



République Algérienne Démocratique
et Populaire Université Abou
Bakr Belkaid– Tlemcen
Faculté des Sciences
Département de Physique



Laboratoire de physique théorique

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en Physique
Option : Physique des gaz et des Plasmas

Thème

**Etude des propriétés thermodynamique d'un arc électrique
de découpe**

Présenté par :

Mlle TAHIR Amina

Le Lundi 25 Juin 2018

Devant le jury composé de MM.

- **Pr BOUSSAID Abdelhak**..... (Président)
- **Pr LIANI Bachir**..... (Encadreur)
- **Pr HOUARI Rahma** (Examineur)

Remerciement

Je remercie mon dieu le tout puissant qui m'a guidé sur le bon chemin et m'a donné la force pour pouvoir dépasser toutes les difficultés.

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Physique théorique. L'Université Abou bekr Belkaïd de Tlemcen

Mes tous premiers remerciements sont adressés à Monsieur le professeur Bachir LIANI, professeur à la Faculté des Sciences de l'Université Abou bekr Belkaïd de Tlemcen, mon encadreur de mémoire qui a été présent pour moi au cours de la durée de ma thèse.

Je remercie également les membres du jury Monsieur BOUSSAID Abdelhak et Madame HOUARI Rahma qui ont accepté d'être les examinateurs de mon mémoire.

Je tiens à remercier l'ensemble des professeurs et les personnes qui mon soutenue tout au long de mes études et sans eux je n'aurais pu réaliser ce travail.

Je remercie mes parents, mes deux frères qui mon toujours soutenues, poussées vers la réussite.

Chapitre 1 : Généralité sur les plasmas thermiques	1
I-1. Introduction	2
I-2. Les plasmas thermiques	3
I-3. Technique de production des plasmas thermique	3
I-3-1. Les plasmas inductifs	3
I-3-2. Les plasmas d'arc	4
a) Historique de l'arc	4
b) Amorçage de l'arc électrique	4
• Transition continue	4
• Séparation de contact	4
• Surtension	5
c) Classification de l'arc	5
I-4. La torche plasma	5
I-4-1. Les plasmas à arc non transféré ou à arc soufflé	6
I-4-2. Plasma à arc transféré	6
I-5. L'équilibre thermodynamique complet (ETC)	7
I-5-1. Les lois d'équilibre	7
a. Loi de Maxwell Boltzmann	7
b. Loi de Boltzmann	8
c. Loi de Saha	8
d. Loi de Guldberg Waage	8
e. Loi de Planck	9
I-5-2. L'équilibre thermodynamique local (LTE)	9
I-5-3. Les lois annexe	9
- La loi de neutralité électrique	9
- La loi de Dalton	10
- La Loi de conservation de la quantité de matière	10
Chapitre 2: Les applications des plasmas thermiques	11
II-1. Introduction	12
II-2. Les applications des plasmas thermiques	12
II-2-1. La projection thermique	12
a) Définition de la projection thermique	13
b) Principe de la projection thermique	13
c) Les Différents type de procédé projection thermique	14
1. La projection par plasma d'arc	14

➤ Projection par arc à deux fils	14
➤ La projection par torche à plasma d'arc soufflé	15
2. Projection par plasma	15
II-2-2. Disjoncteur à arc électrique	16
II-2-3. Traitement des déchets	17
❖ Gazéification	17
❖ Vitrifaction	18
II-2-4. Les applications du plasma thermique en métallurgiques	18
a) Le soudage à l'arc	18
✓ Le principe de soudage à l'arc	19
✓ Les types de procédé de soudage à l'arc	20
❖ Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)	20
❖ Soudage à l'électrode de tungstène (TIG)	20
b) La découpe de métaux	21
Chapitre 3 : Les différentes méthodes de découpage	22
III.1. Introduction	23
III.2-La découpage thermique	23
III-3. Les techniques de découpe thermique	23
III.3.1. Oxycoupage	23
❖ Définition	23
❖ Le principe de fonctionnement	24
III.3.2. La découpe laser	25
❖ Le principe de fonctionnement	25
III.3.3.la découpe plasma	26
❖ le principe de fonctionnement	27
III.4. Comparaison de processus de découpe	28
❖ Le laser	28
❖ L'oxycoupage	28
❖ Le plasma	28
Chapitre 4 : Calcul de profil de température de plasma thermique	30
IV.1. Introduction	31
IV.2. Calcul de profil de température	31
IV.2. 1. Mécanisme de transfère d'énergie aux particules	31
IV.2.2. Hypothèse de base	32
IV.2. 3. Equations de conservation	32

❖	Equations de conservation de masse	33
❖	Equation de conservation de l'énergie	33
	IV.3. Méthode de calcul	34
	IV.3.1. Principe de la méthode de Runge-Kutta	34
	IV.3.2. L'algorithme de Runge-Kutta d'ordre 4	35
	IV.4. Résultat et discussion	36
	IV.4.1. Profil de température de CH ₄ pur	36
	IV.4.2. Effet des pertes radiatives sur le profil de température	38
	IV.4.3. Evolution de la température axiale d'un plasma d'arc en fonction du temps	39

Introduction

Les procédés industriels utilisant la technologie des plasmas thermiques produit dans les torches à plasma et les arcs électriques se sont considérablement diversifiées et cette diversité est due à la variété des configurations géométrique, des paramètres physiques (densité, température, fréquence et intensité des potentiels électriques appliqués) et de la nature de gaz ambiante (inerte ou réactif) ou des parois solides constituant les électrodes ou se trouvant en contact avec le plasma. Multiples applications de cette technologie sont présentes ou utilisé dans les appareils de coupure électrique (interrupteur à plasma en électronique de puissance), dans le traitement métallurgique, (soudage, découpage de matériaux), la projection thermique, le traitement des déchets ou des polluants.

Ce développement industriel est dû aux avantages propres aux plasmas :

- Température élevée.
- Utilisation rationnelle de l'énergie.
- Fiabilité et simplicité.
- Compatibilité avec les processus existant.
- Traitement direct avec des matériaux bruts même sous des formes inutilisables.

La découpe à plasma d'arc est très utilisée à cause de leur efficacité et représente un compromis entre la qualité, la productivité et le cout d'opération ce qui le rend très compétitif par rapport aux autres techniques de coupage thermique (oxycoupage, découpe laser). Ce procédé consiste à produire une fusion localisée sur la zone à découper au moyen d'un plasma d'arc électrique. La partie fondue est ensuite chassée de la pièce par le soufflage du jet de plasma confiné.

Ce mémoire est composé de quatre chapitre ; Le premier chapitre c'est une description détaillée sur les plasmas thermiques produit dans les arcs électriques et les torches à plasma, dans cette même partie on a aussi introduit les notions de l'équilibre thermodynamique complet et l'équilibre thermodynamique local.

Dans le deuxième chapitre sont présentés les différentes applications des plasmas thermique qui sont la projection thermique, le disjoncteur, le traitement des déchets, et dans le cas des métallurgique (soudage, découpage). Le troisième chapitre est une description détaillée sur les trois techniques principaux de coupage des métaux existe à l'heure actuelle : il s'agit de l'oxycoupage, la découpe laser et de découpe plasma.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de profil de température de plasma thermique en utilisant les équations de base les équations de conservation de masse et de l'énergie. La résolution numérique du système d'équations obtenues est réalisée à l'aide d'une procédure de Runge-Kutta du mélange de CH₄-H₂.

Chapitre I

Généralité sur les plasmas thermiques

I-1. Introduction

Les plasmas se confondent donc avec le quatrième état de la matière, faisant suite dans l'échelle des températures, aux trois états classiques solide, liquide et gaz. Ce milieu plasma se compose plus de 99% de l'univers, Ils se trouve dans la nature (soleil, foudre, ...), et peuvent aussi produits dans les laboratoires (décharge électrique). Le plasma est constitué d'électrons, d'ions positifs, et des particules neutres en proportions tel que le milieu reste globalement neutre. Dans ces dernier année les applications de plasmas a augmenté rapidement dans différents domaines on peut citer : la sidérurgie, l'éclairage, la chimie, l'environnement

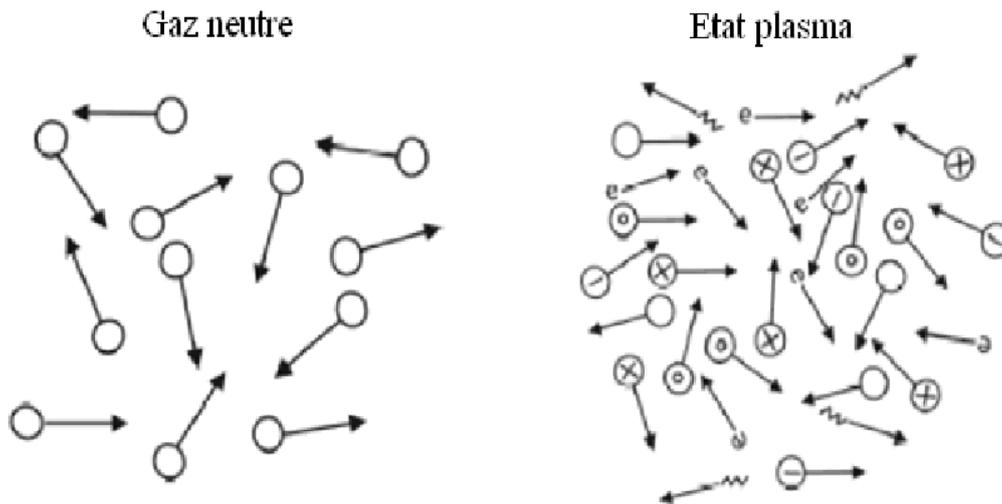


Figure 1.1 : schéma de la différence entre gaz neutre et plasma

Les plasmas peut classé selon différent catégories grâce à les valeurs densités et de leurs température électroniques:

-Les plasmas chauds ou plasmas de fusion, ils sont totalement ionisé. En rencontre ce type de plasma dans les étoiles ou le soleil, ils sont aussi produits dans les tokamaks ou par interaction laser.

- Les plasmas thermiques qui sont en général en équilibre thermodynamique.

Dans les plasmas à l'équilibre thermodynamique, qu'on qualifie de « plasmas thermiques » tous les élément présents (électrons, ions, molécules) ont sensiblement la même énergie cinétique et par conséquent la même température. Cette dernière est très élevée. Elle peut en effet atteindre une valeur de plus de 10^4 K [1].

- Les plasmas froids hors équilibre thermodynamique qui sont caractérisé par leur forte réactivité chimique. Dans les plasmas hors équilibre thermodynamique, les différentes particules (électrons, ions, atomes, molécules) ont des énergies moyennes très différentes. L'énergie moyenne des électrons est typiquement de plusieurs ev (1 ev correspond à 11600 K),

tandis que la température du gaz reste proche de la température ambiante, d'où l'appellation de « plasmas froids » qui leur est donnée. Dans ce type de plasma, la majeure partie de l'énergie ne sert pas à chauffer le gaz mais à produire des espèces chimiquement actives : espèce métastables, dissociées et ionisées [1].

Dans cette étude, nous nous intéresserons exclusivement aux plasmas thermique.

I-2. Les plasmas thermiques

Les plasmas thermiques sont des milieux gazeux constitués de molécules d'atomes, d'ions et d'électrons, l'ensemble est généralement supposé électriquement neutre. C'est ce type de plasma que l'on retrouve dans les appareils de coupure et les arcs libres. Dans les plasmas thermiques, il existe plusieurs types d'équilibre thermodynamique comme par exemple les plasmas à l'équilibre thermodynamique complet (ETC), les plasmas à l'équilibre thermodynamique local (ETL), les plasmas hors équilibre chimique et/ou thermique. Le plasma est dit à l'ETC lorsqu'il est entièrement caractérisé par quatre lois avec une seule température : la loi de distribution de Maxwell-Boltzmann, la loi de distribution de Boltzmann, la loi d'action de masse et la loi de Planck. On parle d'ETL lorsque l'ETC est vérifié localement. Dans un plasma thermique, lorsque toutes les réactions chimiques sont équilibrées, il est considéré à l'équilibre chimique. Enfin, les plasma hors équilibre thermique sont caractérisés par plusieurs températures. La notion de température est délicate [2].

En général, le plasma thermique ne peut pas être considéré comme un plasma en équilibre thermodynamique complet puisque d'une part son rayonnement est plus petit que celui du corps noir et que d'autre part, il subit des pertes par conduction, par convection et par diffusion qui perturbent cette équilibre. Il est souvent considéré en équilibre thermodynamique local est comme optiquement mince (la puissance induite n'est pas réabsorbé par le gaz, elle est totalement rayonnée vers l'extérieur)[3].

I-3. Technique de production des plasmas thermique

Les techniques de production de plasma thermique sont: les plasmas inductifs (sans électrode) et les plasmas d'arc (avec électrodes)

I-3-1. Les plasmas inductifs

Les plasmas thermiques RF sont caractérisé par une absence totale d'électrode, le transfert d'énergie de la source au plasma étant effectué par couplage inductif. Le principe de fonctionnement d'induction est tout à fait similaire à celui du chauffage des métaux par induction [4]. Dans notre cas, nous allons nous intéresser plus en détail aux torche à courant continu et plus particulièrement aux arcs soufflés et aux arcs libres, qui seront étudiés par la suite.

I-3-2. Les plasmas d'arc

L'arc électrique correspond à une décharge lumineuse qui accompagne le passage de l'électricité entre deux conducteurs présentant une différence de potentiel convenable. Ce phénomène a été découvert par le physicien et chimiste anglais DAVY (1813) qui en étudia les effets à travers différents gaz. Cet arc était créé entre deux charbons dans une cage de verre sous vide. Tandis que la température d'un arc électrique peut être de plusieurs milliers de degrés très localement. Lorsque l'émission de courant devient très intense s'accompagne d'une augmentation d'une part de la densité du courant et d'autre part de la gaine cathodique, les ions perdent leurs énergies par collision, ils en fournissent davantage à la cathode dont la température s'élève localement. L'émission thermoïonique de la cathode s'effectue à partir d'une région très localisée appelée spot cathodique. Lorsque cette émission devient stable un courant de forte intensité pour un faible gradient de potentiel. On est donc en régime d'arc.

a) Historique de l'arc

En 1774 un physicien britannique constate l'action chimique d'une décharge électrique dans l'air entre un fil de fer et la liqueur (solution de suc de tournesol dans l'eau) la partie supérieure commença à apparaître rouge et au bout de deux mn elle le fut parfaitement, mais l'état de connaissances de l'époque ne permettait pas encore d'établir les relations entre l'arc dans l'air et la production d'acide d'azote puis d'acide nitrique. Néanmoins l'expérimentation fondamentale sur l'arc électrique fut réalisée par DAVY en 1813, il chercha à obtenir une étincelle entre deux petits cônes de charbon placés aux extrémités de deux conducteurs métalliques, en approchant les charbons très près l'un de l'autre, il parvint à créer cette étincelle extraordinairement brillante et à la faire grandir en éloignant les charbons l'un de l'autre. Il constata que leurs pointes étaient portées à l'incandescence et que le courant continuait à passer dans l'air. Les charbons étant disposés horizontalement la forme que prenait systématiquement cette étincelle stable et resplendissante lumière amena DAVY à lui donner le nom d'arc électrique [5].

b) Amorçage de l'arc électrique

Il y a trois méthodes pour amorcer un arc électrique : transition continue, contact, surtension

- Transition continue

Dans le départ le système est dans un état de décharge luminescente et la cathode est recouverte par le plasma de décharge, lorsqu'on augmente l'intensité du courant la tension d'extraction des électrons augmente et la température s'élève, l'émission thermoïonique devient majoritaire. Il est possible de créer un arc électrique en amorçant une décharge à courant faible de 10^{-15} (décharge non autonome) aux décharges d'arc dont le courant peut dépasser 10^5 . D'une manière continue on passe d'une décharge luminescente à un arc.

- Séparation de contact

On considère deux pastilles de métal traversées par un courant suffisant, lorsqu'on sépare deux contacts initialement parcourus par un courant, la conduction est maintenue par une

décharge électrique qui s'amorce dans l'espace inter électrode, grâce aux irrégularités de la surface, le courant passe par un contact très fin et la température s'élève par effet joule jusqu'à la fusion du métal. On a donc un filet de métal fondu très fin par lequel passe tout le courant. Lors de la rupture du pont fondu, ce qui conduit la formation d'un arc électrique. Ce cas se trouve dans le disjoncteur.

- Surtension

Les gaz sont généralement de bon conducteur, si la tension appliqué entre les électrodes dépasse une valeur critique V_d Appelé tension de claquage une décharge se forme très rapidement qui donne un arc de façon irréversible. Au forte surtension, lors de l'influence de charge d'espace, une seule impulsion produit suivi d'un croisement rapide du courant.

c) Classification de l'arc

On distingue deux types de l'arc : Les arcs thermoïoniques, Les arcs à émission du champ

- Les arcs thermoïoniques, où l'émission cathodique est d'origine thermique ; les électrodes doivent être en matériaux réfractaires. Lorsque les ions accélérés par chauffage extérieur, la cathode à une température très élevé donc on distingue les arcs autonomes et les arcs non autonomes.
- Les arcs à émission du champ, où sous l'effet d'un champ très élevé les électrons sont extraits de la cathode, qui peut former, soit à une charge d'espace positive au voisinage immédiat de la cathode, soit à l'existence à la surface de celle-ci, d'une couche électriquement isolante, qui se chargera d'ions et serai ainsi portée à un potentiel positif très élevé.

I-4. La torche plasma

La torche est équipée d'une tuyère anode en cuivre et d'un cathode thorié en tungstène alimenté par un courant continu ou à courant alternatif, refroidi par l'eau ou l'arc est généré. Il existe deux types de torche à plasma :

- Les plasmas non transférés ou à arc soufflé
- Les plasmas à arc transféré



I-4-1. Les plasmas à arc non transféré ou à arc soufflé

Les torches à arc soufflé présentent une gamme de puissance allant de 0.5 kW à 8 MW, elles comportent deux électrodes (l'anode et la cathode). Le plasma est moins énergétique, l'énergie de l'arc est dissipée vers la tuyère, utilisé pour le découpage des fines épaisseurs.

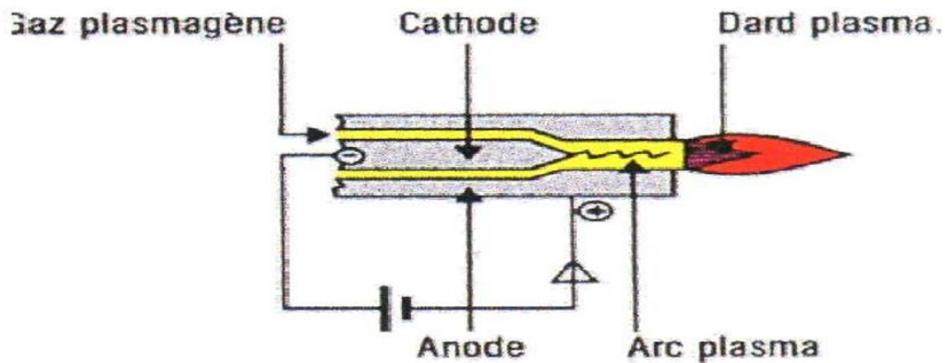


Figure 1.2: Torche plasma à arc non transféré

I-4-2. Plasma à arc transféré

La torche à arc transféré comporte qu'une seule électrode, ou l'alimentation est connectée entre l'électrode et la pièce, la circulation de l'arc électrique est se trouve entre l'électrode interne et un corps conducteur.

L'arc électrique s'ajoute à l'énergie de plasma, l'énergie et la température est plus élevé leur utilisation pour le découpage des métaux de forte épaisseurs.

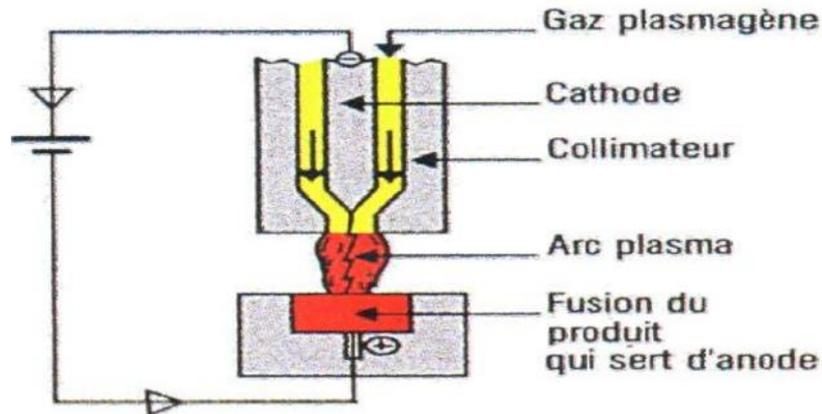


Figure 1.3 : Torche plasma à arc transféré

I-5. L'équilibre thermodynamique complet (ETC)

L'équilibre Thermodynamique Complet (ETC) est présenté également à une seule température relative aux particules : mouvements de translation (collisions élastiques), excitation et ionisation par collisions inélastiques, émission, absorption des photons, il faut que le principe de micro réversibilité soit satisfait chaque processus d'interaction est contrebalancé par le même processus inverse. Par exemple, l'émission d'un photon doit être équilibrée dynamiquement par la réabsorption d'un photon. Dans ces conditions, les équations de Maxwell, de Boltzmann, les lois d'action de masse (équilibre chimique) et la loi de Planck (rayonnement du corps noir) sont satisfaites pour une température unique.

I-5-1. Les lois d'équilibre

Les lois d'équilibres les plus important sont cinq dont quatre sont relatif au processus collisionne et le cinquième pour le rayonnement.

a. Loi de Maxwell Boltzmann

Les plasmas en ETC affecter à un grand nombre de particules, une température implique que les vitesses de particules correspondant à une énergie de translation suivent une distribution particulière, on suppose que seule l'énergie thermique des particules est responsable à l'excitation, l'ionisation, des échanges d'énergie entre particules.

le nombre total de particule N présente dans un plasma ayant une vitesse total dans la gamme v et dv à une température T .

$$\frac{dN_i}{N} = \left(\frac{m_i}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\left(\frac{m_i v^2}{2\pi k_B T} \right)} 4\pi v^2 dv \quad (\text{I.1})$$

dN_i : nombre de particules d'espèce i dont la vitesse est comprise entre v et $v + dv$

m_i : masse des particules

T : température des particules

k : constante de Boltzmann

b. Loi de Boltzmann

La distribution de Boltzmann permet de décrire les populations selon les différents niveaux d'énergie des particules présent au sein de plasma à une température T.

$$\frac{N_i}{N} = \frac{g_i}{Q_i^{int}} e^{-\left(\frac{E_i}{K_B T}\right)} \quad (1.2)$$

N_i : densités des niveaux i , N : la densité totale

E_i : énergie de niveau i

g_i : poids statistique de niveau i

Q_i^{int} : fonction de partition interne de l'élément considéré

Avec

$$Q^{int} = \sum_i g_i e^{-\left(\frac{E_i}{K_B T}\right)} \quad (1.3)$$

c. Loi de Saha

La loi de Saha permet de déterminer le degré d'ionisation d'un milieu en équilibre thermodynamique. Elle permet de connaître le rapport des populations en fonction de la température du milieu.

$$\frac{N_e N_A^+}{N_A} = \frac{2 Q_{A^+}^{int}}{Q_A^{int}} \left(\frac{2\pi m_e K_B T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\left(\frac{E_i - \Delta E}{K_B T}\right)} \quad (1.4)$$

N_e , N_A^+ , N_A : sont respectivement les densité de l'électron, de l'ion positif et de l'atome

$Q_{A^+}^{int}$, Q_A^{int} : fonction de distribution interne d'ion positif et d'atome

2 : fonction interne de l'électron

h : la constante de Planck

E_i : le potentiel d'ionisation de l'espèce considérée.

ΔE : l'abaissement du potentiel d'ionisation dû à la présence des particules chargées sous effets des champs électriques, son expression est donnée par :

$$\Delta E = \frac{(Z+1)e^2}{4\pi\epsilon_0\lambda_D} \quad (1.5)$$

d. Loi de Guldberg Waage

Pour les réactions de dissociation-recombinaison $AB \rightleftharpoons A+B$ la loi de l'action de masse prend la forme de l'équation de Guldberg-Waage, c'est une forme plus général de la loi de Saha.

$$\frac{N_A N_B}{N_{AB}} = \frac{Q_A^{int} Q_B^{int}}{Q_{AB}^{int}} \left(\frac{m_A m_B}{m_{AB}}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{2\pi K_B T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\left(\frac{E_{AB} - \Delta E_{AB}}{K_B T}\right)} \quad (1.6)$$

$Q_A^{int}, Q_B^{int}, Q_{AB}^{int}$: sont les fonctions de partitions de A , B , et AB .

m_A, m_B, m_{AB} : leur masse respectivement.

E_{AB} est l'énergie de dissociation et ΔE_{AB} l'abaissement de potentiel de cette énergie de dissociation.

e. La loi de Planck

Cette loi désigne l'équilibre entre les processus radiatifs et la matière en fonction de la température, la principale caractéristique est l'absorption total de rayonnement émis, le plasma se comporte comme un corps noir la loi de Planck est donné :

$$B_\lambda^0 = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right)^{-1} \quad (1.7)$$

B_λ^0 : décrit la luminance spectrale d'un corps noir à la température T .

c : vitesse de la lumière dans le vide.

h : constante de Planck.

I-5-2. L'équilibre thermodynamique local (LTE)

Contrairement à l'équilibre complet, LTE correspondant à l'intensité du rayonnement du corps noir de la température respective. Cependant, il nécessite que les processus de collision et non les processus radiatifs gouvernent les transitions et les réactions dans le plasma et qu'il y ait une micro réversibilité parmi les processus de collision, c'est-à-dire qu'un équilibre détaillé de chaque processus de collision avec son processus inverse est nécessaire. Les solutions à l'état stationnaire des équations de taux de collision respectives donneront alors la même distribution d'énergie que pour un système en équilibre thermique complet, sauf pour le champ de rayonnement [6].

I-5-3. Les lois annexe

- La loi de neutralité électrique

Au dehors des zones de gaine le plasma est globalement neutre car il y'a autant de charge négative que charge positive on peut écrire :

$$n_e = \sum_i Z_i n_i \quad (I.8)$$

Avec n_e : la densité électrique, n_i : la densité des ions de charge Z_i

- La loi de Dalton

On suppose que le plasma thermique se comporte comme un mélange de gaz parfait, la densité des espèces est reliée à la pression et à la température par cette loi :

$$P = \sum_i n_i K T \quad (I.9)$$

- Loi de conservation de la quantité de matière

Cette loi exprime la conservation d'un nombre d'atome, elle est imposée par les fractions molaires d'un constituant de mélange.

Chapitre II

Les applications des plasmas thermiques

II-1. Introduction

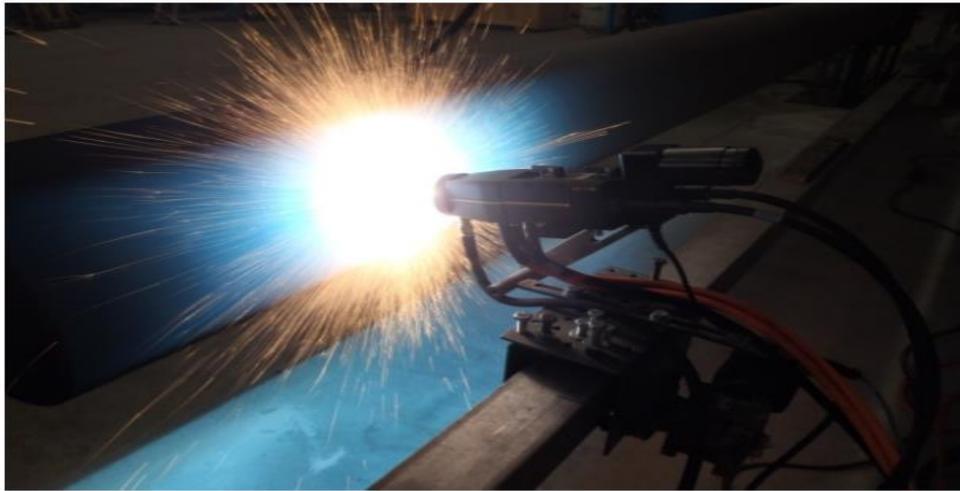
Les applications des plasmas sont plus utilisées dans différent domaine (santé, industrie, matériaux,) et chaque type à une application spécifique. Ce qui conduit la croissance des couts énergétiques et l'augmentation des rendements de conversion. Puisque on a deux types de production de plasma thermique alors que chaque type à des applications spécifiques, dans le cas des torches à arc soufflé de puissance de 0.5 KW à 8 MW, leurs applications concernent les opérations de traitement de surface, en particulier la projection, par torche à plasma ou arc fil. Les torches à arcs transférés couvrent la gamme de puissance la plus large : de quelques kW à une centaine de MW. En suite les torches RF de puissance inférieure ou égale à 100 kW fonctionnent à des fréquences de quelques MHz. Par contre, pour les torches de puissance supérieur à 100 kW on peut utiliser des alimentations transistorisées fonctionnant jusqu'à 500 kHz. Mais dans le cas des puissances inférieures à 180 kW, on trouve comme applications, le soudage et le découpage, le rechargement par plasma à moins de quelques dizaines de kW.

D'autre part, les plasmas thermiques sont souvent utilisés dans le traitement des matériaux pour leurs densités élevées d'énergie et leur capacité à chauffer, fondre et, dans certains cas, à vaporiser le matériau à traiter. Les plasmas thermiques sont également de plus en plus utilisés comme source d'espèces réactives à haute température dans la synthèse chimique par plasma de matériaux de haute pureté [7].

II-2. Les applications des plasmas thermiques

II-2-1. La projection thermique

La projection thermique a été inventé par le docteur Max Ulrich SCHOOP en 1900, il utilise un creuset remplis de métal fondu et de l'air préalablement chauffé pour pulvérisation et la projection de métal, après il utilise le chalumeau comme source d'énergie et le métal en poudre puisque la métallisation n'était pas parfaite, SCHOOP remplace la poudre par un fil métallique. En 1915, il dépose un arc électrique entre 2 fils cette procédé devient utilisable dans nombreux application dans le domaine de la protection de surface.



a) Définition de la projection thermique

La projection thermique consiste à projeter en fines particules sur une surface préalablement préparée. Les fines particules sont obtenues sous l'effet de la vitesse de la température et viennent se fixer sur un substrat placé devant le jet

La projection thermique fait partie de la famille de traitement de surface, qui varie avec la forme de matériau à projeter et de la source de chaleur. Les matériaux utilisés sont les métaux, des céramiques, ...

Leur but est pour protégé les matériaux contre les corrosions, l'attaque chimique, l'abrasion, l'usure et le transfert de chaleur qui permet d'allongé la durée de vie et qui donne la seconde vie au pièce à traité(utilisé).

b) Principe de la projection thermique

Le procédé de projection thermique consiste à envoyer le matériau sous forme de poudre ou de fil sur une surface métallique, le matériau à déposer est fondu sur une haut température et accéléré par le gaz porteur tel que l'azote ou l'argon vers le substrat le revêtement est produit lorsque des millions de particule frape le substrat et déposé les unes au-dessus de l'autre. Pour améliorer la durée de vie des surfaces métalliques les ingénieurs utilisent en industrie la technique de projection thermique.

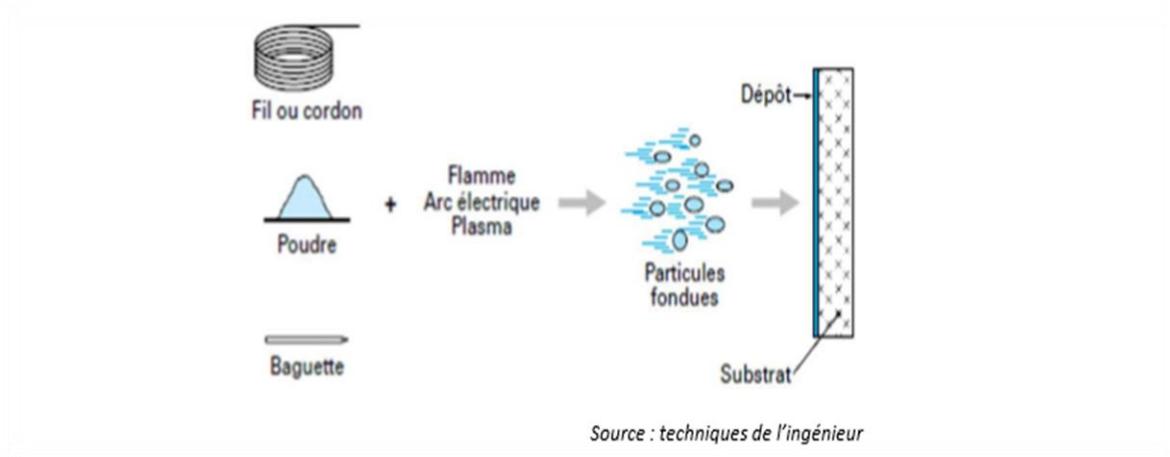


Figure 2.1 : principe de projection thermique

Les procédés de projection thermique peuvent être classés en 2 catégories :

- ✓ Les procédés dont la source de chaleur est un chalumeau oxyacétylénique : procédé flamme-poudre (FP), procédé flamme-fil ou cordon (FF), procédé HVOF (HV) et procédé par canon à détonation (CD).
- ✓ Les procédés dont la source de chaleur est un arc électrique : procédé à l'arc électrique (AE) et procédé plasma (PS).

Chaque type de ce procédé utilise le même principe avec des variantes et la structure finale des dépôts dépend fortement des multiples facteurs particuliers associés à chacun des procédés.

c) Les Différents type de procédé de projection thermique

1. La projection par plasma d'arc

Deux procédés de projection thermique utilisent un arc électrique comme source d'énergie [8] :

➤ Projection par arc à deux fils

La projection par arc électrique est le plus récent parce qu'il était utilisé par SHOOP en 1911. La projection par arc électrique est consistée à créer un arc électrique entre deux fils chargés électriquement avec une polarité opposée. L'équipement consiste un pistolet de projection, un système d'avancement des fils, un générateur de courant asservi par une régulation automatique et une source de gaz comprimé (généralement de l'air mais l'utilisation d'un gaz neutre est possible) [8]. La température dans la zone de fusion peut être de l'ordre de 6000 K. Le métal fondu est pulvérisé grâce au jet de gaz comprimé et projeté sur le substrat. Les matériaux d'apport doivent être conducteurs (zinc, aluminium.....)

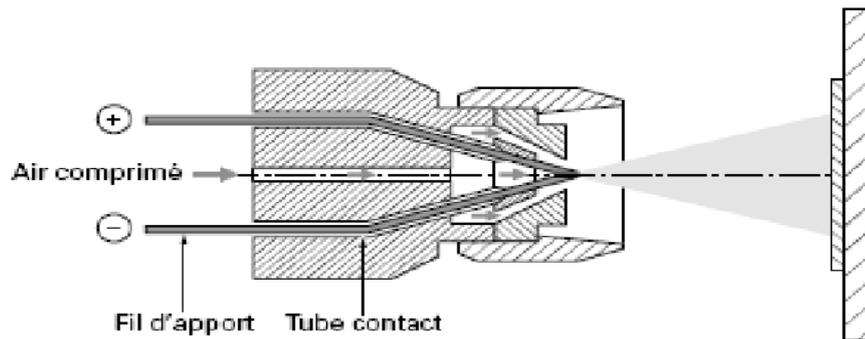


Figure 2.2 : Schéma de principe de la projection à l'arc

➤ La projection par torche à plasma d'arc soufflé

La décharge électrique se produit entre l'anode et la cathode dans la torche de projection grâce à un générateur du courant continu. Le gaz plasmagène, généralement constitué d'un mélange d'argon et d'hydrogène ou d'hélium, est injecté entre les électrodes où l'arc électrique est produit. Le gaz subit une dissociation moléculaire (pour l'hydrogène) et/ou une ionisation partielle qui produit d'une forte expansion et une détente du jet de plasma en sortie de tuyère [9]. Au sein de ce jet de plasma est injecté le matériau d'apport sous forme de poudre véhiculé par un gaz porteur ou il est fondu globalement ou partiellement puis va projeter sur le substrat avec une très grande vitesse de l'ordre de 100 à 300m/s ou sont écrasés pour produire le dépôt.

2. Projection par plasma

La projection plasma consiste à introduire des particules sous forme de poudre à l'intérieur de la source de chaleur à l'aide d'un gaz porteur, de température comprise entre 15000° et 20000°C ; elles sont accélérées et fondu avant d'être déposées sur un substrat préalablement préparé. Le dépôt est ainsi formé par l'empilement des lamelles solidifiées.

Dans le procédé de projection plasma, il est possible de distinguer quatre systèmes fonctionnels [8] :

- la génération du jet plasma par la conversion de l'énergie électrique en énergie thermique ;
- l'injection de la poudre dans le jet ;
- l'écoulement du jet plasma et l'interaction avec le gaz environnant et avec la poudre ;
- l'élaboration du dépôt par empilement des lamelles sur le substrat.

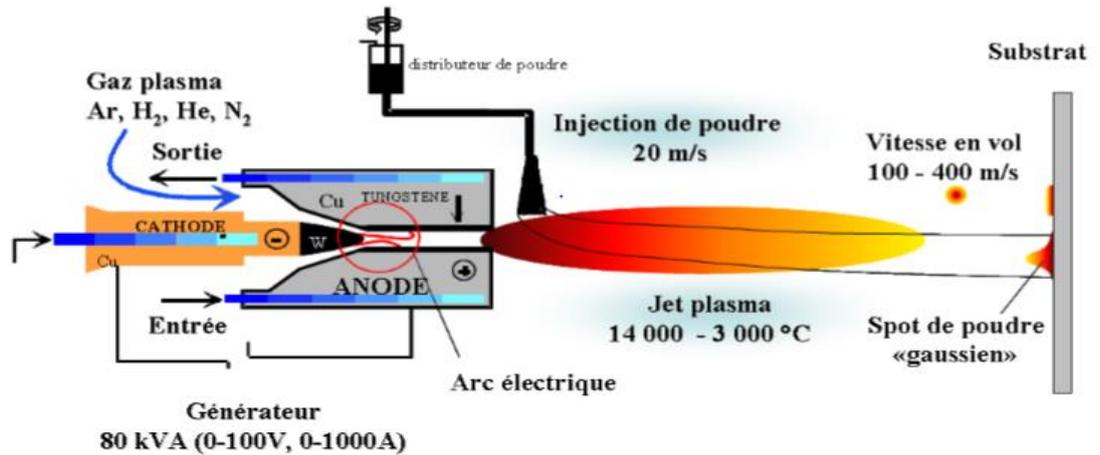


Figure 2.3 : schéma de principe de la projection plasma

Les principales applications des dépôts réalisés par projection plasma sont : la résistance à l'usure et à la corrosion, l'isolation thermique et électrique, ...

II-2-2. Disjoncteur à arc électrique

Un disjoncteur est un élément essentiel dans un réseau électrique car, en cas d'incident, il interrompt le courant au plus vite et évacue l'énergie stockée dans le réseau. Au centre du disjoncteur se trouvent des électrodes, initialement en contact, parcourues par le courant du réseau [10]. Sa principale caractéristique par rapport au fusible est qu'il est réarmable (il est prévu pour ne subir aucune avarie lors de son fonctionnement). L'interruption du courant peut être volontaire dans certains cas comme lors de la maintenance au niveau de l'installation. La coupure peut également se faire automatiquement lorsqu'une anomalie est détectée (fuites de courant, excès de courant dus à une surcharge ou un court-circuit sur le réseau). [11]

Il existe différents types de disjoncteur comme, le disjoncteur basse tension, moyen tension et haute tension.

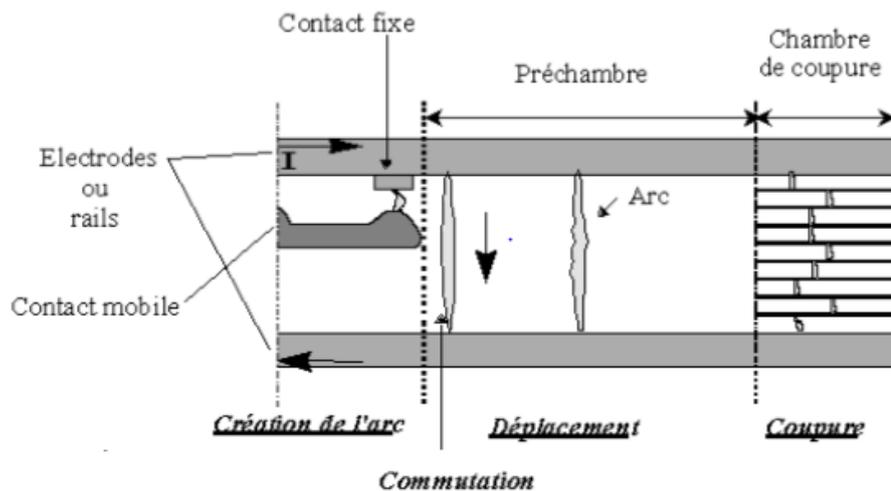


Figure 2.4 : Fonctionnement du disjoncteur (coupe longitudinale)

II-2-3. Traitement des déchets

L'augmentation des déchets due à l'activité humaine dans tous les domaines de vie par exemple : les usines, hôpital, les recherches, Qui provoque un danger pour la santé et l'environnement et se présente en plusieurs formes : déchet danger, inerte, non danger.

Une première utilisation des hautes températures des plasmas est le traitement de déchets afin de limiter la toxicité de certains résidus ou de recycler des matières métalliques. Décontamination du sol : les déchets (terre polluée par des produits chimiques) sont mis en suspension dans de l'eau et le tout est injecté au centre d'un dard de plasma d'arc non transféré de 350 kW [12].

Les procédés de traitement thermique de déchets sont généralement utilisés pour réduire sensiblement le volume et la toxicité des déchets, avec une production possible d'énergie et éventuellement d'une fraction à valoriser. Les principaux procédés sont : - l'incinération - la Co-incinération - la thermolyse et pyrolyse - la gazéification.

Dans le cas de gazéification et vitrification on utilise une torche à plasma

❖ Gazéification

La gazéification permet de chauffage des déchets (papier, carton, plastique, ...) à une température peut dépasser 1000°C en présence de l'air et de l'oxygène (par une quantité limitée pour permettre la combustion des déchets) c'est un processus thermique, cette gazéification conduit à la production d'un gaz combustible de synthèse, chargé en goudron leur utilisation pour la chaleur et l'électricité.

Dans ce cas le gaz synthèse est chargé de goudron et d'autres polluants qui sont fonction de la composition des déchets à traiter pour craquer le goudron en molécules plus petites, on utilise le craquage thermique soit par torche à plasma, soit par lavage, soit par d'autres techniques. Dans

le cas de gazéification par torche à plasma on porte le gaz synthèse à une haute température plus de 1200°C. Ce qui vient de séparer et donne le gaz à une température très élevée.

❖ Vitrification

La vitrification est réalisée dans les fours qui permettent d'obtenir des températures extrêmement élevées (1600 à 2000°C) lors de l'introduction des sols pollués. L'élévation de la température peut être réalisé via la fusion électrique, la fusion par induction, la fusion par torche à plasma, la fusion par Oxycombustion, les électro bruleur, le four à micro-onde [13]. Dans le cas de vitrification par torche à plasma les déchets sont porté à une température très élevé, après le refroidissement se présent sous forme de vitrifiat (un verre en générale de couleur noir) non dangereux et qui est un produit inerte qui ne donne aucun risque de pollutions dans le futur.

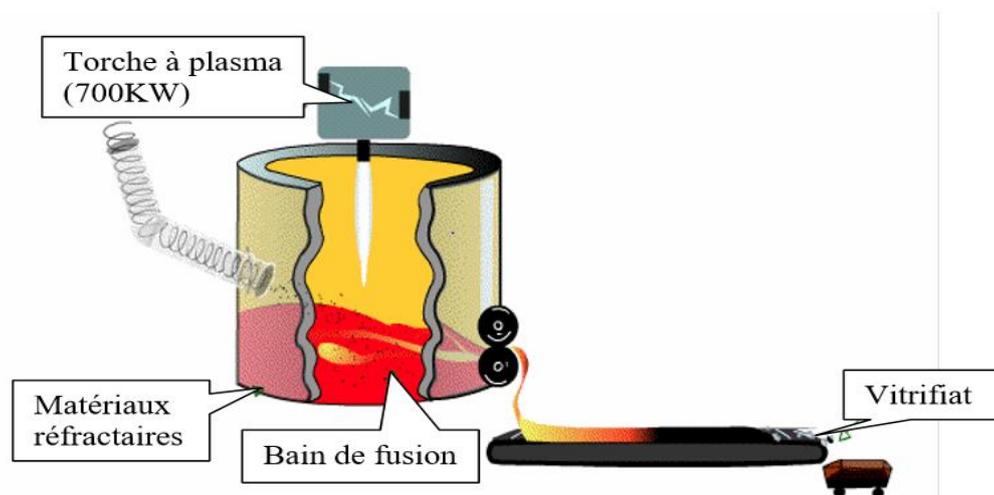


Figure 2.5 : Vitrification du REFIOM source Euro plasma

II-2-4. Les applications du plasma thermique en métallurgiques

Les plasmas thermiques sont très utilisés dans différents domaines de la métallurgie on peut citer entre autre :

- Le soudage à l'arc
- La découpe de métaux à l'arc

a) Le soudage à l'arc

Le terme « soudage à l'arc » définit un procédé de soudage par fusion des bords et addition d'un métal d'apport (souvent contenu dans l'électrode ou le fil-électrode). La chaleur de l'arc peut varier entre 3 500 et 5 550 °C. le métal de base est fondu avec le métal d'apport, ce qui crée le bain de fusion [14]. La torche de soudage utilise un gaz plasmagène et un gaz de protection arrivant en périphérie du plasma et protégeant le bain du métal fondu du contact avec l'air ambiant et en particulier avec l'oxygène, il est applicable sur tous les matériaux métallurgiques soudable comme les aciers alliés et en particulier des aciers inoxydables austénitiques, pour les épaisseurs faibles (inferieures à 0.5 mm).

On distingue plusieurs variantes de la soudure à l'arc pouvant être classées en deux catégories. La première catégorie regroupe les soudures avec des électrodes enrobées connues aussi sous le nom de SMAW (Shielded Metal Arc Welding) ou MMA (Manual Metal Arc). Les électrodes sont constituées d'un côté par les matériaux à souder et d'un autre côté par une baguette de métal d'apport. La soudure est directement effectuée dans l'air. La baguette est alors enrobée d'un laitier qui, lors de sa fusion, forme une couche protectrice pour éviter l'oxydation du métal. La deuxième catégorie comprend les soudures avec des électrodes non fusibles comme le procédé TIG (Tungsten Inert Gas), et le PAW (Plasma Arc Welding). L'arc est généré entre les pièces à souder et une cathode constituée d'un matériau infusible aux conditions opératoires. On utilise généralement une cathode en tungstène pur ou thorié selon les caractéristiques du métal à souder. Ce choix de l'électrode négative permet essentiellement d'améliorer le caractère thermo émissif de la pointe, ce qui facilite l'amorçage pur. Le pourcentage en thorium est typiquement aux alentours de 2%. Un gaz inerte est injecté en permanence pour servir de protection contre l'oxydation.



La dernière catégorie regroupe les soudures à électrodes fusibles qui sont surtout utilisées en mode semi-automatique. Parmi elles figure la soudure MIG-MAG (Metal Inert Gas-Metal Active Gas) qui fonctionne suivant le même principe que la soudure TIG sauf au niveau de la cathode. En effet, au lieu d'une cathode infusible, un fil massif enroulé dans un dévidoir est amené automatiquement au niveau de l'arc pour constituer le métal d'apport [11].

✓ Le principe de soudage à l'arc

Lors du soudage à l'arc, le courant circule à travers un conducteur qui relie le poste de soudage à l'électrode. Il forme un arc électrique en traversant l'espace libre entre l'électrode et le métal de base, puis il poursuit sa course en passant par le câble de masse pour retourner au poste de soudage.

Un arc électrique est donc un gaz ionisé dans lequel circule un courant électrique ; l'arc se forme entre la pointe de l'électrode et la pièce à souder.

Dans un procédé de soudage à l'arc, on utilise aussi souvent un flux solide ou en poudre ou un gaz, qui sert à protéger le bain de fusion de l'air ambiant [14].

✓ Les types de procédé de soudage à l'arc

Il existe principalement quatre types de procédé de soudage à l'arc :

- Soudage à la baguette ou avec électrode enrobée (SMAW)
- Soudage à l'électrode de tungstène (TIG)
- Soudage Mig ou MAG

❖ Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)

Les origines du soudage à l'arc remontent à la fin du 19^{ème} siècle. Le soudage à l'électrode enrobée est inventé en 1907, appelé SMAW, "Shielded Metal Arc Welding", ou MMA, "Manual Metal Arc". Il connaît son essor vers 1920 en même temps que d'autres procédés tels que le soudage oxyacétylénique (au chalumeau) ou le soudage par résistance [15].

Le procédé de soudage SMAW permet de fondre le métal par l'énergie calorifique due à l'arc qui crée entre une électrode métallique fusible comportant un enrobage et les pièces à souder. Une fois l'arc amorcé, la température est très élevée (5500°C à 6650°C), qui permet de fondre l'extrémité de métal d'apport et une petite partie de métal de base, le déplacement de l'électrode se fait manuellement, ce l'arc électrique est stabilisé grâce à des composants contenus dans l'enrobage qui favorise l'ionisation de l'arc, en fondant simultanément avec l'âme métallique, produit un gaz et un laitier qui protègent le métal en fusion de l'oxydation.

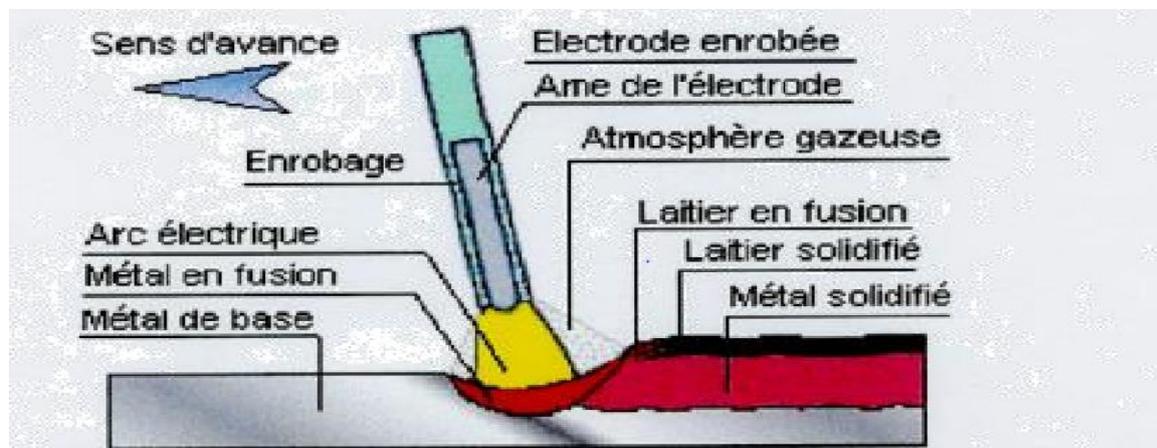


Figure 2.6 : principe du soudage à l'électrode enrobée

❖ Soudage à l'électrode de tungstène (TIG)

Le soudage à l'arc TIG est un procédé d'assemblage par fusion de l'interface entre deux pièces, conduisant à une continuité métallique. Il peut être manuel ou automatisé, et avec ou sans métal d'apport. Ce procédé se caractérise par la création d'un arc électrique entre une électrode réfractaire (la cathode : pôle – du générateur) et la pièce (l'anode : pôle + du générateur) dans un gaz de couverture qui va s'ioniser pour former un plasma. [16]

Le gaz utilisé doit être inerte (c.-à-d. non réactif) l'argon en général pour assurer la protection de l'électrode et de la pièce et doit s'ioniser aisément. Mais il peut être parfois mélangé avec l'hélium ou l'hydrogène pour accroître l'épaisseur soudée ou encore la vitesse de soudage. Le soudage à l'arc électrique est employé pour de nombreuses applications industrielles, en particulier une excellente qualité des soudures produites.

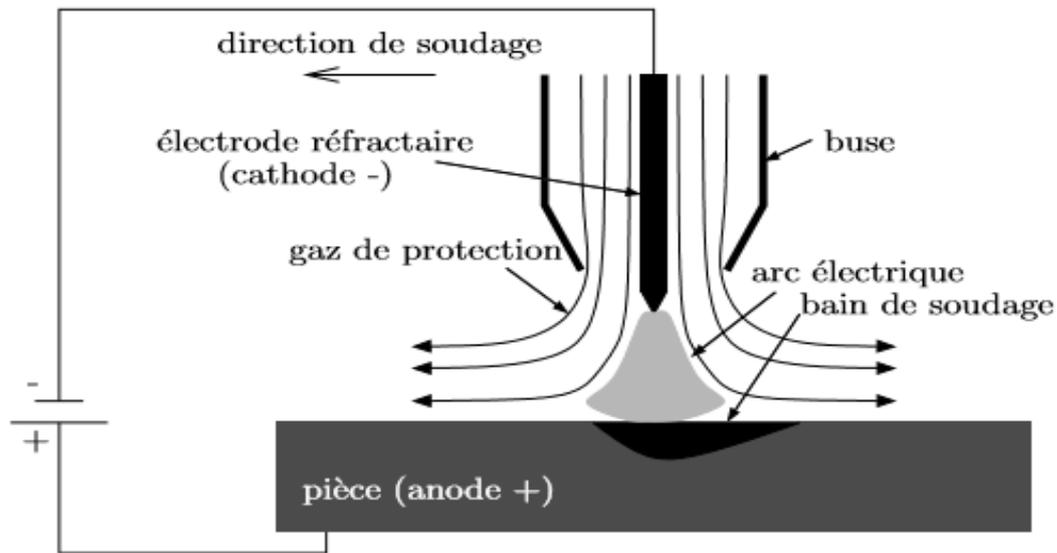


Figure 2.7 : Principe du procédé TIG

b) La découpe de métaux

La découpe est consistée à séparer une pièce métallique en deux par des procédés mécaniques dans l'industrie et les procédés par jet de fluide qui consiste à l'action combinée d'une source de chaleur et d'un flux gazeux. La source de chaleur fait fondre localement le métal que l'on veut traiter et le jet de fluide éjecte ce métal fondu, elle est utilisée dans tous les domaines de l'industrie. Le chapitre 3 présente les différentes méthodes de découpe.



Chapitre III

Les différentes méthodes de découpage

III.1. Introduction

Nous allons décrire dans ce paragraphe les diverses techniques de découpes existantes à l'heure actuelle. Ces techniques se divisent en deux grandes catégories : Une première qui regroupe tous les procédés mécaniques fonctionnant par cisaillement ou arrachement de la matière et une deuxième qui concerne les procédés dits « thermiques » qui fonctionnent par fusion de la pièce à couper [17]. Dans cette partie on s'intéresse seulement à la découpe thermique et comparé la vitesse, la qualité, de trois techniques de découpe : l'oxycoupage, la découpe laser et la découpe plasma. Dans le cas de procédé thermique tous les types de découpe se fonctionne de la même manière : l'énergie transfère à la plaque sous forme de chaleur.

III.2. Le découpage thermique

Pour effectuer le coupage thermique en utilisant un plasma d'arc, on emploie généralement une torche à plasma transféré. Le jet de plasma, largement supersonique, est en mesure de fondre tout le métal rencontré sur sa trajectoire. Le métal fondu est ensuite éjecté de la saignée par l'énergie cinétique du gaz.

Cependant, en fonction des types de coupes (formes), de l'épaisseur du métal à couper et de la disponibilité des équipements, on peut recourir à des techniques de coupage thermique au gaz ou à l'arc, telles que l'oxycoupage ou le coupage au jet de plasma. Lorsqu'on coupe un métal à l'aide d'une méthode de coupage thermique, il est important que la surface à couper soit bien nettoyée, notamment parce que la présence de saletés ou d'impuretés nuit à la vitesse de coupe et entraîne un gaspillage d'oxygène [14].

III-3. Les techniques de découpe thermique

Les techniques de découpe thermiques sont l'oxycoupage, la découpe laser et la découpe plasma.

III.3.1. Oxycoupage

a) Définition

L'oxycoupage est le plus ancien des trois types de découpe, l'énergie de fusion se produit par l'oxydation de fer.



Le gaz de coupe est injecté au de la buse et doit toujours être de l'oxygène assez pur avec moins de 0.5% d'impuretés. La chaleur générée chimiquement par l'oxydation de fer à une température de 1600K à 1800K. Le gaz de chauffe est distribué par des injecteurs placés en couronne autour du jet central. Ce gaz périphérique peut avoir différentes natures suivant l'installation (propane, acétylène ou gaz commerciaux comme le t'étrenne d'Air Liquide). Il est toujours mélangé à l'oxygène comme comburant. Si ce n'est pas l'alimentation pour déplacer la tête de découpe, l'oxycoupage ne consomme aucune énergie électrique. Il permet de découper tous les métaux non alliés contenant du fer dans une plage d'épaisseur de 3 à 150 mm. Tous les autres types de métaux, ou de matériaux ne pourront pas être traités.

b) Le principe de fonctionnement

Le principe de l'oxycoupage consiste à produire, sous l'effet de la chaleur, l'apparition d'oxyde de fer sur un métal ferreux grâce à l'injection d'oxygène. L'oxyde de fer ainsi créé fond sous la pression des gaz et s'écoule ; la coupure du métal est alors réalisée. L'oxycoupage permet de couper des métaux ferreux dont la quantité de carbone ne dépasse pas 1,97 % (c'est-à-dire la plupart des aciers). Il convient particulièrement au coupage des aciers doux. Le procédé est relativement rapide, facile et peu coûteux. Il nécessite peu d'entretien et s'utilise sur les chantiers.

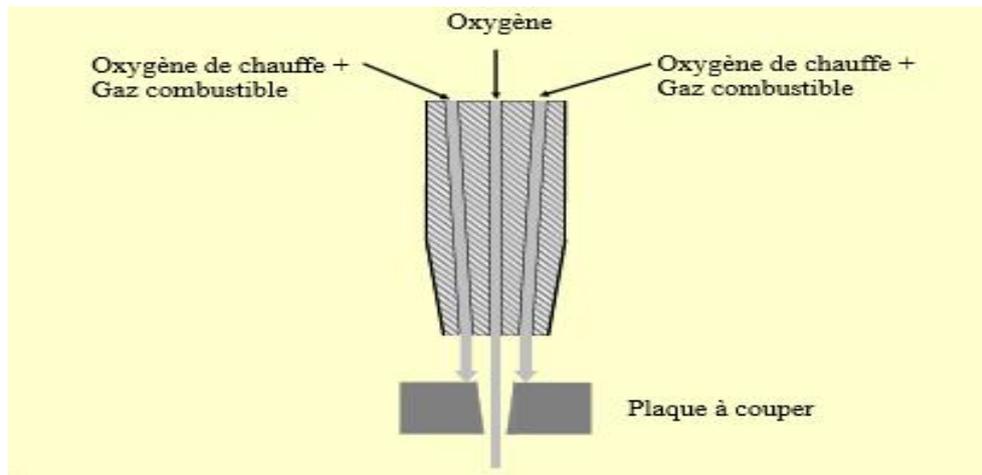


Figure 3.1 : oxycoupage

III.3.2. La découpe laser

La découpe laser est un processus thermique le plus utilisé dans l'industrie à cause de leur efficacité. La source laser émet un faisceau de photon monochromatique (l'énergie), grâce à leur puissance et la précision peut percer et découpé tous type de matériaux soit mince, soit épais et le temps de perçage dépend de type de matériau dans le cas de matériau épais le temps de perçage est longue.



- **Le principe de fonctionnement**

Ce lumière laser est focalisé par une lentille et frappe ensuite la plaque de métal à couper sur la plus petite surface possible (comme il est représenté sur la figure 3.2 ci-dessous), il est absorbé par les électrons libres de surface de métal ce qui conduit le chauffage de métal et transfère de l'énergie des électrons chauffés vers les atomes et d'autres électrons de métal, ceci provoque la fusion puis la vaporisation de matériau et est chassé ensuite par un jet de gaz, la surface affectée par ce faisceau laser est très petite qui conduit une excellente qualité de découpe,

précise, nette et rapide de nombreux matériaux par rapport au d'autre type de découpe (l'oxycoupage, plasma,). Il y'a deux types de laser de découpe : le laser CO_2 et Nd: YAG. La première utilise un mélange gazeux couplé à une décharge électrique pour produire le faisceau laser, fonctionne en continu dans l'infrarouge et découpe tous matériaux non réfléchissant. Pour la deuxième lasers YAG (ou Grenat d'Yttrium et d'Aluminium) le faisceau laser est produit par excitation de mélange de synthèse par une décharge électrique ou une source lumineuse, fonctionne en continu et a une puissance plus élevée par rapport à CO_2 et peut découper les matériaux réfléchissants.

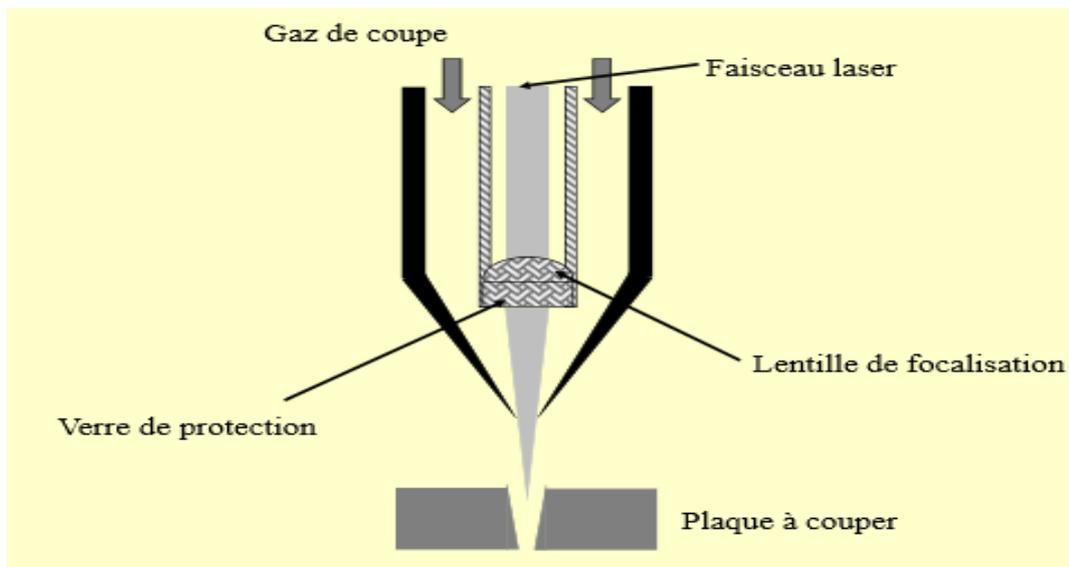


Figure 3.2 : la découpe laser

III.3.3. La découpe au plasma

Il y a 20 ans la découpe à l'arc plasma a été développée principalement pour couper l'acier inoxydable et l'aluminium. Bien que ce procédé soit économiquement avantageux, l'acier doux était rarement coupé avec ce procédé en raison des trois limites fondamentales : une qualité de coupe relativement médiocre, la fiabilité de l'équipement et l'incapacité des machines de coupe antérieures à gérer les vitesses de découpe plasma. En raison de ces limitations, la découpe au plasma n'a pas connu de croissance rapide avant l'introduction de la découpe au plasma par injection d'eau en 1970 [18]. La découpe plasma est généralement utilisée une torche à plasma transféré. Le jet plasma est utilisé pour fondre le métal à son point d'impact, le métal fondu est ensuite éjecté hors de la saignée par l'énergie cinétique du gaz. Il s'agit d'un processus purement physique, sans oxydation et sans combustion du métal.



- **Le principe de fonctionnement**

Le jet est généré par l'arc électrique entre une électrode en tungstène, hafnium ou zirconium intérieure à la torche de coupage et la pièce. Le mélange entre les gaz plasmagènes s'ionise et forme le plasma en sortie de torche. Ce plasma atteint une grande énergie et de température de 22000°C, sert à fondre le métal trouvé sur son trajectoire et soufflant le matériau fondu.

Le procédé de coupage au jet de plasma permet de couper tous les types de métaux, notamment les aciers au carbone, les aciers inoxydables, la fonte, l'aluminium, le cuivre, le nickel et l'étain. Cependant, on recommande des épaisseurs maximales à couper de 25 mm pour l'acier et de 75 mm pour l'acier inoxydable et l'aluminium. Le coupage au jet de plasma est très précis et rapide. De plus, il ne requiert pas de préchauffage des pièces. Par contre, l'équipement est plutôt coûteux et le procédé, plutôt bruyant [14].

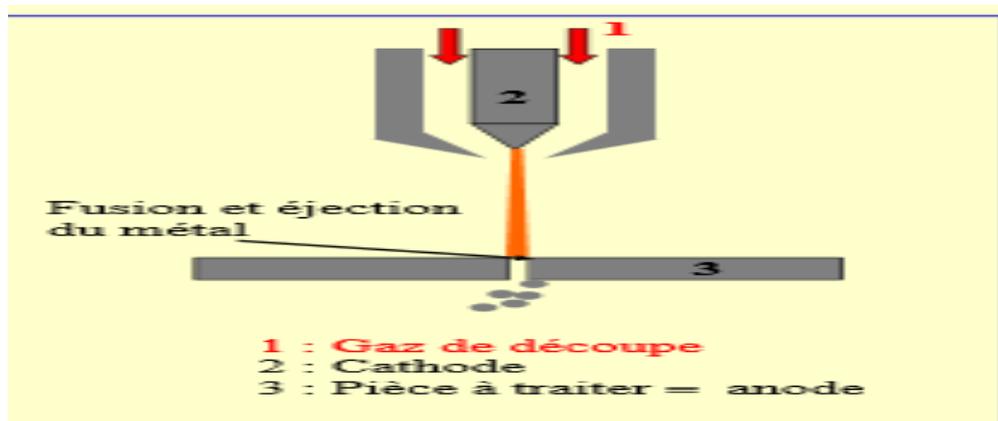


Figure 3.3 : la découpe plasma

Il existe deux types de configuration de torche :

- Les torches à écoulement laminaire axial du gaz autour d'une électrode pointue en tungstène
- La torche à écoulement centrifuge du gaz autour d'une cathode en cuivre à extrémité plate comportant un insert en tungstène, hafnium (Le métal couramment utilisé en tant qu'émetteur d'électrons avec l'air ou l'azote comme gaz plasmagène) ou zirconium.

Le coupage plasma utilise les matériaux conducteurs, comme l'aciers inoxydables, cuivre, aluminium et alliages ne peut pas être coupé par l'oxycoupage, et les aciers inoxydables qui ne peut pas couper par laser

Suivant la puissance de la torche à plasma, on peut découper des produits jusqu'à des épaisseurs de plus de 100 mm.

Ce procédé cesse cependant d'être compétitif dans les cas des aciers ayant plus de 20 à 40 mm d'épaisseur.

III.4. Comparaison de processus de découpe

❖ Le laser

La vitesse de coupe est très rapide sur les matériaux minces avec une durée de coupe très petit contrairement au matériau épais. Le faisceau laser percé une très petite surface (une fraction de mm^2), ce qui conduit la zone affecté thermiquement est petite mais donne une meilleure qualité de coupe, le cout est très élevé

❖ L'oxycoupage

L'oxycoupage à des vitesses de coupe lentes sur une grande plage d'épaisseurs (plus rapide que les autres systèmes sur l'acier au carbone très épais (3 ou 7.5cm et plus) ; le temps de préchauffage augmente considérablement les temps de perçage, ce qui réduit la vitesse de coupe globale [19], peut couper seulement les aciers que ce soit allier ou non, la zone affectée est grande, la largeur de trait de l'ordre de 2 à 3 mm

L'oxycoupage a ainsi l'avantage de créer des saignées aux bords bien lisses et aucun retraitement de la pièce coupée n'est nécessaire. La dépouille créée est quasi inexistante. Finalement, la qualité de coupe de l'oxycoupage est moyenne : les caractéristiques de la saignée sont bonnes mais la précision est médiocre et les déformations thermiques importantes. Malgré cela, l'oxycoupage est beaucoup utilisé dans l'industrie car c'est un procédé très robuste avec un coût très faible aux alentours de quelques centaines d'euros [17].

❖ Le plasma

La découpe plasma se forme par la production de chaleur ce qui implique une vitesse de coupe très élevé avec des pertes de matériaux moindres, l'avantage de découpe plasma est le gain de temps et qui donne une qualité de coupe excellente.

La forte puissance thermique conduit à une fusion rapide puis l'évaporation partielle ou totale de matériau.

Le plasma peut couper des métaux sales, peints ou rouillés sans « travaux préliminaires », c'est à dire sans préparation de la pièce à tailler préalablement à toute coupe à effectuer. D'autres méthodes de coupage nécessitent souvent des travaux préliminaires, mais avec le plasma, tout ce dont vous avez besoin est un bon contact pour la mise à la terre.

Suivant la configuration de torche, la zone affectée est très petit de l'ordre de 1 à 2 mm.

En effet tous les matériaux conducteur d'électricité, avec ce procédé il est possible de couper jusqu'à environ 70 mm sur certain installation la précision de plasma est appréciable grâce à la

fusion localisé la déformation est plus faible et permet des précisions de 0.2 mm environ sur les installations récentes

Pour conclure, la découpe plasma permet de traiter des métaux dans une gamme d'épaisseur variant de 1 à 150 *mm*. Cependant pour cela il faudra adapter la torche pour les différentes épaisseurs. Par rapport à l'oxycoupage, la ZAT est fortement réduite et la précision accrue. La technique plasma, peu fragile permet de couper tous les types de métaux et le coût d'une installation est à peu près dix fois moindre que celui d'un banc de découpe laser [17].

La découpe par plasma représente un compromis entre la qualité, la productivité et le coût d'opération ce qui le rend très compétitif par rapport aux autres techniques de coupage thermique (oxycoupage, découpe par laser) [11].

Chapitre IV

Calcul du profil de température dans un plasma d'arc

IV.1. Introduction

Au cours de ce chapitre nous allons donner les équations de base et décrire l'évolution des températures dans un plasma d'arc électrique en tenant compte des propriétés thermodynamiques, la conductivité thermique, ... L'énergie transférée au plasma d'arc par l'intermédiaire d'un champ électrique appliqué à cause de leur masse et leur faible mobilité les particules lourdes sont peut influencer par la présence de champ électrique se sont les électrons qui sont très accéléré. Les collisions entre les électrons et les particules lourds vont avoir lieu.

Lors d'une collision élastique, l'énergie interne des particules entrant en collision ne subit aucune modification. Il y a simplement un changement de direction des particules, avec une redistribution des énergies de translation entre elles. Cela se traduit par la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique.

Les collisions inélastiques sont responsables de la fragmentation des molécules impactées ou de la modification de la distribution de l'énergie. Les processus d'excitation deviennent significatifs lorsque le champ réduit augmente, cela entraîne une augmentation de l'énergie des particules projectiles au-delà du seuil d'excitation, les molécules de gaz se mettent en mouvement dans la direction du champ. Leur vitesse varie en fonction de la distribution et l'intensité du champ ainsi que d'autres paramètres tels que la pression, la température et l'humidité du gaz. [20]

IV.2. Calcul du profil de température

IV.2. 1. Mécanisme de transfert d'énergie aux particules

L'énergie est transférée à la colonne par l'intermédiaire du champ électrique appliqué. Compte-tenu de leur masse et de leur faible mobilité, les ions sont peu influencés par la présence du champ en général. En effet, dans les arcs, la pression est assez élevée pour que le libre parcours moyen des particules soit très faible devant les dimensions de la colonne. Ainsi entre deux chocs, les ions ne gagnent pas d'énergie par le champ électrique. Ce sont donc des électrons (qui sont accéléré dans le champ électrique) qui transfèrent leur énergie cinétique aux particules lourds dans les collisions élastiques [15].

L'énergie totale fournie aux électrons est égale à : σE^2 , une fraction de cette énergie est transférée aux ions et aux neutres par collisions élastique W_{col} , le reste étant perdu par conduction thermique et par diffusion ambipolaire vers les parois ainsi, que par collision inélastique et sous forme de rayonnement.

L'énergie transmise à une particule lourde lors d'une collision est donnée par [21] :

$$W_{col} = 3 \frac{m_e}{M} K(T_e - T_g) n_e \nu \quad (IV.1)$$

ν : étant la fréquence des collisions m_e , T_e sont respectivement la masse et la température des électrons, n_e leur densité. M et T_g la masse et la température des particules lourdes.

L'énergie perdue par conduction thermique des électrons est donnée :

$$W_{th} = -\vec{\nabla}(\lambda_e \cdot \vec{\nabla})T \quad (IV.2)$$

En géométrie cylindrique, avec un gradient longitudinal ($\frac{dT}{dz}=0$), on a :

$$W_{th} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda_e \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (IV.3)$$

λ_e : étant le coefficient de conductivité thermique des électrons.

L'énergie associée à la perte par diffusion ambipolaire est [21] :

$$W_{amb} = \left(E_i + \frac{5}{2} K T_e \right) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot D_a \cdot \frac{\partial n_e}{\partial r} \right) \quad (IV.4)$$

D_a : étant le coefficient de diffusion ambipolaire.

L'énergie perdue par rayonnement pourra être désigné par U_{rad} .

Le bilan total d'énergie des électrons s'écrit sous la forme : [21]

$$\sigma E^2 = 3 \frac{m_e}{M} K(T_e - T_g) n_e \nu - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda_e \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \left(E_i + \frac{5}{2} K T_e \right) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot D_a \cdot \frac{\partial n_e}{\partial r} \right) + U_{rad} \quad (IV.5)$$

IV.2.2. Hypothèse de base

Dans tout le calcul du profil de température et de la densité électronique et celle des neutres, on considère :

- Un plasma a symétrie cylindrique, il est également en ETL, et caractérisé par une seule température ($T_e = T_g$).
- La température $T(r)$ qui ne dépend que de la distance radiale r .
- La pression atmosphérique est constante ($P = C^t$) à l'intérieur de la décharge.
- Le champ électrique est constant et uniforme radialement.
- Le milieu se comporte comme un gaz parfait.

Pour calculer le profil de température, il faut résoudre les équations de conservation de la masse et de l'énergie

IV.2.3. Equations de conservation

Puisque le plasma peut être considéré comme un fluide, on peut écrire les équations de conservations (masse, quantité de mouvement, énergie, courant) à partir des équations de Navier-Stokes avec les termes spécifiques au plasma.

- **Equations de conservation de masse**

L'équation de conservation de la masse pour une espèce i est obtenue en multipliant l'équation de continuité par la masse m_i de cette espèce. En sommant sur toutes les espèces, on aboutit à l'équation de conservation de la masse du plasma qui s'écrit : [22]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v) = 0 \quad (IV.6)$$

- **Equation de conservation de l'énergie**

En sommant les équations de l'énergie cinétique pour chacune des espèces, on fait disparaître les termes par collision entre espèce et en faisant apparaître l'enthalpie H ($H = U + PV$). Cette grandeur doit se conserver, on obtient l'équation de conservation sous cette forme. [23]

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \text{div}(\rho H \vec{v}) = \rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}) H = \frac{dP}{dt} + \vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} P + \vec{j} \cdot \vec{E} - U_{rad} - W_{th} \quad (IV.7)$$

En faisant intervenir la chaleur spécifique $c_p = \frac{dH}{dT}$ et en remplaçant W_{th} par sa valeur, on obtient :

$$\rho c_p \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \right) T = \sigma E^2 - U + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{dP}{dt} + \vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} P \quad (IV.8)$$

La pression est supposée constante et uniforme, on :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial r} = \sigma E^2 - U + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (IV.9)$$

On obtient alors :

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{\rho c_p} \left(\sigma E^2 - U + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) - v \frac{\partial T}{\partial r} \quad (IV.10)$$

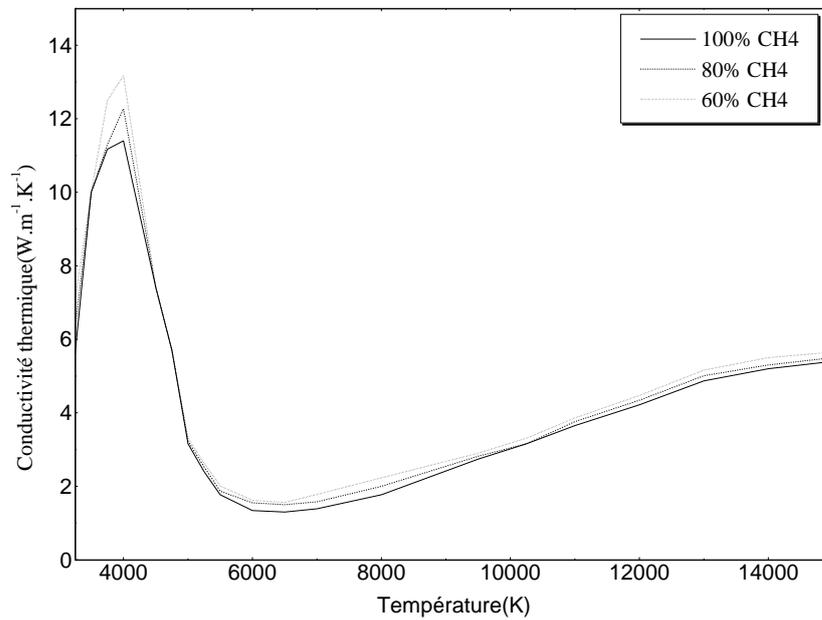
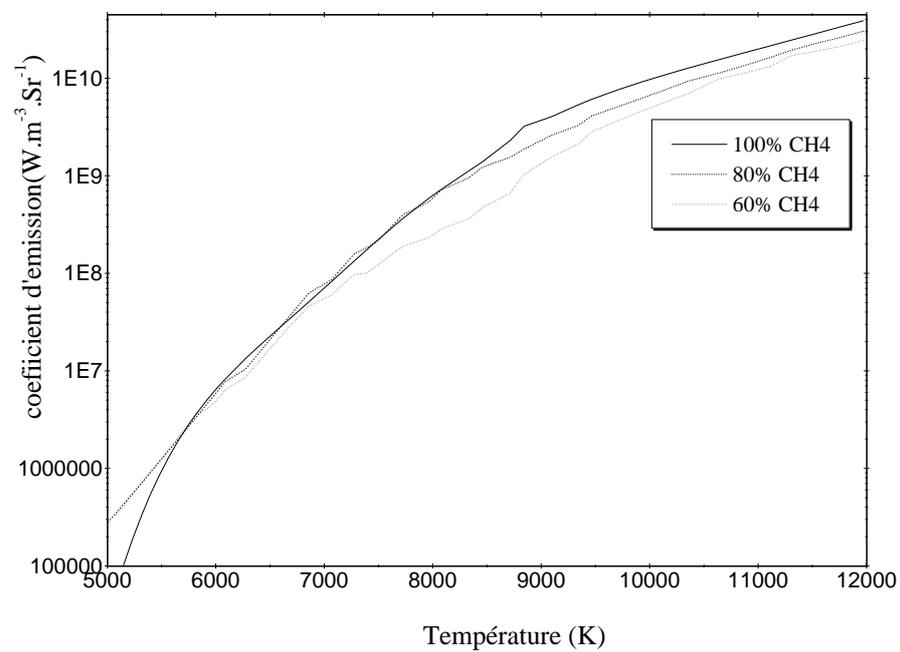
Dans un milieu stationnaire, le premier membre de l'équation (IV.10) est nul, et en négligeant l'écoulement ainsi que les pertes par convection, notre équation se réduit à la forme simplifiée : [24]

$$\sigma E^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) - U_{rad} = 0 \quad (IV.11)$$

Avec

$$U_{rad} = 4\pi \epsilon_N$$

Ces équations quoi qu'elles permettent de déterminer les valeurs théoriques des paramètres aussi fondamentaux comme le profil de la température qui constitue l'axe de notre étude, nécessite la connaissance d'un certain nombre de grandeurs qui ne sont pas toutes aisément calculables. C'est le cas des conductivités électrique et thermique et de la puissance rayonnée. Les données utilisées dans les calculs sont les coefficients de conductivité thermique et électrique et aussi le rayonnement qui s'échappe du plasma. [25], [26], [27]

Figure 4. 1 : Conductivité thermique de CH₄-H₂Figure 4.2 : Coefficient d'émission de CH₄-H₂

IV.3. Méthode de calcul

IV.3.1. Principe de la méthode de Runge-Kutta

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = f(y, t) \\ y(0) = y_0 \end{cases}$$

Avec : $t=0, \dots, t_i, t_{i+1}$

Si l'intervalle de temps dt est suffisamment petit, on peut écrire :

$$Y_{i+1} = Y_i + Y'_i * dt$$

Avec $Y' = f(t_i, Y_i)$

On voit que si Y_i est connu, alors Y_{i+1} est calculable et qu'il suffit de donner une condition initiale : Y_0

Pour une équation du second ordre :

$$Y'' = \frac{d^2Y}{dt^2} = f(t, Y, Y')$$

$$Y_{i+1} = Y_i + Y'_i * dt$$

$$Y'_{i+1} = Y'_i + Y''_i * dt$$

Avec $Y''_i = f(Y_i, Y'_i)$

Il faut donc deux conditions initiales pour démarrer la résolution : Y_0 et Y''_0 .

IV.3.2. L'algorithme de Runge-Kutta d'ordre 4

Les méthodes de Runge et Kutta sont les généralisations de la méthode d'Euler à des ordres supérieurs à un. Elles s'obtiennent à partir de formules d'intégration numériques plus précises que la formule des rectangles [28]. Les schémas d'ordre 2 ou 4 sont plus utilisés, leur programme est simple et stable pour les fonctions physiques.

On part de la formule d'Euler, qui donne :

$$Y_{n+1} = Y_n + h * f(x_n, Y_n), \text{ et } x_{n+1} = x_n + h$$

La méthode Runge-Kutta du deuxième ordre produit deux coefficients k_1 et k_2 , permet d'écrire

$$K_1 = h * f(x_n, y_n)$$

$$K_2 = h * f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + K_1/2)$$

$$Y_{n+1} = Y_n + K_2 + O(h^3)$$

Cette méthode exige donc deux évaluations de f . l'erreur de consistance est en $O(h_3)$ et l'erreur globale de convergence est d'ordre $O(h_2)$

Pour obtenir plus de précision, mais en doublant le temps de calcul puisqu'on procède à 4 évaluations de f , voici la méthode Runge-Kutta du quatrième ordre :

$$K_1 = h * f(x_n, y_n)$$

$$K_2 = h * f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + K_1/2)$$

$$K_3 = h * f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + K_2/2)$$

$$K_4 = h * f(x_n + h, y_n + K_3)$$

$$y_{n+1} = y_n + K_1/6 + K_2/3 + K_3/3 + K_4/6 + O(h_5)$$

La méthode Runge-Kutta RK4 exige donc 4 évaluations de f , ce qui peut être gênant si f est compliquée. L'erreur de consistance est en $O(h_5)$ et l'erreur globale de convergence est d'ordre $O(h_5)$.

IV.4. Résultat et discussion

La résolution des équations (IV. 10) et (IV. 11) est assurée par la méthode de Runge-Kutta, en tenant des pertes radiatives négligées aux travaux antérieures. Dans le cas d'un régime stationnaire, le calcul du profil radial de température a été réalisé pour un plasma formé de mélanges $\text{CH}_4\text{-H}_2$ l'évolution de la température d'un plasma arc en fonction du temps est donnée dans le cas d'un plasma sf_6 présent dans un arc électrique en extinction, dans ce même plasma, nous avons examiné l'effet de la vapeur métallique sur le profil de température.

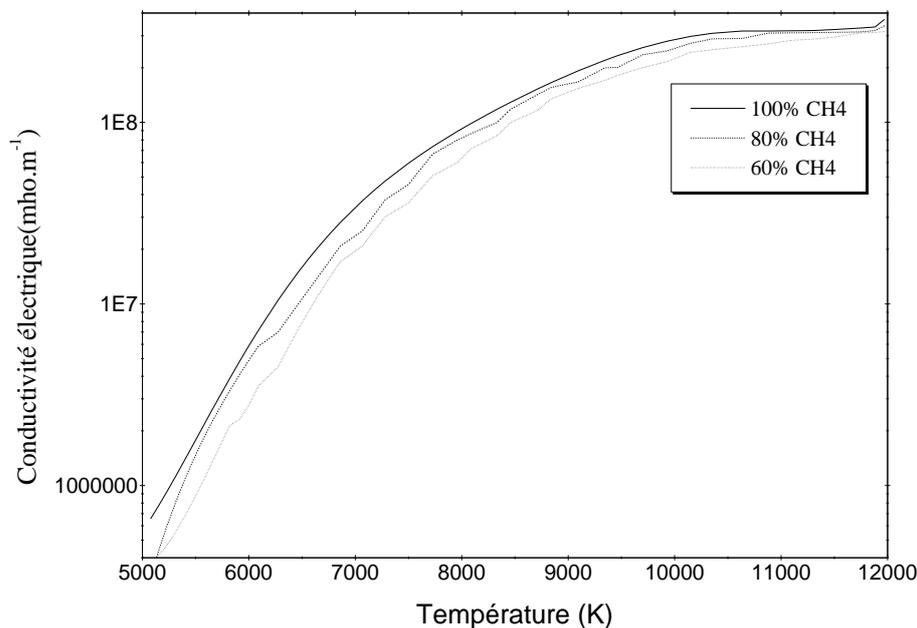


Figure 4.3 : Conductivité électrique de $\text{CH}_4\text{-H}_2$

IV.4.1. Profil de température de CH_4 pur

Nous présentons sur la figure 4.4 le profil radial de température pour CH_4 pur, dans le cas d'un plasma cylindrique, en régime stationnaire. Le rayon de décharge est fixé à 5 mm et l'intensité initial est de 10A, pour une pression égale à une atmosphérique. On observe une diminution de

température suivant le rayon de décharge. La température passe de 12000K (température axiale) jusqu'à une valeur de 2000K (à R=5mm)

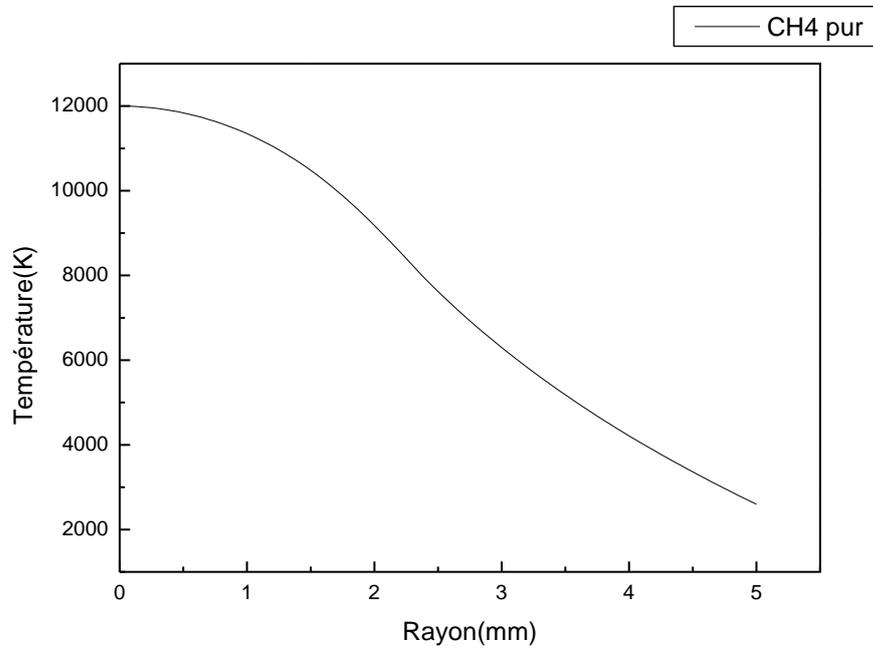


Figure 4. 4 : profil de température de CH_4 pur

IV.4.2. Effet des pertes radiatives sur le profil de température

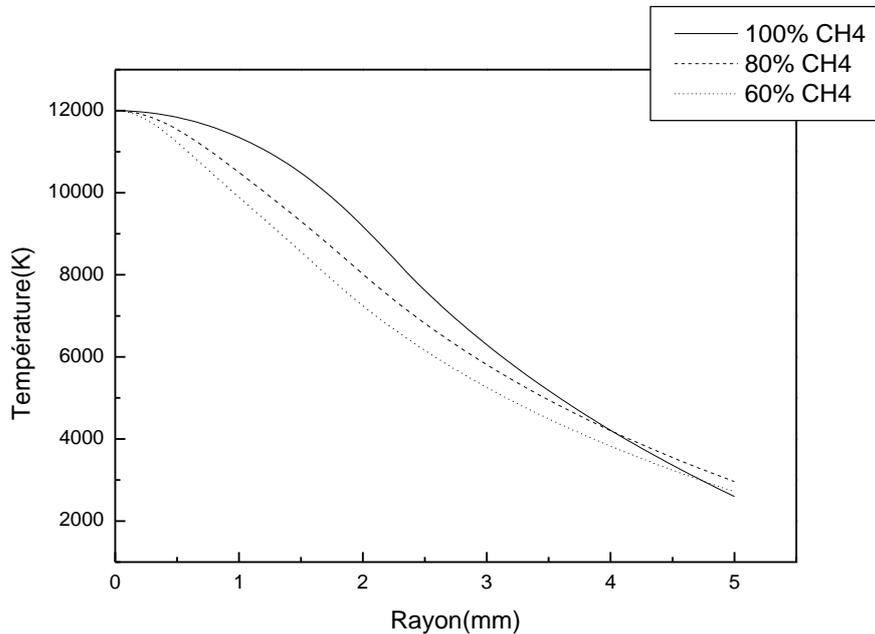


Figure 4.5 : Effet du pourcentage de H_2 sur Profil de température de CH_4-H_2

Sur la figure 4.5 nous avons représenté respectivement l'évolution des profils radiaux de la température pour CH_4 pur et de mélanges de CH_4-H_2 . La valeur de la température, axiale est fixée à 12000 K, et celle des parois à 2000 K. On observe sur toutes les courbes $T(r)$ présentent une atténuation de gradient de température de 4000 K. Ce phénomène se produit pour les valeurs correspondant aux pics de la conductivité thermique (figure 4.1).

On voit bien que la présence de l'hydrogène conduit à un abaissement de température par rapport à celui de CH_4 pur, car l'effet d'hydrogène est beaucoup plus ressenti sur la conductivité électrique que sur le rayonnement (voir ci-dessous (figure 4. 2 et 4. 3)).

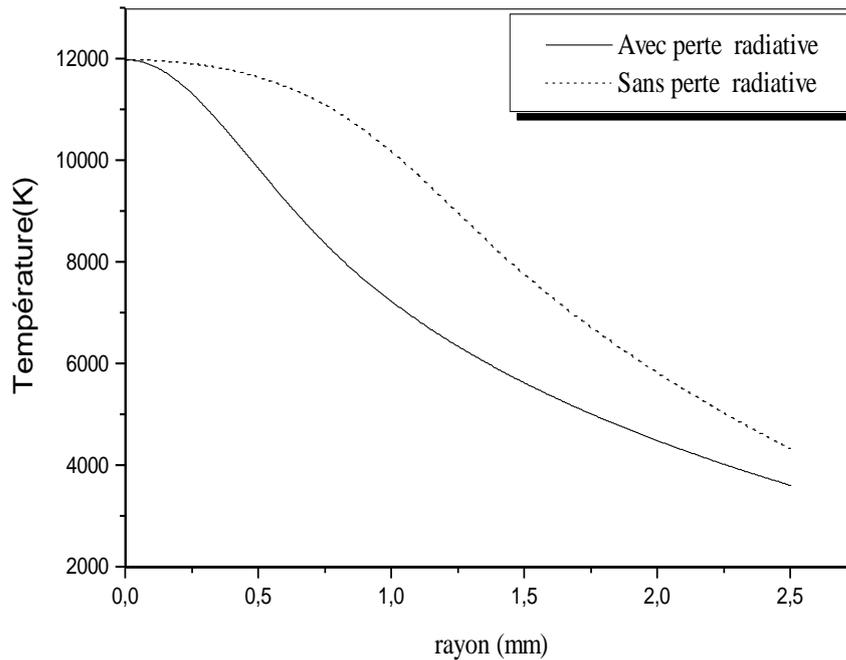


Figure 4. 6 : effet des pertes radiatives sur le profil de température

Le rayonnement peut représenter une limite prépondérante dans le bilan énergétique et il devient essentiel de pouvoir mesurer l'influence des pourcentages des mélanges $\text{CH}_4\text{-H}_2$ sur le rayonnement des arcs.

Les résultats montrent que la présence de rayonnement dans le mélange $\text{CH}_4\text{-H}_2$ a une grande influence sur le profil de température. (Figure 4. 6)

IV.4.3. Evolution de la température axiale d'un plasma d'arc en fonction du temps

Dans le cas d'un plasma d'arc de disjoncteur formé de mélange de $\text{SF}_6\text{-Cu}$, supposé cylindrique et en régime transitoire, nous montrons l'évolution de la température en fonction du temps.

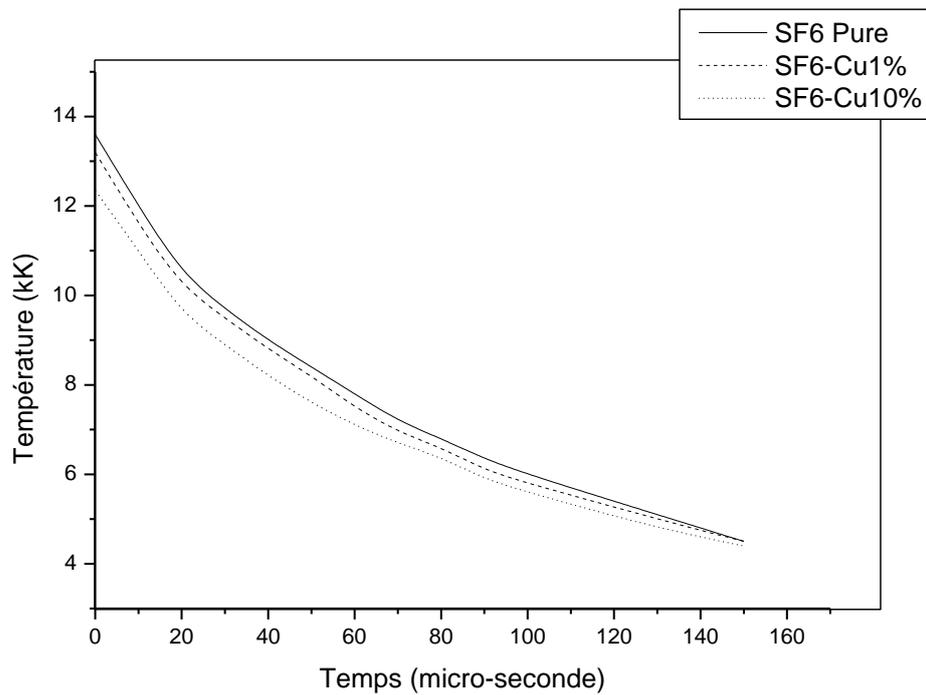


Figure 4. 7 : Profil de la température $T(t)$ dans le cas des mélanges SF₆-Cu

L'érosion des contacts dans un disjoncteur se traduit essentiellement par la présence de vapeur de cuivre. Dans tous les cas de fonctionnement le plasma n'est formé dans du SF₆ pur mais dans un mélange contenant des proportions non négligeables du vapeur de cuivre.

La présence de la vapeur conduit à cet écart (figure 4. 7) qui est dû à la conductivité électrique qui et aussi aux pertes radiatives, cet écart qui augmente en présence de 10% de vapeur de cuivre alors qu'elle n'est que peu modifiée avec 1%.

Conclusion Générale

Le but recherché de ce travail était de déterminer certaines grandeurs fondamentales caractérisant les plasmas thermiques d'arc formés de mélanges $\text{CH}_4\text{-H}_2$. On s'est intéressé surtout au profil de température dans le cas d'un régime stationnaire et avec une géométrie cylindrique. Egaleme nt on a déterminé les variations de la température axiale en fonction du temps dans le cas d'un plasma d'arc disjoncteur (en régime transitoire).

Les résultats prouvent que la présence de l'hydrogène dans le mélange conduit à un abaissement de la température de l'arc, le rayonnement émis par le plasma représente un terme non négligeable dans le bilan d'énergie, son effet se fait ressenti beaucoup sur le profil de température.

Généralement, les différentes études concernant les plasmas d'arc supposent que la température radiale est homogène (plasma isotherme). La connaissance du profil réel de température permettra l'évaluation de la distribution de l'énergie thermique et l'étude des transferts thermiques du plasma avec d'autres particules. Le calcul du transfert thermique du plasma avec d'autres particules. Le calcul du transfert radiatif dans les plasmas nécessite aussi la connaissance des champs de température.

Références

- [1] Nicolas DUBUS « Contribution à l'étude thermique d'un réacteur à décharge à barrière diélectrique », thèse de doctorat, université de Poitiers (2009)
- [2] Baudoin Fulbert « Contribution à la modélisation d'un arc électrique dans les appareils de coupure basse tension », thèse de doctorat, université de Blaise Pascal-Clermont (2004). N° : D. U. 1517
- [3] ARIF ALI « MODELISATION D'UNE INSTALLATION A PLASMA INDUCTIF BASSE FREQUENCE », thèse d'université de Biskra (2003)
- [4] Mme Bebdjabbar Née Bahlouli Fatna « Modylisation hydrodynamique d'une torche à plasma couplé inductivement », thèse de doctorat, université de Blaise Pascal (2013)
- [5] Ailas Ismail « Roprietes radioactives d'un plasma thermique forme de mélanges Argon-Hélium », thèse Université Abou-Bekr Belkaïd - Tlemcen (2010)
- [6] P. Fauchis « Advnced Cours Thermal Plasmas Technology And Applications », Vol 1. P. 1. 74, ed. M.I. Boulos, Limoges, France (1985).
- [7] Maher I. Boulos « Thermal Plasma Processing », IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 19, N°. 6, (1991)
- [8] FADHEL Ben Ettouil « Modélisation rapide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc », thèse de doctorat, université de Limoges (2008). N° 8-2008
- [9] SOKOLOV DMITRY EVGUENIEVITCH « Contribution au développement de la projection thermique à très faible pression », thèse de doctorat, université de technique d'Etat de Tver (2009). N° d'ordre : 109
- [10] Mme Laure REYNARD épouse PIQUERAS « Modélisation tridimensionnelle de l'amorçage de l'arc électrique dans un disjoncteur basse-tension », thèse de doctorat, école centrale de Lyon (2006). N° : 2005-03
- [11] RAVO RAMANANTSOA « CARACTERISATION EXPERIMENTALE D'UN PLASMA D'ARC ET DE SON INTERACTION AVEC LES ELECTRODES », thèse de doctorat, université de Toulouse III pole Sabatier (2011)
- [12] M. SALANNE Jean-Philippe « Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l'intermédiaire de leur alimentation », thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse (2005)
- [13] BRGM/RP-57708-FR-Rapport final
- [14] Soudage et assemblage-soudage Guide d'auto-apprentissage (2010)
- [15] Adnan KECHAOU « ETUDE DU SOUFFLAGE MAGNETIQUE DE L'ARC ELECTRIQUE DE SOUDAGE », Thèse de doctorat, université de liège (2013)

- [16] Michel BROCHARD « Modèle couplé cathode-plasma-pièce en vue de la simulation du procédé de soudage à l'arc TIG », thèse de doctorat, université de Marseille (2009)
- [17] Pierre Freton « Etude d'un arc de découpe par plasma d'oxygène Modélisation – expérience », thèse d'université Paul Sabatier, Toulouse III (2002)
- [18] <http://www.sppusa.com>
- [19] Technologie de coupage au plasma : Théorie et pratique Manuel de l'étudiant
- [20] Mme ASSAF IMENE « Effet des conditions aux limites sur la propagation du streamer positif dans l'azote », thèse d'université d'Oron (2016)
- [21] S. Vacquié ; « L'arc électrique et ses application », Editeur : Eyrolles (31 mars 2000) 75700 Paris
- [22] ZO Alain RANARIJAONA « Etude des écarts a l'équilibre thermique dans les plasmas d'arc », thèse de doctorat, université Toulouse III Paule Sabatier (2011)
- [23] A. Gleizes *et al* 1993, *J. Phys D : Appl. Phys.* 26, 1921-1927
- [24] S. Vacquié, *Pure &App/. Chem.*, Vol. 68, No. 5, pp. 1133-1136, 1996.
- [25] B Liani *et al* 1997 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 30 2964
- [26] H. Abdelhakim, J.P. Dinguirard and S.Vacqui, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 13, 1427 (1980)
- [27] J-B Belhaouari *et al* 1998 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 31 1219
- [28] KHOUANE MEFTAH « Analyse numérique et programmation », Math5 Méthodes Numériques Appliquées. P 64, Université ABOU BEKR BELKAID – Tlemcen Laboratoire IS2M

Titre : « Eude des propriétés thermodynamique d'un arc électrique de découpe »

Résumé

Dans ce travail nous nous proposons d'étudier la distribution de l'énergie thermique dans les plasmas d'arc afin de déterminer les profils de température. Le plasma est supposé cylindrique et en équilibre thermodynamique. Les équations de base sont les équations de conservation de la masse et l'énergie. La résolution numérique du système d'équations obtenues est réalisée à l'aide d'une procédure de Runge-Kutta. Les données nécessaires à cette modélisation sont les conductivités thermique et électrique et aussi la puissance radiative dégagée du plasma. Les résultats obtenus montrent que les pertes radiatives provoquent un refroidissement du plasma. Le rayonnement émis par le plasma représente un terme non négligeable dans le bilan d'énergie, son effet se fait ressentir beaucoup sur le profil de température.

La présence de l'hydrogène influence également sur le profil de la température du plasma de CH₄-H₂.

Mots clés : plasma thermique, arc électrique, profil de température

Titre : « Study of the thermodynamic properties of a cutting electric arc »

Summary :

In this work we propose to study the distribution of thermal energy in arc plasmas in order to determine the temperature profiles. The plasma is assumed to be cylindrical and in thermodynamic equilibrium. The basic equations are the conservation equations of mass and energy. The numerical resolution of the system of equations obtained is carried out using a Runge-Kutta procedure. The data necessary for this modeling are the thermal and electrical conductivities and also the radiative power released from the plasma. The results obtained show that the radiative losses cause a cooling of the plasma. The radiation emitted by the plasma represents a non-negligible term in the energy balance, its effect is felt much on the temperature profile.

The presence of hydrogen also influences the temperature profile of the CH₄-H₂ plasma.

Key words : thermal plasma, electric arc, temperature profile

ملخص

في هذا العمل نقترح دراسة توزيع الطاقة الحرارية في البلازما القوسية من أجل تحديد ملامح درجة الحرارة. يفترض أن تكون البلازما أسطوانية وفي حالة توازن حراري ديناميكي. المعادلات الأساسية هي معادلات انحفاظ الكتلة والطاقة. يتم تنفيذ القرار العددي لنظام المعادلات التي تم الحصول عليها باستخدام إجراء Runge-Kutta. البيانات اللازمة لهذه النمذجة هي الموصلية الحرارية والكهربائية وكذلك الطاقة الإشعاعية الصادرة من البلازما. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن الخسائر الإشعاعية تسبب تبريد البلازما. يمثل الإشعاع المنبعث من البلازما مصطلحاً لا يمكن إهماله في توازن الطاقة، حيث يكون تأثيره محسوساً بدرجة كبيرة على درجة الحرارة. يؤثر وجود الهيدروجين أيضاً على درجة حرارة درجة حرارة البلازما CH₄-H₂.

الكلمات المفتاحية: البلازما الحرارية، القوس الكهربائي، درجة الحرارة

