de Taylor de la fonction à déterminer en chacun des nouds du maillage. Ainsi, l'équation différentielle est transformée en équation algébrique en chacun des nœuds. L'écriture de cette transformation pour tous les nœuds du maillage conduit à un système algébrique dont la solution permet d'obtenir la distribution de l'inconnue dans le domaine d'étude. Chapitre II

La méthode des éléments finis MEF est utilisée pour la résolution des équations différentielles dans des sciences de l'ingénieur. Le principe de la méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en régions élémentaires (éléments finis) et à représenter l'inconnu par une approximation polynomiale dans chacune de ces régions, ensuite, l'erreur due à l'approximation doit être minimisée.

La méthode de volumes finis (MVF) est une méthode de discrétisation, elle a connu un essor considérable non seulement pour la modélisation en mécanique des fluides, mais aussi pour la modélisation d'autres branches de l'ingénierie scientifique : la thermique, l'électromagnétisme etc.

Ce travail traite la modélisation mathématique et numérique d'une torche à plasma. Le modèle est basé sur la résolution des équations de conservations et des équations électromagnétismes par la méthode des déférences finies.

## II-2- Description de la torche à plasma :

La torche à plasma est représentée sur la figure (I-1), dans Le procédé de soudage plasma nécessite deux flux de gaz : gaz central (pour la constriction de l'arc) et gaz extérieur (un gaz de protection) qui est formé d'un mélange d'argon et d'hydrogène, il peut également être utilisé comme gaz d'orifice. On peut considérer les données suivantes:

- Le débit du gaz plasma est de 45 l/min
- Le diamètre de l'orifice du gaz plasma est 2 mm.
- La distance entre la torche et la pièce à souder est 10 mm
- L'intensité du courant est de 60 à 150 A



Figure (II-1) : schéma d'une torche à plasma (d'après S. M. Aithal et al [3]).

## II-3- Définition du phénomène physique :

La cathode émit les électrons qui rentrent en collisions avec les atomes du gaz ; par conséquent le gaz est ionisé. On peut noter que le gaz utilisé peut être de l'argon. Nous obtenons un milieu de plasma qui contient des atomes ionises et des électrons comme le montre la figure (II-1) [3].



Figure (II-2): phénomènes de constriction.

Ce travail est basé sur les hypothèses suivantes : le plasma est considéré comme fluide, le système est à symétrie cylindrique, l'écoulement est stationnaire et les effets de la gravité sont négligés [4]. Aussi, on peut ajouter d'autres hypothèses qui se résument aux points suivants:

1/ le fluide est newtonien.

2/ la température est constante (10000 K).

3/ le régime de l'écoulement est laminaire.

On peut noter que la viscosité des plasmas est 10 fois plus importante à 10000 K que celle du gaz à la température ambiante [5], donc la viscosité du fluide incompressible ("homogène") est  $\mu_0=3.exp$  (-4) et celle fluide compressible ("non homogène") est variable ( $\mu_0=$ variable).

## II-4- Définition du modèle mathématique :

Pour trouver la distribution de la vitesse du fluide, on résoud l'équation de Navier – Stokes pour la composante  $V_z$  et l'équation de continuité pour la composante  $V_r$ . Dans ce traitement on utilise les coordonnées cylindriques et on tient compte de la condition de

symétrie  $\left(\frac{\partial(...)}{\partial\theta}=0\right)$  pour les équations de conservations.

On peut réduire les équations de conservation citées dans le chapitre I, pour les deux fluides incompressible et compressible ; on obtient :

#### II-4-1- Cas du fluide incompressible:

• Equation de continuité :

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rV_{r}\right) + \frac{\partial V_{z}}{\partial z} = 0 \tag{II-1}$$

- Equation de la quantité de mouvement :
  - 1- équation de la vitesse suivant r :

$$\rho(V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z}) = \mu(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r}(\frac{V_r}{r}) + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2})$$
(II-2)

2- équation de la vitesse suivant z :

$$\rho(V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial V_z}{\partial z}) = \mu(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}) \quad \text{(II-3)}$$

## II-4-2- Cas du fluide compressible:

## • Equation de continuité :

L'équation de continuité s'écrit :

$$\rho \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r V_r \right) + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right] + V_r \frac{\partial \rho}{\partial r} + V_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$$
(II-4)

On peut écrire cette équation sous la forme suivante :

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rJ_r) + \frac{\partial}{\partial z}(J_z) = 0$$
(II-5)

## • Equation de la quantité de mouvement :

*l*- équation de la quantité de mouvement suivant r:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\rho r V_r^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_r V_z) = \frac{4}{3}\mu \frac{\partial}{\partial r}(\frac{\partial V_r}{\partial r}) + \mu \frac{\partial}{\partial z}(\frac{\partial V_r}{\partial z}) - \frac{2}{3}\frac{\mu}{r}\frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{2}{3r}\mu(\frac{\partial V_r}{\partial r}) + \frac{1}{3}\frac{\partial}{\partial z}(\frac{\partial V_z}{\partial r}) - j_z B_{\theta}$$
(II-6)

2- Equation de la quantité de mouvement suivant z:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho \ V_z V_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z^2) &= \frac{4}{3}\frac{\mu\partial^2 V_z}{\partial z^2} + \mu\frac{\partial}{\partial r}(\frac{\partial V_z}{\partial r}) \\ &+ \frac{\mu}{r}(\frac{\partial V_z}{\partial r}) - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial}{\partial z}(\frac{V_r}{r}) \\ &+ \frac{\mu}{r}(\frac{\partial V_r}{\partial z}) + \frac{1}{3}\mu\frac{\partial^2 V_r}{\partial r\partial z} + j_r B_{\theta} \end{aligned}$$
(II-7)

L'équation de la continuité et de la quantité de mouvement se résume sous la forme suivante [6,7]:

$$div(\rho \vec{V}\Phi) = div(\Gamma^{\Phi} grad \Phi) + S^{\Phi}$$
(II-8)

On peut écrire cette équation sous la forme suivante :

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho V_{r}\Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_{z}\Phi) = \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma^{\Phi}\frac{\partial\Phi}{\partial z}) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma^{\Phi}\frac{\partial\Phi}{\partial r}) + S^{\Phi} \quad (\text{II-9})$$

Le tableau suivant donne les expressions des termes  $\Phi$ ,  $\Gamma^{\Phi}$  et  $S^{\Phi}$  selon les équations de continuité et de la quantité de mouvement:

Equation	Φ	$\Gamma^{\Phi}$	sΦ				
Continuité	1	0	0				
Mouvement suivant r	V <sub>r</sub>	μ	$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\mu\frac{\partial V_r}{\partial z}) - \frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial z}(\mu\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}[rV_r]) + \frac{1}{3}\frac{\partial}{\partial z}(\mu\frac{\partial V_z}{\partial z}) + j_r B_{\theta}$				
Mouvement suivant z	Vz	μ	$\frac{1}{3r}\frac{\partial}{\partial r}(r\mu\frac{\partial V_r}{\partial r}) - \frac{2}{3r}\frac{\partial}{\partial r}(\mu V_r) - \frac{2}{3r}\frac{\partial}{\partial r}(\mu r\frac{\partial V_z}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}\mu\frac{\partial V_z}{\partial r} - J_z B_{\theta}$				

Tableau (II-1) : résumé de l'équation de conservation.

## II-4-3- Equations sur les champs électromagnétiques :

Le phénomène physique de l'électromagnétisme est souvent décrit par les modèles mathématiques (les équations de J-C MAXWELL).

L'équation de MAXWELL est donnée par [8,9]:

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0 \Leftrightarrow \oiint\vec{B}.\vec{ds} = 0 \tag{II-10}$$

$$\overrightarrow{rot}\vec{B} = \mu_0 \vec{j} \iff \oint_C \vec{B}.\vec{dl} = \mu_0 \iint \vec{j}.\vec{ds}$$
(II-11)

$$B_{\theta} = \frac{\mu_0}{r} \int_0^R J_z r \, dr \tag{II-12}$$

Le champ électrique et Les composants de la densité de courant sont :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \Longrightarrow E_r = J_r / \sigma, E_z = J_z / \sigma$$
 (II-13)

$$J_r = \rho_e V_r \tag{II-14}$$

$$J_z = \rho_e V_z \tag{II-15}$$

L'équation de la densité d'énergie électromagnétique est donnée par:

$$E_n = 0.5(\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B_{\theta}^2)$$
(II-16)

Où :  $\varepsilon_0 = 8,85.10^{-12} (C^2 / Nm^2)$ ;  $\mu_0 = 4\pi . 10^{-7} (H / m)$ 

## II-5- Les conditions initiales et les conditions aux limites :

La figure ci-dessous représente les conditions aux limites et les conditions initiales de la torche :



Figure (II-3) : conditions aux limites et conditions initiales de la torche à plasma.

	AB	BC	KD	GF	ED	DC	FK	KB	AG
V <sub>r</sub>	$V_r = 0$	$V_r = 0$	<i>Vr</i> = 0.0	<i>Vr</i> = 0.0	$\frac{\partial Vr}{\partial r} = 0.$	<i>Vr</i> = 0.0	$\frac{\partial Vr}{\partial r} = 0.0$	<i>Vr</i> = 0.0	$V_{Z} = 0.0$
V <sub>z</sub>	Vz = Vini	$V_z = 0$	Vz = 0.0	Vz = 0.0	Vz=0.0	Vz = 0.0	$V_{Z} = 0.0$	<i>V<sub>r</sub></i> = 0	$\frac{\partial Vz}{\partial z} = 0.0$

Tableau (II-2) : conditions initiales et condition s aux limites.

Nous utilisons les conditions pour le champ magnétique telles que :

-Dans la valeur de r = 0 :  $B_{\theta} = 0.0$ 

## II-6- Description des méthodes numériques de résolution :

La figure ci-dessous représente la description de la torche :



Figure (II-4) : description de la torche à plasma.

#### II-6-1-Calcul des vitesses :

Pour résoudre les équations de continuité et les équations de Navire – Stokes dans le fluide incompressible, il faut résoudre les équations dans le fluide compressible, où la solution du cas fluide incompressible représenté la solution initiale du cas fluide compressible.

#### II-6-1-1- Calcul de la vitesse dans le cas du fluide incompressible :

Pour calculer la composante de vitesse suivante z dans le fluide incompressible, on peut utiliser la méthode itérative, l'algorithme de Gauss Seidel. D'autre part, la méthode directe (équation de continuité) est valable pour calculer la composante de vitesse suivant **r**. Nous appliquons la condition de symétrie  $\frac{\partial(...)}{\partial \theta} = 0$ , et nous avons choisi la méthode des différences finies dans toute l'étude.

Les équations à résoudre seront :

$$\begin{cases} \rho(V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z}) = \mu(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV_r) + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \end{cases}$$
(II-17)

On pose : 
$$\begin{cases} V_r = U \\ V_z = V \end{cases}$$

L'équation différentielle pour la vitesse V sera :

$$\begin{aligned} & \frac{-\mu}{dh^2} V_{i-1,j} + (-\frac{\rho U_{i,j}}{dh} + \rho (V_{i,j+1} - V_{i,j}) \frac{1}{dz} + \mu \frac{i-1}{dh^2} \\ & + \frac{2\mu}{dz^2} + \frac{2\mu}{dh^2}) V_{i,j} + (\rho \frac{U_{i,j}}{dh} - \frac{2^* \mu}{(r(i,j) + r(i+1,j))dh} + \frac{\mu}{dh}) V_{i+1,j} \quad (\text{II-18}) \\ & = \frac{\mu}{dz^2} (V_{i,j+1} + V_{i,j-1}) \end{aligned}$$

On peut simplifier l'équation (II-18) à la forme suivante :

$$\alpha X_{i-1, j} + \beta X_{i, j} + \gamma X_{i+1, j} = \phi_{i, j}$$
(II-19)

Cette équation peut être réécrite sous forme matricielle A.X=B, où la matrice A est tridiagonale. Le système tridiagonal est représenté par la forme matricielle suivante [10] :

L'équation différentielle pour la vitesse U sera :

$$U_{i+1,j} = \frac{r(i,j)}{r(i+1,j)} U_{i,j} \frac{(r(i,j)+r(i+1,j))dh}{2r(i+1,j)dz} (V_{i,j+1} - V_{i,j})$$
(II-20)

Les conditions aux limites pour les vitesses seront :

$$U_{i,1} = 0.0$$
 et  $U_{i,n+1} = 0.0$   
 $V_{i,1} = V_{ini}$  et  $V_{i,n+1} = 0.0$ 

### II-6-1-2- Calcul de la vitesse dans le cas du fluide compressible :

1. Equation de mouvement suivant r

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\rho r V_r^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_r V_z) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\mu\frac{\partial V_r}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu\frac{\partial V_r}{\partial z}) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\mu\frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{2}{3}\mu r(\frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}\mu\frac{\partial V_z}{\partial r}$$
(II-21)

2. Equation de mouvement suivant z :

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho V_r V_z) + \frac{\partial}{\partial}(\rho V_z^2) = \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial V_z}{\partial z}) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\mu \frac{\partial V_z}{\partial r}) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\mu \frac{\partial V_z}{\partial r}) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial z}(r\mu \frac{\partial V_z}{\partial z}) - \frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial z}\mu(\frac{1}{r}\frac{\partial(rV_r)}{\partial r}) + \frac{1}{3}\frac{\partial}{\partial z}\mu(\frac{\partial V_z}{\partial z}) - \frac{\partial P}{\partial z} + j_r B_{\theta}$$
(II-22)

Dans le calcul de la vitesse dans le cas où le fluide est compressible .Nous appliquons la condition de symétrie dans toute l'étude  $\frac{\partial(...)}{\partial \theta} = 0$  Et  $\mu = cte$ . On pose :

$$\begin{cases} V_r = U \\ V_z = V \end{cases}$$

L'équation différentielle pour la vitesse V<sub>z</sub> s'écrit sous la forme suivante :

$$\alpha X_{i-1, j} + \beta X_{i, j} + \gamma X_{i+1, j} = \phi_{i, j}$$
(II-23)

• L'équation différentielle pour la vitesse V sera :

$$\begin{split} &((\frac{2}{(r(i+1,j)+r(i,j))}\rho_{i,j}-\frac{2}{dh}\rho_{i,j})U_{i,j}+\frac{\rho_{i,j}}{dh}U_{i+1,j}+\frac{2}{dz}\rho_{i,j}(V_{i,j}-V_{i,j-1}) \\ &+((\frac{2}{(r(i+1,j)+r(i,j))dh}+\frac{1}{dh^2}+\frac{8}{3dz^2})\mu_{-}))V_{i,j} \\ &+(\frac{\rho_{i,j}U(i,j)}{dh}-\frac{2\mu}{(r(i+1,j)+r(i,j))dh}+\frac{1}{dh^2})V_{i+1,j}-\frac{\mu}{dh^2}V_{i-1,j} \\ &=+\frac{4}{3}\frac{\mu}{dz^2}(V_{i,j+1}+V_{i,j-1})+(\frac{1}{3})\frac{\mu}{dzdh}(U_{i+1,j-1}-U_{i+1,j}) \\ &+(\frac{2}{r(i+1,j)+r(i,j))dz}-\frac{1}{3dzdh})\mu_{-}(U_{i,j}-U(i,j-1)) \\ &-(\frac{2\mu_{-}(-2U(i,j)(2(r(i,j+1)-r(i,j))/(r(i,j+1)+r(i,j))+1)/(r(i,j+1)+r(i,j))dz}{3}) \\ &+(\frac{2}{(r(i,j+1)+r(i,j))dz})U_{i,j+1} \end{split}$$

• L'équation différentielle pour la densité volumique  $\rho_{sera}$ :

On considère que la variation de  $\rho$  par rapport à l'axe r est nulle, donc L'équation de  $\rho$  s'écrit sous la forme suivante :

$$\left(\frac{V_{i,j-1}}{dz}\right)\rho_{i,j-1}\right)/\left(2(U_{2,j}R_{2,j}-U_{1,j}R_{1,j})/(R_{1,j}+R_{2,j})dh\right)+(V_{1,j}/dz))=\rho_{1,j}$$
(II-25)  

$$\rho_{i,j}=\rho_{1,j}$$

• L'équation différentielle pour la composante de vitesse *U* sera :

$$U_{i,j} = -((R_{i,j} + R_{i+1,j})dh/2\rho_{i+1,j}R_{i+1,j}dz)(-\rho_{i,j-1}V_{i,j-1} + \rho_{i,j}V_{i,j}) + \rho_{i,j}R_{i,j}V_{i,j}/\rho_{i+1,j}R_{i,j})$$
(II-26)

Les conditions aux limites pour la vitesse et la densité volumique seront :

$$z \le H1 \qquad \rho_{i, j} = \rho$$

$$z \ge H1 \qquad \rho_{i, j} = \text{Calculer par l'équation de continuité}$$

$$U_{i,1} = 0.0 \text{ et } U_{i, n+1} = 0.0$$

$$V_{i,1} = V_{ini} \text{ et } V_{i, n+1} = 0.0$$

Pour le calcul des vitesses dans le fluide compressible et le cas fluide incompressible, le système d'équations matricielles A.X=B est couplé. Les matrices A et les vecteurs B, sont fonctions des vitesses. Dans ce cas, la méthode adéquate pour la résolution du problème, est celle de Gauss Seidel itérative [11].

Dans la méthode de Gauss-Seidel,  $X^0$  est une solution initiale, la solution à l'itération (k+1) serait.

$$X_{i}^{k+1} = (b_{i} - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} X_{j}^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^{n} a_{ij} X_{j}^{(k)}) / a_{ii}$$
(II-27)  

$$i=1, n$$
  

$$K=1,..., Kmax$$

Ces relations permettent de calculer par approximations successives les valeurs des variables. On arrête le calcul lorsqu' on atteint de faibles écarts entre les valeurs successives

des variables  $X_{i}^{\underline{k}}$ . Cette méthode itérative est particulièrement bien adaptée à la résolution des systèmes, comportant un grand nombre d'inconnues.

# II-7-Organigramme de calcul de vitesse:

L'organigramme A est une assimilation de l'organigramme de fluide incompressible et l'organigramme B est une assimilation de l'organigramme du cas fluide compressible. Le résultat du cas fluide incompressible représente la solution initiale du cas du fluide compressible.





# <u>Références bibliographiques</u>

- [1] P. Bradu ; 'L'univers des plasmas '; Edition : Paris, 1999.
- [2] M. Hamimid ; Mémoire de la Magister ; Université de Batna; Juillet 2001.
- [3] S. M. Aithal et V. V. Subramaniam; J. Appl. Phys; Vol. 84, No. 7; 1998.
- [4] P. Nicolas ; Thèse de doctorat; Université de Nantes , juin 2000.
- [5] J. M. Bauchire, J. J. Gonzales et A. Gleizes ; Modélisation d'une torche à courant continu; J. Phys. III France n°7(1997).
- [6] B. Baralemy; Ecole Doctorale la science- technologie- santé; Juin 2003.
- [7] P. Freton, J. J. Gonzalez et A. Gleize; Comparaison between a two and a three dimensional arc plasma configuration; J. Phys. D: Appl. Phys. 33; pp2442-2452, 2000.
- [8] P. Freton, J. J. Gonzalezm, A. Gleizes, F camy peyret, G. caillibotte et M. Delzenne ; Numerical and experimental study of a plasma cutting torche ; J. Phys. D : appl. Phys. 35, pp 115-131, 2000.
- [9] M. Bertin, J. P. Froux et J. Renault ; 'Cours de physique- Electromagnétisme' ; 3<sup>eme</sup>
   Edition Bordas ; Paris ; 1986.
- [10] N. DUODI ; Mémoire de Magistère ; université de Ouargla, 2006.
- [11] A. Gourdin et M. Boumahrat ; 'Méthodes Numériques Appliquées'; Edition : OPU; Algérie; Octobre 1991.

# **Chapitre III**

# **Résultats et discussions**

#### **I-1- Introduction :**

Dans ce chapitre, nous présenterons les principaux résultats du modèle numérique pour l'étude de la vitesse, le champ magnétique , le champ électrique, la densité du courant, et la densité d'énergie électromagnétique de la torche à plasma.

Pour l'étude de la vitesse, le champ magnétique, le champ électrique, la densité du courant, et la densité d'énergie électromagnétique dans le cas d'un milieu incompressible, il s'agit d'utiliser les donnes suivantes :

- ✓ Le diamètre de la cathode est égale 2 mm.
- ✓ La distance entre cathode et anode est égale 10mm.
- ✓ Le Diamètre de la surface de fusion est égale 4 mm.
- ✓ Le gaz utilisé est l'argon et la température du milieu est10000K et  $\rho$ : 3.exp (-4).
- ✓ La vitesse initial est égale 270m/s
- ✓ La début massique est égale 451/min

Toutes ses données sont utilisées dans le cas d'un milieu compressible sauf  $\rho$  variable.

Dans le chapitre II, nous avons présenté la modélisation numérique pour la résolution des équations de Navier –Stokes, les équations de continuité, les équations d'électromagnétisme ; qui sont des équations différentielles ; nous avons utilisé la méthode des différences

Nous avons terminé ce chapitre par des calculs sur la vitesse, le champ magnétique, le champ électrique, la densité du courant, et la densité d'énergie électromagnétique de la torche à plasma.

Puis nous avons comparé les résultats obtenus dans le cas d'un milieu incompressible et l'autre d'un milieu compressible.

## III-2- Profils de vitesses de la torche à plasma:

#### III-2-1- Profils de vitesses pour fluide incompressible:

### III-2-1-1 Profils de la composante V de vitesse suivant l'axe z:

La figure (III-1) représente la variation des profils de la composante V (vitesse suivant l'axe z) en fonction de la position r, pour différentes valeurs de z. On remarque que la forme de la variation de la vitesse V pour les valeurs de r entre 0mm et 1mm est un profil parabolique où la valeur maximale est 270m/s pour z = 0.4mm. D'autre part pour les valeurs de r entre 1mm et 2mm la vitesse V tend vers 0m/s. Quant la valeur de z augmente, la vitesse diminue.



Figure (III-1) : profils de la composante de vitesse V en fonction de r.

La figure (III-2) montre la variation des profils de la composante V (la vitesse suivant l'axeZ) en fonction du position Z, pour différentes valeurs de r. On remarque que la vitesse V pour les valeurs de z entre 0mm et 2mm est constante où la valeur maximale est 270m/s pour  $r = 4.10^{-3}$ mm. D'autre part pour Z > 2mm la vitesse V décroît et tend vers 0m/s. la vitesse diminue si la valeur de r augmente.



Figure (III-2) : Profils de la composante de vitesse V en fonction de Z.



Figure (III-3) : profils de la composante de vitesse V en fonction de r et Z.

## III-2-1-2- Profils de la composante U de vitesse suivant l'axe r :

La figure (III-4) montre la variation des profils de la composante U (la vitesse suivant l'axe r) en fonction de la position z, pour différentes valeurs de r. On remarque que la vitesse U est proche de zéro pour les valeurs de z entre 0mm et1.8mm. D'autre part pour les valeurs de z entre1.8mm et1mm la variation de la vitesse U est un profil parabolique où la valeur maximale est 13m/s pour r =4.10<sup>-3</sup>mm. Quant la valeur de r augmente, la vitesse décroît.



Figure (III-4) : profils de la composante de vitesse U en fonction de Z.

La figure (III-5) présente la variation des profils de la composante U (la vitesse suivant l'axe r) en fonction de la position **r**, pour différentes valeurs de z. On observe que la valeur du vitesse commence par zéro puis elle augmente jusqu'a la valeur maximal  $(U=10.200 \text{ m/s} \text{ pour } \text{z} = 39.10^{-3} \text{ mm})$  ensuite elle décroît.



Figure (III-5) : profils de la composante de vitesse U en fonction de r.

## III-2-2- Profils de vitesses pour fluide compressible:

## III-2-2-1 Profils de la composante V de vitesse suivant l'axe z:

Les figures (III-6), (III-7), (III-8) présentent la variation des profils de la composante V (la vitesse suivant l'axe z) en fonction des positions de la torche à plasma. On observe dans ce cas les mêmes variations de la vitesse V dans le cas où le fluide est incompressible, avec faible un décalage.



Figure (III-6) : profils de la composante de vitesse V en fonction de r.



Figure (III-7) : profils de la composante de vitesse V en fonction de Z.



Figure (III-8) : profils de la composante de vitesse V en fonction de r et Z.

## III-2-2-2- Profils de la composante U de vitesse pour du fluide compressible :

Les figures (III-9), (III-10), (III-11) présentent la variation des profils de la composante U (la vitesse suivant l'axe r) en fonction des positions de la torche à plasma.

D'après ces figures, on remarque que les variations de U dans le cas d'un fluide compressible sont les mêmes que dans le cas où le fluide est incompressible, avec faible un décalage.



Figure (III-9) : profils de la composante de vitesse U en fonction de Z.



Figure (III-10) : profils de la composante U en fonction de r.





## III-3- Les propriétés de la torche à plasma :

Nous voulons calculer les propriétés de la torche à plasma (la densité du courant, le champ magnétique, le champ électrique, et la densité d'énergie électromagnétique), nous utiliserons les résultats obtenus dans la partie précédente:la composante V et U de vitesse de la torche à plasma.

## III-3-1- Profils de la densité du courant :

La figure (III-12) montre la variation de profil la densité du courant en fonction de la position Z pour différentes valeurs de r. Il apparaît que la densité du courant est constant pour

z<2 mm puis elle décroît. La forme générale de cette figure est en bon accord avec des travaux précédents [4]



Figure (III -12): densité du courant en fonction de Z.

La figure (III-13) présente la variation de la densité du courant Jz en fonction de la position **r**, pour différentes valeurs de z. On remarque que la forme de la variation de Jz pour les valeurs de **r** entre 0mm et 1mm est un profil parabolique où la valeur maximale est  $1.135.10^{6}$ A/m<sup>2</sup> pour z =  $4.10^{-3}$ mm. D'autre part, pour les valeurs de **r** entre 1mm et 2mm la densité tend vers 0m/s. Quant la valeur de z augmente, la densité du courant diminue.



Figure (III -13) : densité du courant en fonction de r.
#### III-3-2- Profils du champ magnétique B :

La figure (III-14) présente la variation des profils du champ magnétique B en fonction de la position r pour différentes valeurs de z. On observe que la valeur du champ magnétique B commence a zéro puis elle augmente pour atteindre une valeur maximale à z = 2.4mm (B=0.00125T), puis elle décroît. D'après cette figure, il apparaît que les valeurs du champ magnétique sont faibles, aussi on remarque que le champ magnétique décroît quand la valeur de z augmente. Cette diminution est due à la densité du courant, parce que la densité du courant diminue par rapport à l'augmentation de z. La forme générale de cette figure est en bon accord avec des travaux précédents [1,2]



Figure (III -14) : profils de champ magnétique B en fonction de r.

La figure (III-15) montre la variation des profils du champ magnétique B en fonction de la position Z pour différentes valeurs de r. Il apparaît que le champ magnétique B est constant pour Z <2 mm puis elle décroît.



Figure (III-15) : profils de champ magnétique B en fonction de Z.

#### III-3-3- Profils du champ électrique $E_{ez}$ :

La figure (III-16) présente la variation des profils du champ électrique  $E_{ez}$  en fonction de la position z pour différente valeur de r. Il apparaît que le champ électrique  $E_{ez}$  est constant pour Z <2 mm puis il décroît. D'après cette figure il apparaît que les valeurs du champ électrique  $E_{ez}$  sont élevées, aussi on remarque que le champ électrique  $E_{ez}$  décroît quand la valeur de r augmente.



Figure (III-16) : profils de champ électrique E<sub>ez</sub> en fonction de Z.

La figure (III-17) montre la variation des profils de champ électrique  $E_{ez}$  en fonction de la position r pour différente valeur de z. On observe que la valeur du champ électrique  $E_{ez}$  commence du valeur maximal égal  $3.8718.10^6$  (N/C) puis elle décroissante. D'après cette figure il apparaît que les valeurs du champ électrique  $E_{ez}$  sont élevées, aussi on remarque que champ électrique  $E_{ez}$  décroît si la valeur de z augmente.



Figure (III -17): profils de champ électrique E<sub>ez</sub> en fonction de r.

#### III-3-4- Profils de la densité d'énergie électromagnétique :

La figure (III-18) présente la variation des profils de la densité d'énergie électromagnétique en fonction de la position r pour différentes valeurs de z. On observe que la valeur de la densité d'énergie électromagnétique commence a la valeur maximale de égal 66.3127J/m<sup>3</sup> puis elle décroît. D'après cette figure il apparaît que les valeurs de la densité d'énergie électromagnétique sont faibles, aussi on remarque que de la densité d'énergie électromagnétique décroît si la valeur de z augmente.



Figure (III-18): la densité d'énergie électromagnétique en r

La figure (III-19) montre les variations des profils d'énergie électromagnétique en fonction de la position Z pour différentes valeurs de r. Il apparaît que l'énergie électromagnétique est constants pour z<2 mm puis elle décroît.



Figure (III-19): la densité d'énergie électromagnétique en fonction de Z.

#### III-3-5- Profils de la différence de potentielle:

La figure (III-28) présente la variation des profils de la différence de potentielle en fonction de la position r, pour différentes valeurs de z. On remarque que la forme de la variation de la différence de potentielle pour les valeurs de r<0.001m est un profil parabolique. D'autre part pour les valeurs de r > 0.001m la différence de potentielle tend vers 0.



Figure (III-28) : profils de la différence de potentielle en fonction de r.

La figure (III-29) présente la variation des profils de la différence de potentielle en fonction de la position z, pour différentes valeurs de **r**. On observe que la valeur de la différence de potentielle commence par zéro puis elle augmente jusqu'a la valeur maximale.



Figure (III-29) : profils de la différence de potentielle en fonction de Z.

### III-4- Comparaison entre le fluide incompressible et le fluide

#### compressible:

#### III-4-1- L'apport de vitesse ( $\Delta V/V$ ) % :

On suppose  $\Delta V$  est la déférence entre la composante V de vitesse pour du fluide incompressible et la composante V de vitesse pour du fluide compressible.

La figure (III-20) montre la variation du rapport ( $\Delta V/V$ ) % en fonction de variable z, en fixant, r = 4.10<sup>-3</sup>mm où r = 4.10<sup>-3</sup>mm, On remarque que le rapport est constant pour z<2mm, puis il augmente.



**Figure (III-20) :** La variation du rapport  $\Delta V/V\%$  en fonction de Z.

La figure (III-21) montre la variation de la vitesse V en fonction de variable de champ magnétique B, en fixant, Z=5mm. On remarque que la vitesse augmente avec le champ





#### III-4-2- L'apport de vitesse ( $\Delta U/U$ ) % :

On suppose  $\Delta U$  est la déférence enter la composante U de vitesse pour du fluide incompressible et la composante U de vitesse pour du fluide compressible.

La figure (III-22) (III-23) montre la variation du rapport ( $\Delta U/U$ ) % en fonction des variables r et z. On remarque que le rapport est constant pour toutes les valeurs de r et Z.



**Figure (III-22) :** La variation du rapport ( $\Delta U/U$ ) % en fonction de r.



**Figure (III-23) :** La variation du rapport ( $\Delta U/U$ ) % en fonction de Z.

## III-5- Comparaison des résultats obtenus avec d'autres travaux:

Les figures (III-24, III-25) représentent réspectivement les résultats du profil de la vitesse axiale des travaux de K. Ramachandran et al [5] et des résultats obtenu par P. Fretonet et al [3]. K. Ramachandran et al [5] ont utilisé l'argon, les dimensions de la torche sont r=1.6 mm et z=0.1 m et la vitesse initiale est 460 m/s ; P. Fretonet et al [3] ont utilisé l'argon, z=10 mm, la vitesse initiale 270 m/s, et ont calculé la vitesse et les températures pour différentes débits(45 L/min, 76 L/min, 116 L/min).

Les conditions utilisées dans notre travail sont très proches de celles de K. Ramachandran et al [5] et de P. Fretonet al [3] Nous avons obtenu un profil de la composante de vitesse en fonction de Z (r=0) représenté sur les figures (III-24, III-25).

Nous remarquons que la forme générale de la composante V de vitesse (figures III-26 et III-27) est en bon accord avec les figures (III-24, III-25) successivement.



**Figure (III-24) :** profil de la composante de vitesse en fonction de Z (r=0) [5].



**Figure (III-26) :** profil de la composante de vitesse en fonction de Z (r=0)



**Figure (III-25) :** profil de la composante de vitesse en fonction de Z (r=0) [3].

**Figure (III-27) :** pofil de la composante de vitesse en fonction de Z (r=0).

# <u>Références bibliographiques</u>

- [1] P. Ferton ; Doctorat de l'université Paul Sabatier ; Toulouse III ; novembre 2002.
- [2] L. Reynard ; Doctorat de l'école central de Lyon ; Février 2006.
- [3] P. Freton, J. J. Gonzalez et A. Gleize ; 'Comparison between a two and a three dimensional arc plasma configuration' ; J. Phys. D : Appl. Phys. **33**, pp2442-2452 ; 2000.
- [4] Frédéric. LAGO ; Doctorat de l'université Paul Sabatier ; Toulouse III ; Mars 2004.
- [5] K. Ramachandran;' 3D modelling of plasma-particle interactions in a plasma jet under dense loading conditions'; J. Phys. D : Appl. Phys. **435**, pp298-306 ; 2003.

# **Conclusions générales et perspectives**

Le but de ce travail est l'étude des vitesses, de la densité de courant, du champ magnétique, du champ électrique, et la densité d'énergie électromagnétique de la torche à plasma.

Les résultats obtenus par notre programme de calcul (réalisé en Fortran), dans le cas d'un fluide incompressible et dans le cas d'un fluide compressible, montrent que la différence entre les deux types apparaît dans le calcul des variations relatives de la vitesse axiale ( $\Delta V/V$ ) et de la vitesse radiale ( $\Delta U/U$ ). La variation ne dépasse pas 0.08% pour la vitesse axiale V. On trouve que la vitesse augmente avec le champ magnétique.

On a remarqué que les valeurs du champ magnétique et les valeurs de l'énergie électromagnétique sont faibles.

La comparaison qualitative de nos résultats sur les profils des vitesses radiales avec d'autres résultats publiés montre un bon accord. Cela montre qu'on peut considérer notre programme de calcul comme un outil indispensable dans les études sur le plasma à torche. Ce programme a l'aptitude de se développer pour le calcul d'autres paramètres, tels que le courant électrique, la différence de potentielle et l'énergie électromagnétique.

Les résultats de notre travail peuvent être utilisés dans d'autres études sur les torches à plasma. A titre d'exemple : une étude réalisée par S. Lemkddem, intitulé « Contribution à l'étude de rayonnement émis par le plasma lors de l'interaction des torches à plasma avec les métaux » nécessite la connaissance des vitesses axiales et radiales du plasmas (mémoire de Magistère, université de Ouargla, février 2008).