



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 de la projection thermique par plasma  
d'arc**

Présenté par :

Mlle ZIRAR Amina

Le mercredi 8 Juin 2016

*Devant le jury composé de MM.*

- **Dr SENOUDI Assia** (Président)
- **Pr LIANI Bachir**..... (Encadreur)
- **Pr BOUSSAID Abdelhak**..... (Examineur)

Année universitaire : 2015-2016

# **Remerciement**

*Je remercie mon dieu le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce modeste travail.*

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

*Mes tous premiers remerciements sont adressés à Monsieur le professeur Bachir LIANI, professeur à la Faculté des Sciences de l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen, mon encadreur de mémoire qui a été présent pour moi au cours de la durée de ma thèse et au cours de mes cinq années d'étude*

*Je souhaite remercier les membres du jury Monsieur BOUSSAID Abdelhak et madame Dr SENOUDI Assia 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 voudrais saluer et remercier chaleureusement Mohamed Menaouar qui a toujours été disponible pour m'aider malgré la grande distance*

*Je remercie mes parents, mes deux frères qui mon toujours soutenues, poussées vers la réussite. Sans oublier mes amies, Nawel et Fatima*

# Table matière

<b><u>Introduction</u></b>	I
<b><u>Chapitre 1: Généralités sur les Plasmas</u></b>	1
I-1 Description générale	2
I-2 Grandeurs caractéristique	4
I-2-1 Longueur de Landau	5
I-2-2 La longueur de Deby	5
I-3 Classification des plasmas	6
I-3-1 Plasmas froids	7
I-3-2 Plasmas thermiques	7
I-3-3 Plasmas chauds	7
I-4 Génération et maintien des plasmas	8
I-4-1 Les décharges électriques	8
I-4-2 Le chauffage	9
I-4-3 L'absorption de rayonnement	9
I-5 Applications des plasmas	10
<b><u>Chapitre 2: LES PLASMAS THERMIQUE</u></b>	11
II-1 Introduction	12
II-2 Les plasmas d'arc	13
II-2-1 Historique de l'arc	14
II-2-2 Amorçage de l'arc électrique	14
a. Transition continue	14
b. Contact	14
c. Surtension	15
II-2-3 Classification de l'arc	15
II-3. La torche plasma	16
II-3-1. Les plasmas à arc soufflé	17
II-3-2 Les plasmas à arc transféré	17
II-4. Equilibre thermodynamique complet	18
II-4-1. Les lois d'équilibre	19
- La loi de Maxwell	19
- La loi de Boltzmann	19
- La loi de Saha	20
- La loi de Guldberg- Waage	20
- La loi de Planck	21
II-4-2 Ecart à l'équilibre thermodynamique complet Equilibre thermodynamique local	22
<b><u>Chapitre 3:La projection thermique</u></b>	23
III.1 La projection thermique	24
III.2 Historique de la projection thermique	24
III.3 Les procédés de la projection thermique	25
1. La projection par flamme	25
a) Flamme poudre	26
b) Flamme fil	
c) Flamme hypersonique	26

# Table matière

	27
• Canon détonation	27
• HVOF (flamme oxyfuel à haut température	28
2. Projection par arc électrique	29
• La projection par arc	29
• La projection plasma	30
III.4 Les étapes de projection	31
1 Génération du jet plasma	31
a) Amorçage d'arc	31
b) Jet plasma	32
c) Le gaz Plasmagène	33
d) Injection des gaz	33
2 Injection de la poudre dans le jet plasma.	35
3 Traitement des particules dans le jet plasma	36
4 Constriction du dépôt	37
<b><u>Chapitre 4: Calcul de composition chimique plasmas en équilibre thermodynamique</u></b>	38
IV-1. Introduction	39
IV-2. Calcul de la composition	39
IV-2-1. Ecriture des équations	39
IV-2-2. Lois annexes	41
a) La loi de neutralité électrique	41
b) La loi de Dalton	41
c) Loi de conservation de la quantité de la matière	42
IV-2-3. Méthode de calcul	42
IV-2-4. Résultats	45
<b><u>Chapitre 5: Détermination du profil de Température dans un plasma thermique</u></b>	48
V-1. Introduction	49
V-2. Mécanisme de transfert d'énergie aux particules	50
V-3. Equations de conservation	51
V-3-1 Equations de conservation de la masse	51
V-3-2 Equations de conservation de la quantité de mouvement	52
V-3-2 Equations de conservation de l'énergie	52
V-4. Hypothèse de base	54
V-5. Principe de la méthode de Runge Kutta	54
<b><u>Conclusion</u></b>	57

# *Introduction*

Durant la dernière décennie les applications industrielles des plasmas froids se sont considérablement diversifiées, et cette diversité est due à la variété des configurations géométriques, des paramètres physiques (densité, température, fréquence et intensité des potentiels électriques appliqués) et de la nature du gaz ambiant (inerte ou réactif) ou des parois solides constituant les électrodes ou se trouvant en contact avec le plasma.

Ces plasmas sont essentiellement présents ou utilisés dans les appareils de coupure électrique (interrupteur à plasma en électronique de puissance), dans le traitement métallurgique, (soudage, découpage de matériaux), la destruction des déchets et la réduction des polluants, la production des nanotubes de carbone par plasma thermique, la reproduction de film de diamant, éclairage. Une autre application des plasmas thermique est la projection thermique et le traitement et le revêtement des surfaces.

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 projection thermique par plasma est un procédé de traitement de surface employé dans de nombreux secteurs industriels (aérospatiale, aéronautique, automobile, minier, biomédical,) cette technique a remplacé toutes les méthodes traditionnelles de revêtement de surface, elle produit des dépôts de haute valeur ajoutée. Elle est flexible et permet de déposer une très large gamme de

# *Introduction*

matériaux (céramiques, métaux, polymères, composites) sur des substrats de natures diverses et de tailles très différentes qui vont du millimètre à quelques mètres.

Afin de contrôler ces procédures et améliorer le rendement des techniques plasmas, en a intérêt de connaître certaines propriétés telles que les phénomènes de transport et la distribution de l'énergie thermique dans les plasmas. Cette distribution de l'énergie thermique permet aussi d'étudier le transfert thermique des plasmas d'arc avec les matériaux. Le plasma est un milieu réactif, afin de pouvoir étudier la cinétique chimique on a besoin à connaître les champs de température des plasmas d'arc. Enfin, grâce à la détermination du profil de température on peut valider les résultats théoriques du rayonnement et des conductivités thermique et électrique.

La connaissance de la composition chimique du plasma est indispensable pour la détermination de plusieurs propriétés telles que les propriétés thermodynamiques, les phénomènes de transport et le rayonnement émis par le plasma, elle permet la modélisation de l'interaction des plasmas avec les matériaux.

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres. Le premier c'est une description générale des plasmas. Nous avons parlé ensuite, dans un deuxième chapitre des plasmas thermiques produits dans les arcs électrique et les torches à plasma, dans cette même partie nous avons évoqué aussi la notion de l'équilibre thermodynamique complet qui n'est jamais réalisé dans un plasma de laboratoire puisqu'il existe des gradients de température et de densité, et la micro-réversibilité des processus radiatifs n'est pas vérifiée. Ces écarts à l'équilibre, nous conduit à l'idée d'introduire la notion d'équilibre thermodynamique local (ETL). Dans le quatrième chapitre nous avons donné une description détaillée des différentes techniques de la projection thermique, en mettant l'accent sur celles qui sont basés sur des procédés plasma.

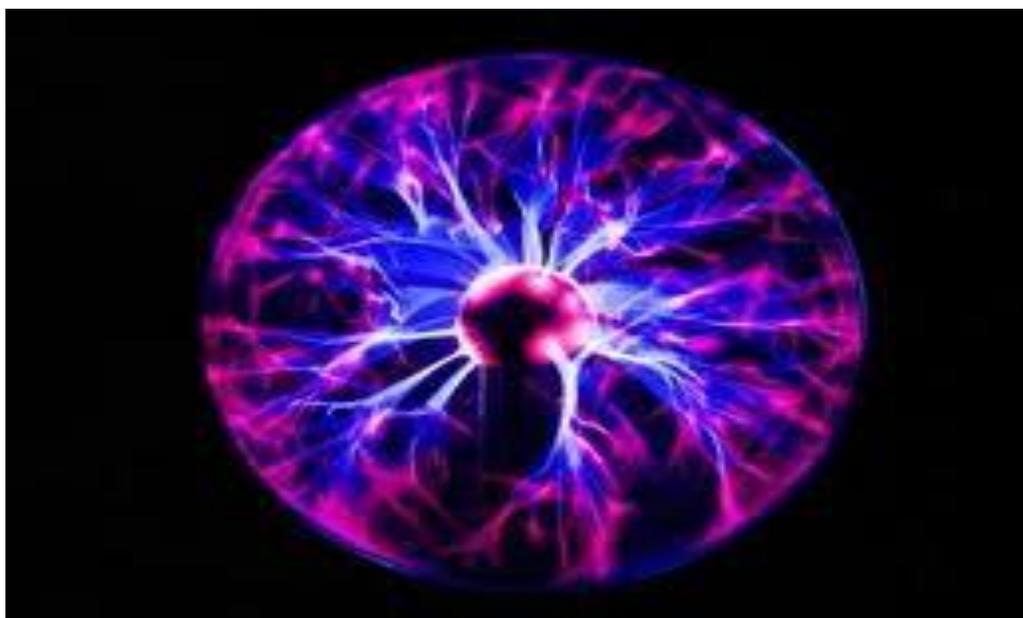
# *Introduction*

Le quatrième chapitre est consacré à la résolution du système d'équations données par les lois de l'équilibre à l'aide de la méthode de Newton-Raphson qui permet la détermination de la composition chimique d'un plasma formé de mélangés Ar-H<sub>2</sub> ce mélange qui utilisé.

La présentation d'un modèle mathématique utilisé dans le calcul du profil de température dans un plasma d'arc. A fait l'objet du dernier chapitre.

# *Chapitre I*

## *Généralités sur les Plasmas*



## I-1. Description générale

Outre les états solides, liquides et gazeux, on considère un 4<sup>em</sup> état de la matière, les plasmas. Ce milieu se compose plus de 99% de l'univers, c'est sous cette forme que la matière existait avant qu'elle se transformât en atome et molécules. Les plasmas sont répandus dans ionosphère, magnétosphère, vent et couronne solaires. Les atmosphères stellaires et les nébuleuses sont également constituées de gaz ionisés. *Sur terre* on ne rencontre pas les plasmas à l'état naturel, mais ils *peuvent être produits* de façon artificielle, en laboratoire (*décharge électrique, plasma de fusion*), en appliquant des champs électriques suffisamment puissants pour séparer le noyau de ses électrons dans les gaz ou en portant le gaz à des hautes températures [1].

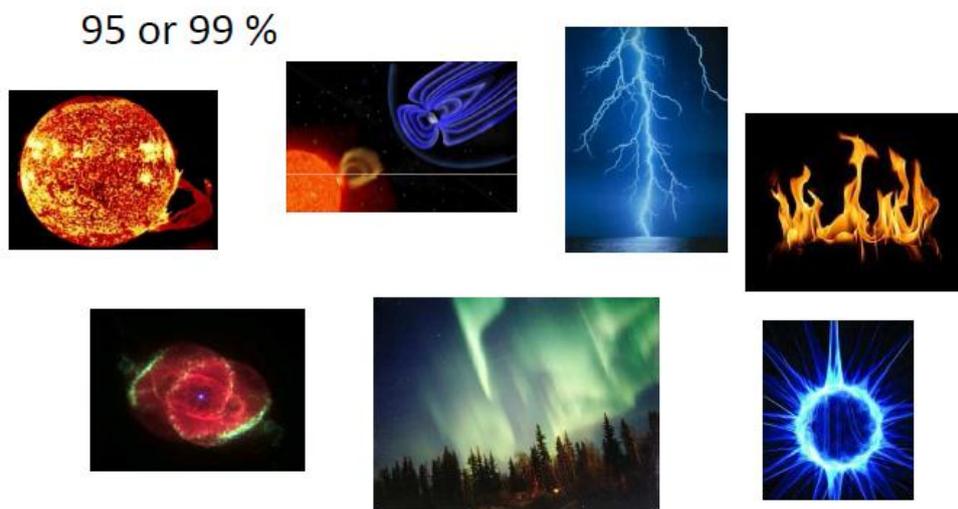


Figure 1,1 : Au début de l'Univers, tout était plasma

Le plasma est constitué d'électrons, d'ions et de neutres. De manière générale, on considère que les plasmas sont des gaz totalement ou partiellement ionisés, mais globalement neutres.

Le plasma se distingue d'un gaz classique, composé exclusivement de particules électriquement neutres, par la nature de l'interaction qui existe entre particules chargées. Dans un gaz classique, l'interaction entre particules est de courte portée. Au contraire, dans les plasmas l'interaction entre particules chargées est de longue portée, puisque la force coulombienne entre particules est en  $1/r^2$  et, de ce fait, chaque particule chargée peut interagir simultanément avec un très grand nombre d'autres particules chargées. Ce qui donne naissance aux effets collectifs.

Les propriétés spécifiques des plasmas résultent de la nature des interactions entre les particules. A cause de leur faible densité, les plasmas conservent cependant certaines propriétés des gaz (grande compressibilité, énergie interne et pression proportionnelles à la température absolue, etc.).

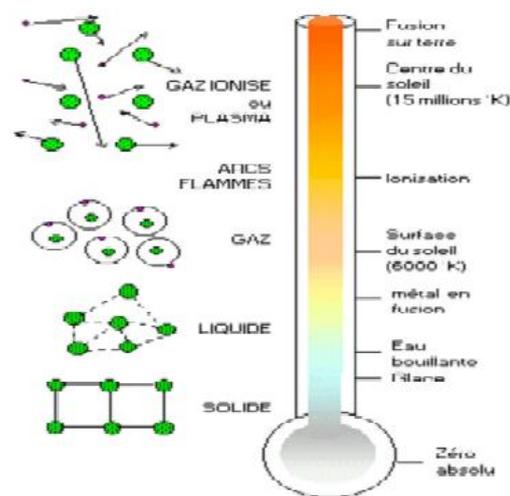


Figure 1, 2 : Etats de la matière en fonction de la température (chauffage)

L'énergie est apportée au gaz plasmagène sous forme d'énergie cinétique par l'intermédiaire des électrons (sous l'effet d'un champ électrique par exemple). Ces derniers la redistribuent aux espèces lourdes par des processus

collisionnels qui engendrent des espèces excitées. En se dés excitant (retour sur leur état fondamental), elles émettent des photons en parti responsable de la luminosité du plasma. La production d'espèces chimiques excitées est donc la particularité de l'état plasma contrairement aux autres états : solide, liquide et gazeux. Cette propriété laisse pressentir de nombreuses applications des plasmas non seulement comme source de chaleur, mais également comme source chimiquement réactive.

## I-2. Grandeurs caractéristiques :

On caractérise les plasmas à partir de leur degré d'ionisation, leur densité et leur température électronique. Cette première approche permet de constater que la physique des plasmas couvre un domaine de densité électronique allant de  $10^6 \text{ m}^{-3}$  (espace interstellaire) à  $10^{30} \text{ m}^{-3}$  (plasmas dans les métaux, étoiles) pour des températures comprises entre  $10^2 \text{ K}$  (espace interstellaire) et  $10^8 \text{ K}$  (intérieur des étoiles, plasmas de fusion).

Le degré d'ionisation d'un gaz est défini par rapport :

$$\alpha = \frac{n}{n + n_0} \quad (\text{I-1})$$

Lorsque  $n$  est la densité des particules (ions, électrons) car le plasma est macroscopiquement neutre alors on a

$$n_e = n_i = n \quad (\text{I-2})$$

On peut classer le plasma en deux grandes familles selon le degré d'ionisation [2] :

- Un plasma faiblement ionisés si  $\alpha < 10^{-4}$
- Un plasma fortement ionisés si  $\alpha > 10^{-4}$

Pour étudier les interactions entre particules dans un plasma, on peut introduire les longueurs fondamentales suivantes :  $r_0$ , longueur de Landau  $\lambda_D$ , longueur d'écran de Debye ;  $d_e$  distance moyenne entre électrons. Ces trois longueurs peuvent s'exprimer en fonction de la densité  $n_e$  et de la température  $T$  des électrons.

### I-2-1. Longueur de Landau

C'est une longueur critique d'interaction binaire, elle représente la distance minimum entre deux particules de mêmes charges (électron par exemple). C'est-à-dire la distance pour laquelle l'énergie potentielle d'interaction binaire soit du même ordre de grandeur que l'énergie cinétique d'agitation thermique. Ainsi on peut écrire :

$$k_B T = \frac{q_e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0} \quad (\text{I-3})$$

D'où 
$$r_0 = \frac{q_e^2}{4\pi\epsilon_0 k_B T} \quad (\text{I-4})$$

La longueur de Landau intervient dans l'analyse des phénomènes de collisions et dans celle des corrélations de position dans un plasma.

### I-2-2. Longueur de Debye

Les interactions collectives jouent en général un rôle plus important que les interactions binaires dans la dynamique des particules chargées d'un plasma. La longueur de Debye apparait comme la distance à partir de laquelle les interactions sont négligeables [3], longueur de Debye électronique est donnée par :

$$\lambda_D = \frac{\epsilon_0 k_B T}{n_e q_e^2} \quad (\text{I-5})$$

La longueur de Debye représente la distance d'écrantage du potentiel de Debye qui remplace le potentiel coulombien :

$$\phi(r) = \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r} e^{-\frac{r}{\lambda_D}} \quad (\text{I-6})$$

### I-3. Classification des plasmas:

Un plasma du fait qu'il contient des espèces ionisées, contient aussi des électrons libres, qui ont une masse 2000 fois plus faible que les ions (le rapport  $(\frac{m_H}{m_e} = 1836)$ ), ils ont moins d'inertie et sont plus réactifs il est donc plus facile de donner de l'énergie aux électrons qu'aux espèces plus lourdes, les ions. On va alors scinder les plasmas en deux catégories :

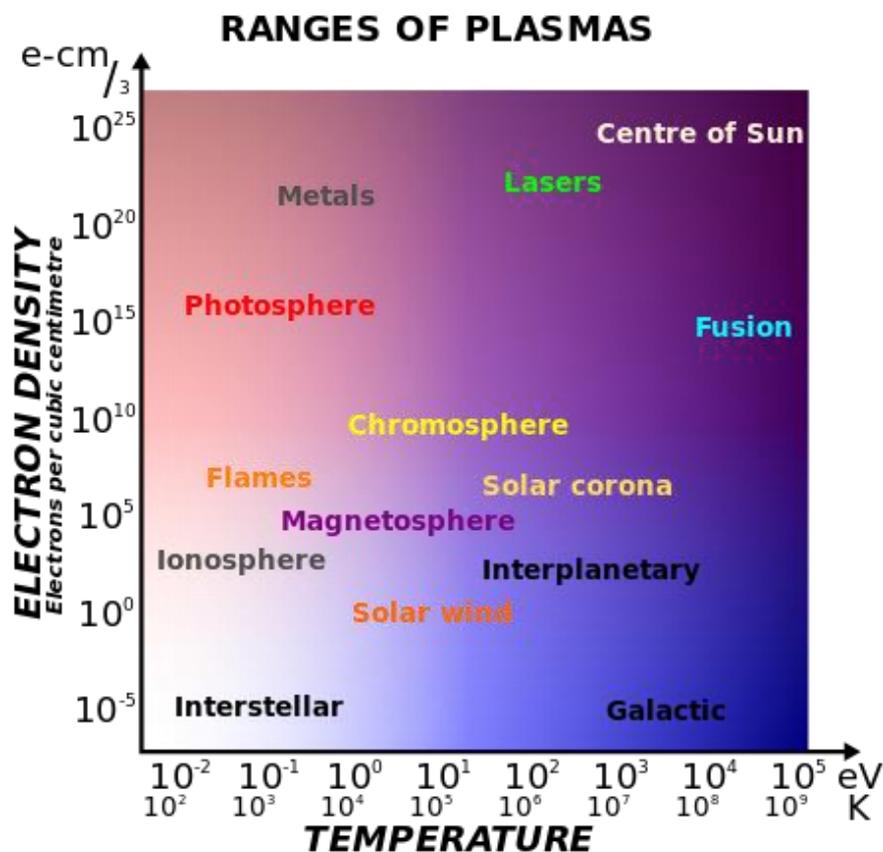


Figure 1, 3 : classification des plasmas

### **I-3-1. Plasma froid hors équilibre**

Lors d'une décharge électrique, la température des électrons peut rester très supérieure à celle des particules lourdes. En effet, à cause de leur mobilité les électrons sont très accélérés dans le champ électrique, leur température monte rapidement. Ces électrons chauds ne cèdent qu'une faible partie de leur énergie cinétique aux particules lourdes, sous l'effet des collisions qui sont rares. Et le milieu reste alors dans un état hors d'équilibre. Ces plasmas sont appelés plasmas réactifs[4].

### **I-3-2. Plasma thermique**

Les plasmas thermiques sont aussi des plasmas partiellement ionisés mais ils sont en général en équilibre thermodynamique local. Toutes les espèces constituant ces plasmas sont caractérisées par une température unique, autrement dit l'énergie cinétique est bien répartie entre toutes ces particules. L'état d'équilibre thermodynamique est vérifié lorsque le nombre de collisions entre les électrons et les particules lourdes est assez important et aussi lorsque chaque processus qui se produit dans le plasma est équilibré par son processus inverse [5].

Ces plasmas sont produits dans les arcs électriques ou dans des étincelles et des flammes, ils se trouvent dans un état très proche de l'équilibre thermodynamique local, la valeur dans les régions les plus chaudes peut atteindre 30000K, la densité électronique peut dépasser  $10^{16} \text{cm}^{-3}$ .

### **I-3-3. Les plasmas chauds**

Les plasmas chauds, c'est le plasma produit lors d'une fusion thermonucléaire, il est formé d'atome complètement ionisé leur température peut être supérieure à  $10^6 \text{K}$ , ils peuvent être en équilibre thermodynamique. Fusion thermonucléaire permet de produire de l'énergie thermique ou

électrique à partir de l'énergie émise lors de la fusion entre deux noyaux légers [6].

#### **I-4. Génération et maintien des plasmas**

On peut produire Les plasmas, dans le laboratoire par différent moyen [7] :

##### **I-4-1. Les décharges électriques**

On sait que les gaz sont généralement des bons isolants néanmoins, sous certaines conditions, il est possible de les faire traverser par un courant de particules chargées, on dit alors que le gaz est le siège d'une décharge. C'est la présence des particules chargées (électrons ou ions positif) qui transforme le gaz en plasma qui est un milieu conducteur et assure la conduction de l'électricité.

##### **I-4-2. Le chauffage**

Tout procédé de production de plasma nécessite un apport conséquent d'énergie pour induire une ionisation significative. Lorsqu'on porte un gaz à une température suffisamment élevée (de l'ordre de  $10^4$  K), l'énergie moyenne  $\frac{3}{2} K_B T$  de translation de ses molécules devient du même ordre que leur énergie d'ionisation  $E_i$ . Dans ces conditions, lorsque deux molécules entrent en collision, il peut y avoir ionisation de l'une d'entre elles. Si le gaz est en équilibre thermodynamique, l'ionisation par collisions est équilibrée par des processus de recombinaison entre électrons et ions et il en résulte que les variables  $n_e$ ,  $n_i$ ,  $n_0$  et T (température d'équilibre) ne sont pas indépendants. L'ionisation est déterminée par la pression et la température ; on dit alors que le gaz est en état d'équilibre d'ionisation thermique.

### **I-4-3. L'absorption de rayonnement :**

Un autre procédé qui permet d'ioniser les atomes et produire un plasma peut être l'absorption de rayonnement. Un exemple de plasma créé de cette façon à basse température est celui de l'ionosphère de la Terre ou des planètes qui ont une atmosphère, le rayonnement ultra-violet solaire est absorbé par les hautes couches de l'atmosphère et ionise les atomes et molécules qui la constituent. Le plasma peut être produit par ablation laser.

### **I-5. Les applications du plasma**

Les propriétés uniques du plasma donnent lieu à un large éventail d'applications potentielles et réelles. On peut regrouper les applications du plasma en trois catégories [8]

#### Le plasma comme outils de divers traitements :

- 1- Traitement de surfaces : Nettoyage de surfaces, activation de surface,
- 2- Synthèse de matériaux.
- 3- Dépôt de matériaux : PVD, PECVD, torche plasma.
- 4- Source de chaleur : Découpage, Soudage, Incinération.

#### Le plasma comme source de rayonnement :

- 1- Source de lumière.
- 2- Affichage à écran plat.
- 3- Source de rayon X.
- 4- Lasers.

#### Le plasma comme source d'énergie :

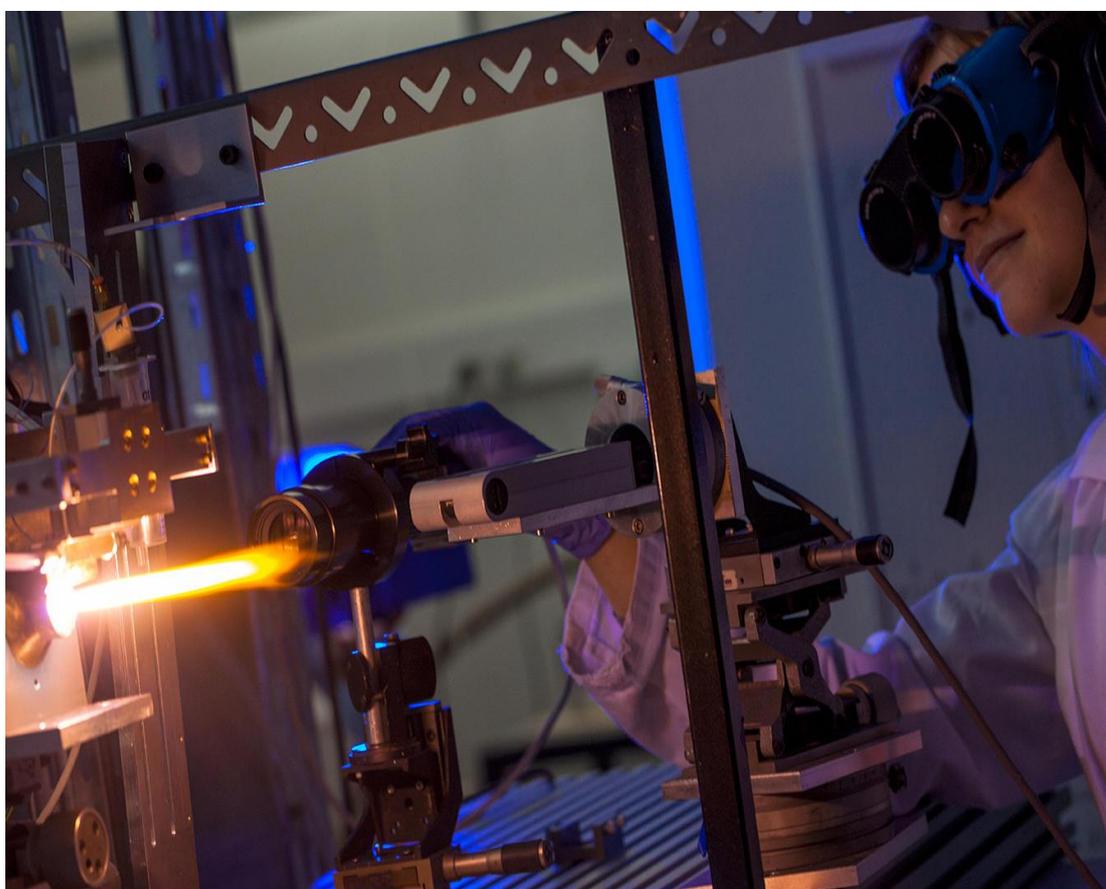
- 1- Energie de fusion.
- 2- Générateurs MHD.

Environnement :

- 3- Traitement des effluents polluants gazeux ou liquides,
- 4- Vitrification et traitement de déchets (amiante, REFIOM...),
- 5- Traitement de l'eau,
- 6- Destruction des bactéries et neutralisation des odeurs.

# *Chapitre II*

## *Les plasmas thermiques*



## II-1. Introduction

Les plasmas thermiques sont des milieux gazeux partiellement ionisés, dans les quels toutes les particules (molécules, atomes, ions, électrons) ont à peu près la même énergie cinétique moyenne. Leur température peut atteindre 30000 K sous des pressions de l'ordre de l'atmosphère, l'équilibre thermodynamique réalisé dans ces milieux est assurée par les collisions élastiques entre les particules lourdes et les électrons dont la densité peut dépasser  $10^{16} \text{cm}^3$ .

L'état de ces plasmas est très proche de l'équilibre thermodynamique local (ETL) pour le quel les lois de l'équilibre statistique sont valables, à l'exception des lois sur le rayonnement. Dans des cas pratiques, le plasma peut présenter des écarts à l'équilibre (plasma à deux températures par exemple)[9]

On distingue deux types de plasma thermique sont :

- Les plasmas d'arc (avec électrodes),
- Les plasmas inductifs (sans électrode).

## II-2. Les plasmas d'arc

L'arc électrique peut-être défini comme une décharge électrique lumineuse à fort courant traversant un gaz entre deux conducteurs présentant une différence de potentiel suffisante par rapport à l'énergie d'ionisation des gaz, La décharge d'arc électrique est accompagnée d'une élévation très importante (quelques 10000 K) due à l'apport énergétique par effet Joule. Cet échauffement provoque l'ionisation thermique du gaz qui devient conducteur, et permet de maintenir de façon stationnaire un courant de forte intensité pour une faible différence de potentiel (d.d.p.) [9].

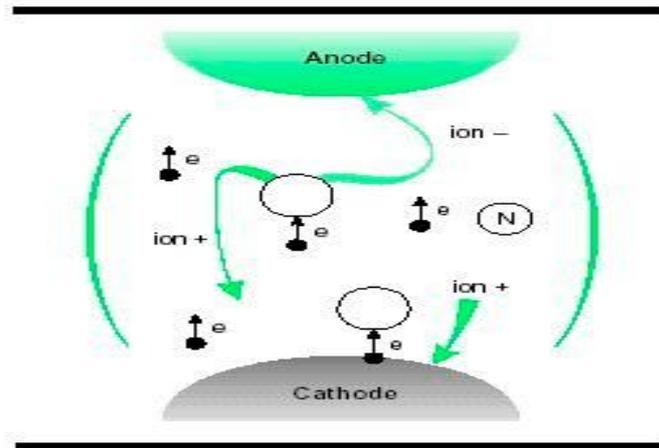


Figure 2, 1 : Arc électrique

L'arc électrique est une décharge électrique caractérisée par[10]:

- Un courant fort, dont les particules chargées sont produites de façon prédominante par de processus thermiques.
- Une chute de tension cathodique à cause de la très forte émission d'électrons.
- La différence de potentiel entre électrodes est nettement moins élevée que pour les autres types de décharges : quelques dizaines de volts en générale.

### II-2-1. Historique de l'arc

En 1774 un savant 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 petit cônes de charbon placés aux extrémités de deux conducteurs métalliques, en approchant les charbon très près l'un de l'autre, il parvient à créer cette étincelle

extraordinairement brillantes et a 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.

### **II-2-2. Amorçage de l'arc électrique**

Pour assurer l'amorçage d'un arc électrique, il faut une tension suffisante et une intensité suffisante, c'est-à-dire un couple UI suffisant. De plus, tout phénomène capable de favoriser l'ionisation de l'air de la colonne gazeuse favorise l'amorçage [11]. On peut distinguer trois grandes méthodes pour produire l'amorçage d'un arc électrique entre deux contacts dans le vide ou dans la colonne gazeuse située entre eux : transition continue de la décharge luminescente anormale à la décharge d'arc, par surtension et par contact.

#### **a. Transition continue :**

C'est un passage continu d'une décharge luminescente à la décharge d'arc. Il faut que le système soit au départ dans un état de décharge luminescente. La cathode est recouverte par le plasma de décharge. L'apparition de l'arc est conditionnée par celle des phénomènes thermiques. Si on augmente l'intensité, la tension d'extraction des électrons augmente et la température s'élève localement, et l'émission s'effectue ici à partir d'une région très localisée, et souvent très mobile, appelée spot cathodique.

### **b. Séparation de contact**

Il est possible de déclencher un arc électrique par ouverture d'un contact traversé par un courant suffisant. A cause des irrégularités de la surface, lors de l'ouverture du contact le courant passe par un contact très fin entraînant une densité de courant très élevée. L'énergie dissipée par effet Joule conduit à une augmentation considérable de la température locale. Le point d'ébullition du métal est alors atteint et il se forme un « pont fondu » métallique entre les deux contacts. Lors de la rupture de ce pont, qui prend la forme d'une explosion, les conditions de formation d'un arc électrique sont réunies. C'est le cas des disjoncteurs

### **c. Surtension :**

Lorsque la tension appliquée entre deux conducteurs atteint ou dépasse la tension disruptive, la multiplication des électrons se fait par l'effet d'avalanche, et une décharge s'amorce entre les deux électrodes. Un arc électrique se déclenche alors si la source ne limite pas le courant. C'est le cas de la foudre.

### **II-2-3 Classification de l'arc**

On distingue dans les arcs :

- 1- Les arcs thermoïnique où l'émission cathodique est d'origine thermique ; lorsque l'électrode est chauffée, les électrons acquièrent suffisamment d'énergie pour s'échapper du puits de potentiel que représente cette électrode.
- 2- Les arcs à émission du champ où les électrons sont extraits de la cathode sous l'effet d'un champ très élevé, qui peut être dû, 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 chargerait d'ions et serait ainsi portée à un potentiel positif très élevé, ce genre d'émission électronique doit prévaloir dans le cas des arcs dits métalliques par des moyens extérieurs de chauffage.

### **II-3. La torche plasma**

Les plasmas sont produits par des générateurs à arc appelés aussi torches à plasma ou chalumeaux à plasma. Ces générateurs sont constitués de deux électrodes alimentées en courant continu ou courant alternatif, refroidies à l'eau et qui donnent naissance à un arc [12]. Cet arc doit être stabilisé par un champ magnétique, par rotation des électrodes ou par effet aérodynamique, afin d'obtenir un fonctionnement correct et d'éviter l'usure des électrodes. On introduit le gaz plasmagène (de l'argon ou un gaz diatomique tel que l'azote ou l'hydrogène, ou un mélange de ces gaz) entre les deux électrodes. La forme de l'anode confère au gaz une grande vitesse. Le rendement des générateurs à arc varie entre 40% et 70%. Leur puissance maximale s'élève à 10 MW. Il existe également des générateurs de plasma à haute fréquence (10kHz à 10MHz), mais leur coût est très élevé. Leur rendement ne dépasse pas 25% et leur puissance maximale n'est que de 1MW. La température qu'ils fournissent est moins élevée.

La conception des torches doit avoir comme objectif d'obtenir une durée de vie des électrodes la plus longue possible. Pour un fonctionnement normal on compte un affutage de la cathode toutes les 8 heures et un changement de l'anode toutes les 120 heures.

On illustre deux catégories de torches à plasma utilisées dans les applications industrielles [13], celle-ci correspond à deux configurations de bases :

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

Ces deux types requièrent des points d'accrochage positif et négatif de l'arc en vue de créer de la colonne d'arc.

### II-3-1. Les plasmas à arc soufflé ou à arc non transféré (PTA)

Comportent deux électrodes (l'anode et la cathode). L'anode est percée d'un trou central servant de tuyère d'éjection de la colonne de plasma. Le gaz est injecté autour de la cathode, traverse l'arc électrique et s'échappe par la tuyère anodique. Ce générateur à arc interne permet d'obtenir une colonne plasma à une température supérieure à 10000°K

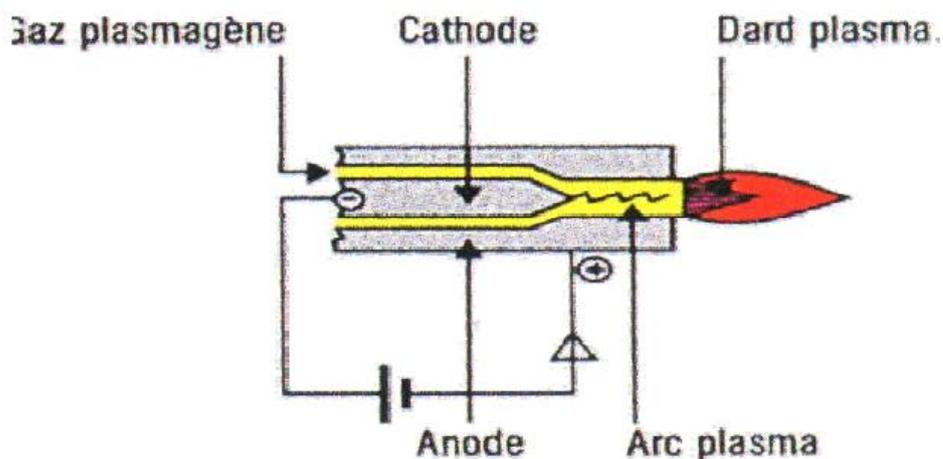


Figure 2, 2 Torche plasma à arc soufflé

### II-3-2 Les plasmas à arc transféré

Elles ne comportent qu'une seule électrode (froide ou chaude). L'arc jaillit entre l'électrode interne et un corps conducteur (généralement le bain) en contact avec une contre électrode. La résistivité électrique du bain est mise à profit pour y créer une émission complémentaire d'énergie par effet Joule.

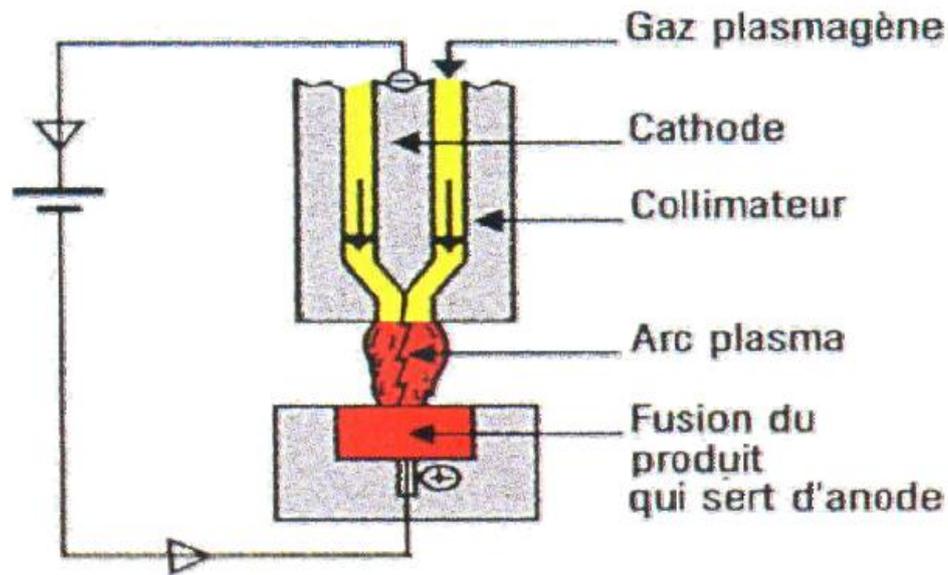


Figure 2, 3 : Torche plasma à arc transféré

#### II-4. Equilibre thermodynamique complet

Le plasma peut atteindre un état d'équilibre thermodynamique complet en absence des gradients de température et de pression. On peut alors parler d'une température unique, le théorème de l'équipartition de l'énergie cinétique est vérifiée : les différentes espèces de particules du milieu ont alors la même énergie cinétique moyenne. Il n'existe donc aucun échange d'énergie avec le milieu extérieur[14]. Il s'ajoute à cette condition un équilibre entre les phénomènes de création et de disparition comme l'ionisation et la recombinaison, l'excitation et la désexcitation ou l'émission et l'absorption de photon. Autrement dit chaque processus est contrebalancé par son processus inverse. Dans ces conditions le plasma doit suivre certaines lois d'équilibre.

### II-4-1. Les lois d'équilibre

Nous pouvons compter cinq lois importantes dont quatre sont relatives au processus collisionnel : la loi de Maxwell, la loi de Boltzmann, la loi de Saha et la loi de Guldberg- Waage. La loi de Planck donne la distribution spectrale à l'équilibre.

- **Loi de Maxwell**

A l'équilibre la loi de distribution des vitesses suit la loi de Maxwell, qui permet de déterminer le nombre de particules  $dN$  d'une espèce donnée dont la vitesse est comprise entre  $v$  et  $v + dv$  (pour une température fixée).

$$\frac{d^3N}{N} = \left( \frac{m}{2\pi K_B T} \right)^{3/2} \exp \left[ -\frac{mv^2}{2\pi K_B T} \right] 4\pi v^2 dv \quad (\text{II.1})$$

$m$  : étant la masse de la particule et  $k$  : la constante de Boltzmann.

- **Loi de Boltzmann**

Dans un système composé de plusieurs particules en équilibre thermodynamique à une température  $T$ , la distribution canonique de l'équation de Boltzmann permet de donner les populations des différents niveaux d'énergies.

$$\frac{N_i}{N} = \frac{g_i}{Q^{\text{int}}} \exp \left[ -\frac{E_i}{k_B T} \right] \quad (\text{II.2})$$

$N_i$ ,  $g_i$  et  $E_i$  sont respectivement la densité de population, le poids statistique et l'énergie associés au niveau  $i$ .

$N$  et  $Q^{\text{int}}$  sont respectivement la densité totale et la fonction de partition interne de l'espèce considérée. Cette dernière est définie par la relation :

$$Q^{\text{int}} = \sum_i g_i \exp \left[ -\frac{E_i}{k_B T} \right] \quad (\text{II.3})$$

• **Loi de Saha :**

Elle régit l'équilibre d'ionisation dans un plasma, elle peut donc donner le degré d'ionisation du milieu :

$$\frac{N_e N_i}{N_0} = 2 \frac{Q_i^{\text{int}}}{Q_0^{\text{int}}} \left( \frac{2\pi m_e K_B T}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left( -\frac{E_i - \Delta E}{K_B T} \right) \quad (\text{II-4})$$

$N_e$ ,  $N_i$  et  $N_0$  : sont respectivement les densités de l'électron, de l'ion et de l'atome neutre.

$Q_0^{\text{int}}$ ,  $Q_i^{\text{int}}$  : sont les fonctions de partition de l'ion et de l'atome, celle de l'électron est égale à 2.

$h$ : est la constante de Planck

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

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

$$\Delta E = \frac{(Z + 1)e^2}{4\pi\epsilon_0\lambda_D} \quad (\text{II.5})$$

• **Loi de Guldberg - Waage**

La loi de Guldberg - Waage lie la densité d'une espèce moléculaires AB à celles des espèces atomiques A ET B. Elle exprime également l'équilibre de dissociation des espèces moléculaires. C'est une autre forme de la loi de Saha.

$$\frac{N_A N_B}{N_{AB}} = \frac{Q_A^{\text{int}} Q_B^{\text{int}}}{Q_{AB}^{\text{int}}} \left( \frac{m_A m_B}{m_{AB}} \right)^{3/2} \left( \frac{2\pi K_B T}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left( -\frac{E_{AB} - \Delta E_{AB}}{K_B T} \right) \quad (\text{II-6})$$

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

$m_A$ ,  $m_B$  et  $m_{AB}$  : leurs masses respectivement.

$E_{AB}$  est l'énergie de dissociation et  $\Delta E_{AB}$  l'abaissement de potentiel de cette énergie de dissociation.

- **Loi de Planck**

Lorsque le plasma est en équilibre thermodynamique pour une température  $T$ , chaque processus élémentaire est équilibré par son processus inverse. Cette condition exige que le rayonnement émis par le plasma soit totalement absorbé. Autrement dit, le plasma doit se comporter comme un corps noir, la distribution spectrale du rayonnement est alors donnée par loi Planck :

$$B_{\lambda}^0(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda K_B T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (\text{II.7})$$

$B_{\lambda}^0$  Décrit la luminance spectrale d'un corps noir à la température  $T$ ;

$c$  : vitesse de la lumière dans le vide ;

$h$  : constante de Planck

#### **II-4-2. Ecart à l'équilibre thermodynamique complet –Equilibre thermodynamique local**

Dans un plasma thermique ou un plasma d'arc l'équilibre thermodynamique complet est loin d'être réalisé, à cause de la présence des gradients de température dans certaines régions : La température sur l'axe de décharge est plus élevée d'autre part le rayonnement émis par le plasma n'est pas complètement réabsorbé. Il ne peut donc y avoir micro réversibilité des processus radiatif .Par conséquent la distribution spectrale de rayonnement ne suit plus la loi de Planck [15], celle-ci est remplacée par la loi de Kirchhoff

Pourtant, si les densités électroniques sont supérieures à  $10^{22} m^{-3}$  pour des températures au-dessus de  $9000 K$ , les travaux de Griem [16, 17] nous indiquent que les phénomènes collisionnels électroniques sont prépondérants devant les phénomènes radiatifs, qu'il y a microréversibilité des processus collisionnels et que certaines lois sont toujours valables :

- la loi de Maxwell (fonction de distribution des vitesses).
- la loi de Saha (distribution des atomes et degré d'ionisation).
- la loi de Guldberg-Waage (dissociation).

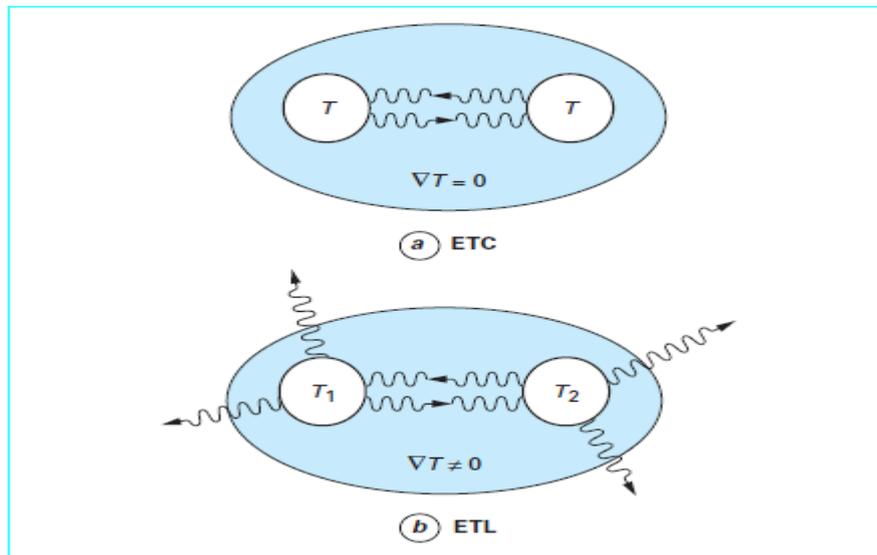


Figure 2, 4 : Différence entre ETL et ETC

Il s'ensuit que les critères d'ETL seront liés à la densité électronique du plasma. Pour qu'un plasma soit à l'ETL, sa densité électronique doit être suffisamment élevée pour que les mécanismes d'excitation/déexcitation par collision électronique soient beaucoup plus nombreux que ceux des déexcitations spontanées.

# *Chapitre III*

## *La projection thermique*



### **III-1. Introduction**

La projection thermique fait partie des techniques de traitement de surface par voie sèche. Cette technique permet de réaliser des revêtements épais (généralement de quelques dizaines de micromètres à quelques centaines) de natures très variées sur des substrats (pièce à revêtir).

Tous les systèmes de projection thermique possèdent un gaz vecteur servant à accélérer et transporter jusqu'au substrat de fines particules (typiquement 5 à 100 micromètres) qui peuvent être à l'état liquide, pâteux voir solide. Ce gaz vecteur peut être aussi source enthalpique, permettant de chauffer ces particules jusqu'au point de fusion. D'autres procédés utilisent un arc électrique pour fondre le matériau [19].

Les particules ainsi projetées sur le substrat s'écrasent selon leur vitesse, état physique, température etc... L'accumulation des particules sur le substrat permet de réaliser le revêtement.

Les applications de la projection thermique sont très variées :

- ✓ Revêtement contre l'usure
- ✓ Protection contre la corrosion
- ✓ Résistance à l'usure et à la chaleur
- ✓ Revêtement à propriétés électriques
- ✓ Réparation de surfaces endommagées

### **III-2. Historique de la projection thermique**

L'apparition des revêtements par projection thermique date de 1909 avec l'invention de Schoop portant sur la projection de plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur, puis de plomb en poudre à travers une flamme. Les premières applications industrielles sont apparues en 1914 dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), dans celui de l'anticorrosion (dépôts d'aluminium), ou encore en décoration (dépôts de bronze) [20].

C'est après la Seconde Guerre mondiale que le domaine d'application de la projection thermique s'est élargi à l'industrie mécanique (apport de revêtement d'acier dans le cadre de rénovation de pièces usagées), puis à l'industrie aéronautique.

La recherche de propriétés de surface spécifiques sur les pièces en service, dont les conditions d'emploi sont de plus en plus sévères, a permis le développement de nouveaux procédés tels que : plasma, canon à détonation, HVOF « High Velocity Oxygen Fuel » . . .

### **III-3. Les procédés de la projection thermique**

La projection thermique a évolué en une grande famille de procédés selon la source de chaleur employée (une flamme, un arc électrique et un plasma) :

#### **III-3-1. La projection par flamme**

Dans ce type de projection thermique, une réaction chimique est utilisée comme source d'énergie. Les matériaux à projeter sont introduits soit sous forme de poudre (la température de fusion ne peut dépasser 0,7 à 0,8 fois la température de la flamme), soit sous forme de fil, de tige ou de cordon il est possible de fondre des matériaux dont le point de fusion est de 0,95 fois la température de flamme [21]. Les matériaux déposés par cette technique sont

usuellement des métaux, des alliages, des cermets ou des céramiques à basse température de fusion.

On distingue en général 3 techniques qui relèvent de ce type de projection :

- **Flamme poudre :**

Le matériau à projeter est introduit sous forme de poudre dans une flamme oxygène gaz combustible, les particules sont accélérées grâce au gaz porteur ou à une injection d'air [22]. Les dépôts réalisés présentent une faible adhérence (de 20 à 40 MPa) et une porosité élevée (10 à 20 %), ceci est essentiellement dû aux faibles vitesses d'impact des particules  $30 \text{ m s}^{-1}$ .

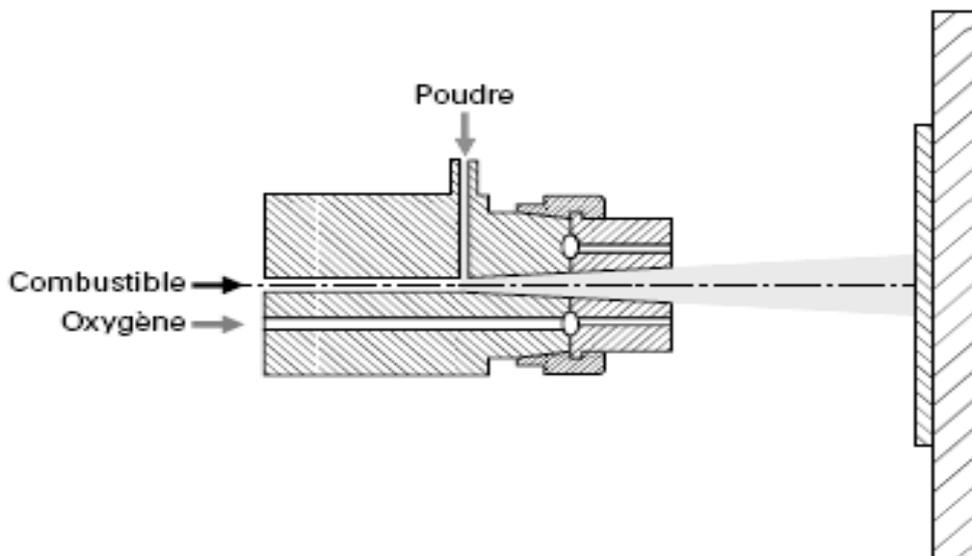


Figure3, 1 : Schéma de principe de la projection à la flamme poudre

- **Flamme fil :**

Le matériau est conditionné sous forme de fil ou de tige et entraîné dans la flamme est placé à l'arrière de la torche. Ce matériau est actionné par un moteur électrique. Une fois l'extrémité de la tige ou du fil fondue dans la flamme, un courant d'air comprimé l'atomise et projette les particules sur la surface du substrat à une vitesse pouvant atteindre 150 m/s. La température de fusion des matériaux peut atteindre 0,95 de la température de la flamme

( $T_{\text{fusion}} = 0,95 T_{\text{flamme}}$ ). L'épaisseur des dépôts varie de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres [22].

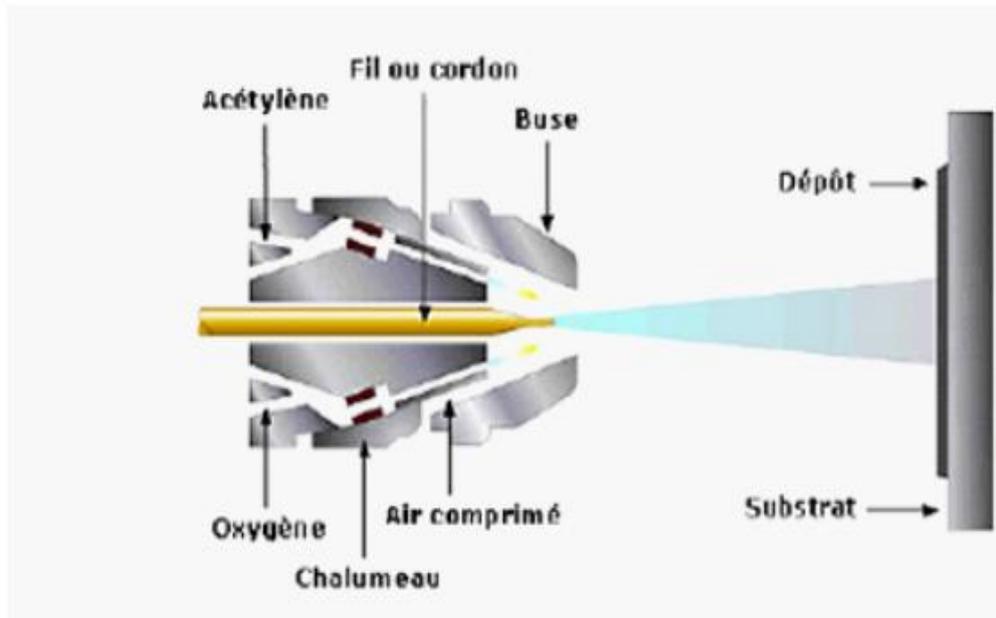


Figure 3, 2 : Principe de la projection à la flamme fil

- **Flamme hypersonique :**

Ce type de projection tire son nom de la vitesse de sortie des gaz .deux procédés présentent ce type de caractéristiques : la projection hypersonique à tire discontinue (canon détonation) et celle à tire continue(HVOF) :

- ✓ **Canon détonation :**

Dans ce procédé, le matériau est projeté grâce à l'énergie de détonation d'un mélange gazeux (oxygène-acétylène). Le mélange est injecté dans le canon en même temps que la poudre d'apport véhiculée par un gaz inerte. Le canon est constitué d'un long cylindre fermé à une de ses extrémités et refroidi à l'eau. L'onde de détonation, créée par une étincelle dans le mélange détonnant, chauffe et accélère les particules, injectées à mi-longueur du canon, jusqu'à la sortie du canon où elles sont éjectées à une vitesse élevée (jusqu'à

900-1300 m/s) vers la surface du substrat à traiter.[23] L'énergie cinétique élevée des particules à l'impact sur le substrat conduit à l'édification d'un revêtement dense et adhérent (porosité inférieure à 1% et adhérence supérieure à 80MPa).

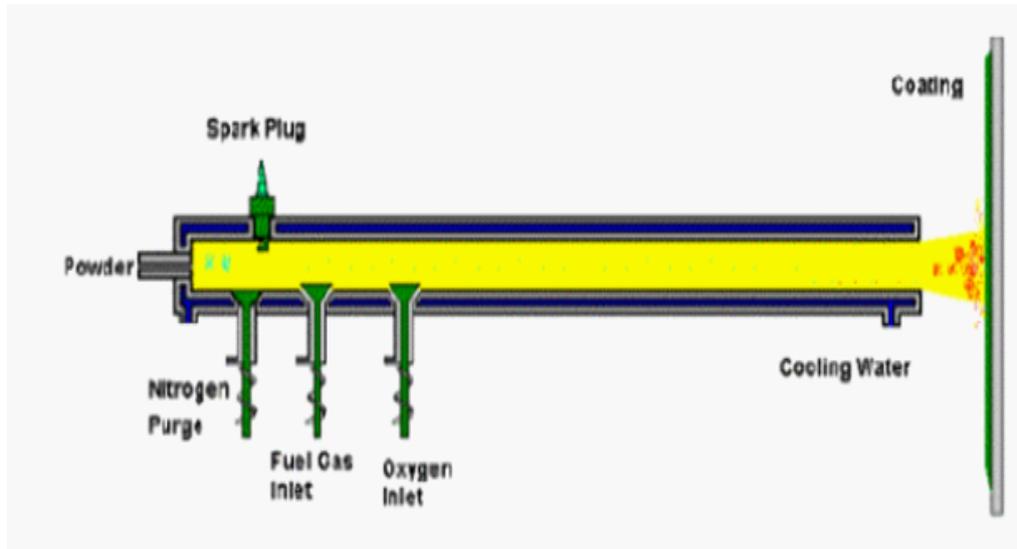


Figure 3, 3 : Principe de la projection canon détonation

✓ **HVOF (flamme oxyfuel à haut température) :**

Le principe est basé sur une réaction de combustion à haut pression ( $5.10^5$  à  $7.10^5$  Pa) dans une chambre à combustion. Les vitesses de flamme et de particules en sortie de tuyère sont très élevées (700 m/s) [24]. L'HVOF utilise la combustion de l'oxygène avec un carburant (le propane) avec une adhérence (70 MPa) et porosité (2%)

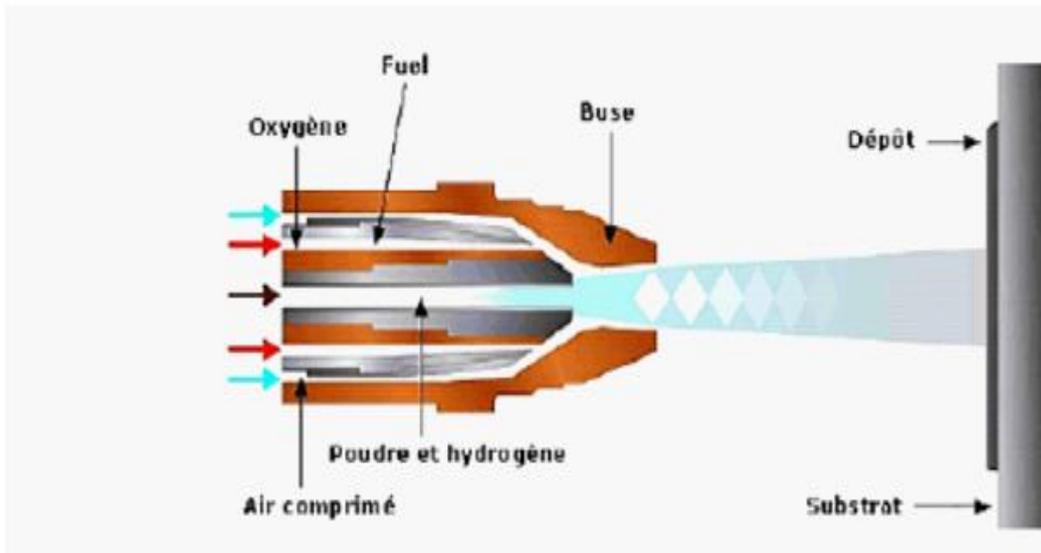


Figure 3, 4 : Principe de projection HVOF

### III-3-2. La projection par plasma d'arc :

#### ✓ Projection par arc électrique :

Ce procédé est besoin un arc électrique entre deux électrodes sous forme de fil lorsque on applique une tension de 25 à 40 V entre ces 2 fils pour des intensités de courant comprises entre 100 et 500 A et leur température dépasse 6000K, dans l'air, à pression atmosphérique. L'arc généré fait fondre l'extrémité des fils et la circulation d'un gaz comprimé (Un gaz d'atomisation) entre les deux fils permet de détacher la partie fondue sous forme de gouttelettes puis de les transporter jusqu'au substrat.

Ce procédé permet d'obtenir des dépôts épais de 0,5 à 3 mm avec une adhérence de 20 à 40 MPa.

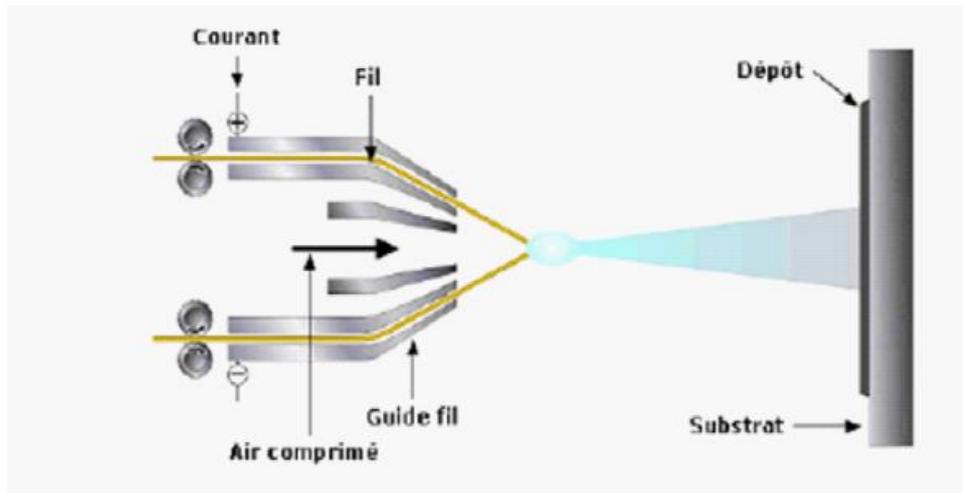


Figure 3, 5 : Principe de projection arc fil

### ✓ La projection par torche à plasma

Ce procédé est très utilisé dans l'industrie en particulier pour le dépôt de films céramique épais (de 0.05 à 1.5 mm). La porosité des dépôts est, en général, inférieure à 10 % selon la nature du matériau et les conditions de projection.

Dans ce procédé, la source de chaleur est un arc électrique alimenté en courant continu qui éclate entre une anode et une cathode, créant ainsi un plasma, généralement initié par une décharge haute tension (7000-8000 V) et haute fréquence (quelques MHz). Une partie du flux du gaz plasmagène est portée à haute température (au-delà de 12000 K, la majorité des gaz plasmagènes est conductrice électriquement) et est contractée dans la tuyère anode [26]. Les vitesses de particules injectées en sortie de tuyère sont élevées (250 m/s).

La projection plasma est bien adaptée pour la formation de dépôt grâce à la grande vitesse atteinte dans le plasma et le fait qu'il soit possible de fondre les matériaux les plus réfractaires.

Ce procédé peut se décomposer en 4 étapes:

- 1- génération du jet plasma au sein de la torche ;
- 2- injection de la poudre (les particules) dans le jet plasma.
- 3- traitement des particules dans l'écoulement plasma ;
- 4- construction du dépôt

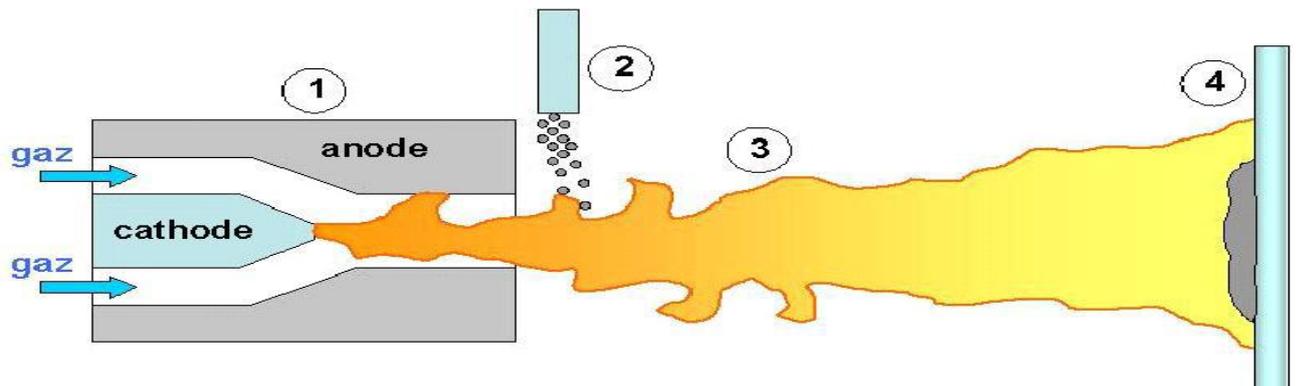


Figure 3, 6: Schéma de principe de la projection par torche à plasma

### III.4. Les étapes de projection par plasma :

#### III-4-1. Génération du jet plasma

La génération de plasma nécessite l'emploi de trois éléments fondamentaux :

- Une source de puissance (générateur à courant continu)
- Une décharge ionisant le gaz (générateur haute fréquence ou haute tension)
- Un couplage assurant le contact entre deux électrodes via le gaz plasma

##### a) Amorçage d'arc :

En courant continu consiste à créer une décharge électrique, de haute tension (5 à 10 kV) et de haute fréquence (quelques MHz), entre l'anode et la cathode d'une torche plasma, afin d'initier un arc en courant continu. Cet arc électrique éclate entre la pointe d'une cathode conique constituée de tungstène et la paroi d'une anode en cuivre. Pour éviter une détérioration rapide des tuyères, ces dernières sont refroidies par une circulation d'eau sous

pression (0,15 à 0,2 MPa). Cette circulation d'eau permet d'évacuer la quantité de chaleur importante dissipée par l'arc (jusqu'à 50% de la puissance dissipée) à la surface des électrodes et plus particulièrement de l'anode

(b) Jet plasma :

Dans une torche plasma à courant continu l'énergie électrique est convertie en énergie thermique, le gaz plasmagène circule entre les électrodes. Ce gaz est injecté en amont dans la chambre d'arc soit radialement soit le long de la cathode, soit en vortex. Une partie du gaz est fortement chauffée par effet de joule, elle est partiellement ionisée et forme un volume d'un plasma qu'est éjecté de la tuyère à grande vitesse (500 à 2000 m/s), suivant ses dimensions et les paramètres de fonctionnement, et à hautes températures (comprises entre 8000 et 13 000 K environ) appelé colonne d'arc. Le courant électrique circule dans cette colonne, entre la pointe de la cathode et un point de l'anode appelé pied d'arc [27].

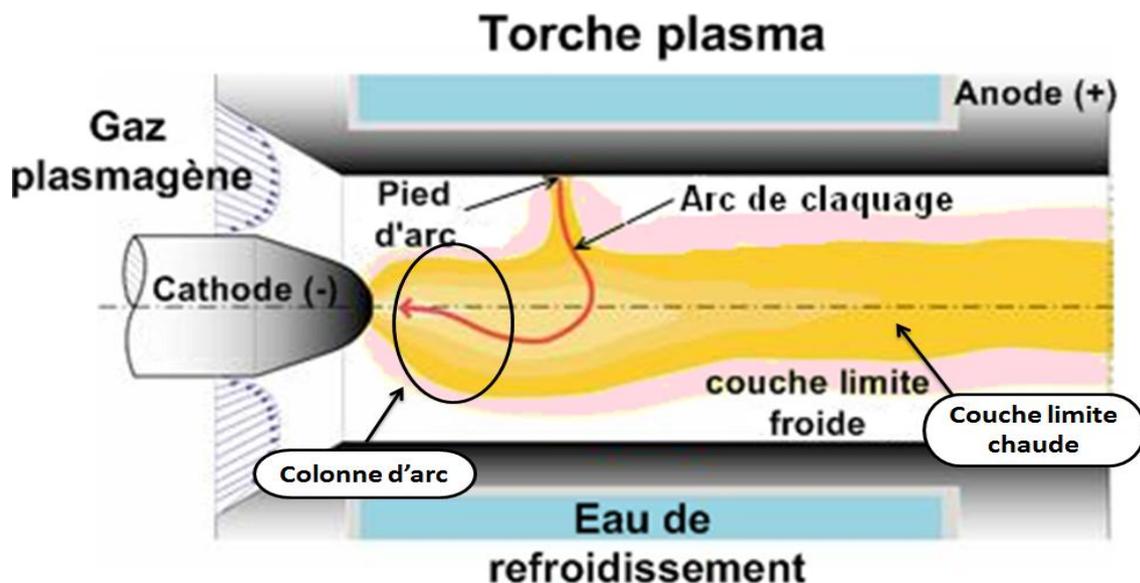


Figure 3, 7: Schéma de la dynamique de l'arc et de l'écoulement du jet dans une torche plasma à courant continu

Une couche limite chaude de température supérieure à 6000 K se développe autour de la colonne d'arc tandis qu'une partie du gaz plasmagène, s'écoule le long de l'anode. Une couche limite froide, gaine la colonne d'arc et assure sa stabilité.

### c) Le gaz Plasmagène

Le choix des débits et de la nature des gaz plasmagènes est déterminant pour une bonne fusion et accélération des particules en fonction de leur nature. Pour les poudres réfractaires utilisées, un plasma d'argon seul n'est pas suffisant pour les traiter thermiquement et il est nécessaire d'utiliser des mélanges contenant des gaz diatomiques tels que l'hydrogène afin d'avoir une fusion complète des particules.

L'argon, étant un gaz lourd, il sera la "source" d'énergie cinétique. L'hydrogène possède une excellente conductivité thermique permettant ainsi de bons transferts thermiques. Cette excellente conductivité thermique de  $H_2$  a également un rôle essentiel sur la matérialisation thermique de l'arc.

### d) Injection des gaz

Le mélange gazeux est injecté dans la torche au niveau de la cathode. Trois modes d'injection du gaz dans la chambre d'arc sont possibles [28]:

- 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 radiale: la bague d'injection est percée de trous orthogonaux à l'axe longitudinal de la cathode, la vitesse présente au début une composante radiale importante qui s'atténue ensuite, mais beaucoup de turbulences sont générées au voisinage de la pointe de la cathode;

- Injection en vortex: la bague d'injection est percée de trous dont l'axe présente un certain angle par rapport à l'axe longitudinal de la cathode, ce qui donne une composante de rotation à la vitesse du gaz plasmagène.

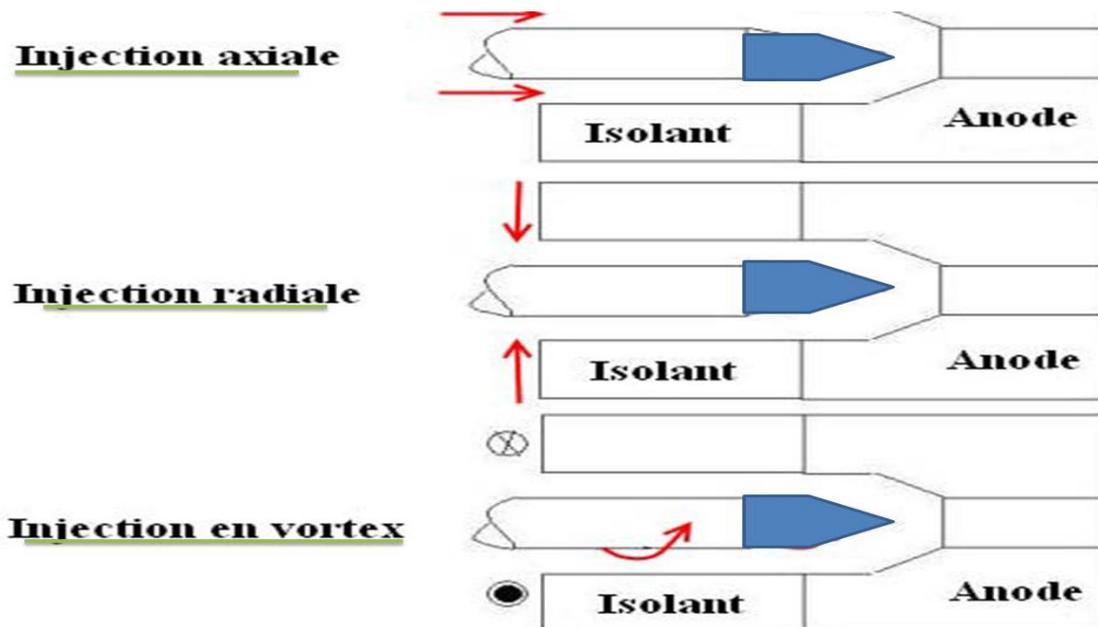


Figure 3, 8: Schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche de projection plasma

### III-4-2. Injection de la poudre dans le jet plasma.

Le matériau à projeter est injecté dans le jet de plasma par un injecteur situé en aval du pied d'arc, le transport de la poudre étant assuré par un gaz porteur. L'injecteur est le plus couramment perpendiculaire à l'axe de la torche ; il peut placer à l'intérieur ou à l'extérieur de l'anode. Son diamètre varie d'environ 1.6 à 2 mm. Le débit du gaz porteur doit être ajusté pour adapter la quantité de mouvement de la poudre à celle d'écoulement afin d'assurer sa pénétration dans le cœur plasma. Ce débit dépend des caractéristiques de la poudre (masse volumique, distribution granulométrique, forme et morphologie des

particules), de celles les propriétés thermo-physiques des gaz plasmagènes (viscosité, conductivités thermique et électrique, densité massique...) et de celles de l'injecteur (diamètre, position, angle avec l'axe de la torche).

La trajectoire moyenne des particules doit donc rester un maximum de temps dans la zone centrale du jet qui est la plus chaude et la plus rapide, pour que les particules soient mieux traitées [12].

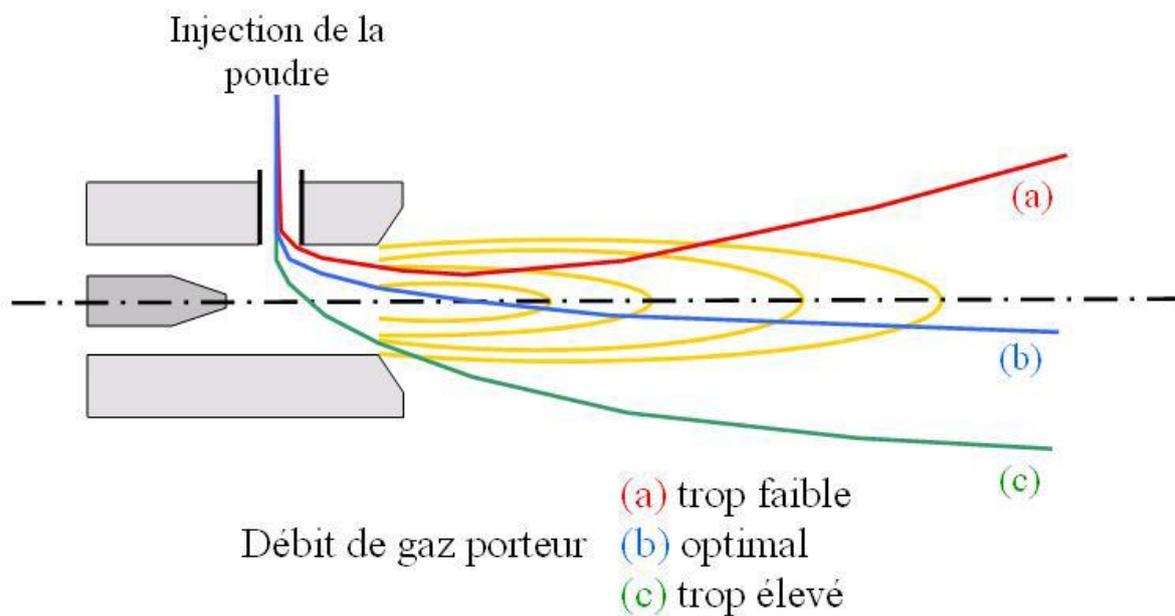


Figure3, 9: Influence du débit de gaz porteur sur la trajectoire moyenne des particules

### III-4-3. Traitement des particules dans le jet plasma

Le traitement des particules est conditionné par les transferts de quantité de mouvement, de chaleur et de masse entre le plasma et les particules. Ces transferts dépendent des champs de température et de vitesse de l'écoulement, de la nature du mélange de gaz ainsi que de l'état des couches limites cinématique et thermique qui se forment autour de la particule [29]

L'accélération et le chauffage des particules dépendent :

a)- de leur nature, de leur taille granulométrique et de leur forme ;

- b)- de leur trajectoire qui est influencée par le type d'injection de poudre, la position de l'injecteur, l'angle d'injection et débit de gaz porteur ;
- c)- de l'écoulement plasma qui dépend de la géométrie des électrodes, la nature et le débit des gaz plasmagènes et la puissance électrique.

Les petites particules sont plus facilement accélérées, elles ont tendance à moins pénétrer dans le plasma, mais elles sont chauffées plus facilement et plus rapidement. Les petites particules ont tendance à moins pénétrer dans le plasma, mais elles sont chauffées plus facilement et plus rapidement. Dès que leur température de surface approche de la température d'ébullition, elles commencent à s'évaporer très rapidement, surtout pour celles ayant une faible conductivité thermique.

Dans le cas de particules métalliques, ces vapeurs peuvent se recondenser dans le dépôt sous forme d'oxydes.

#### **III-4-4. Constriction du dépôt**

Une structure lamellaire obtenue par des écrasements et solidification successive de particules totalement ou partiellement fondues et projetées par le jet de plasma peut contenir les éléments suivants :

- des particules fondues et non fondues
- des pores,
- des oxydes, dans le cas de présence d'oxygène dans le matériau projeté ou dans l'environnement [30]

Le temps de traitement de la particule dans le jet de plasma est de l'ordre de la milliseconde. Le processus d'écrasement de la particule est très rapide, la durée entre l'impact et l'étalement d'une gouttelette est de l'ordre d'une

microseconde [31]. Le mécanisme d'étalement et de solidification d'une gouttelette est et fondamental pour la projection thermique. Ce processus est dépendant de plusieurs paramètres :

- nature et forme du matériau,
- température et vitesse de la particule à l'impact,
- tension superficielle de la gouttelette,
- nature du substrat,
- température, rugosité, mouillabilité du substrat.

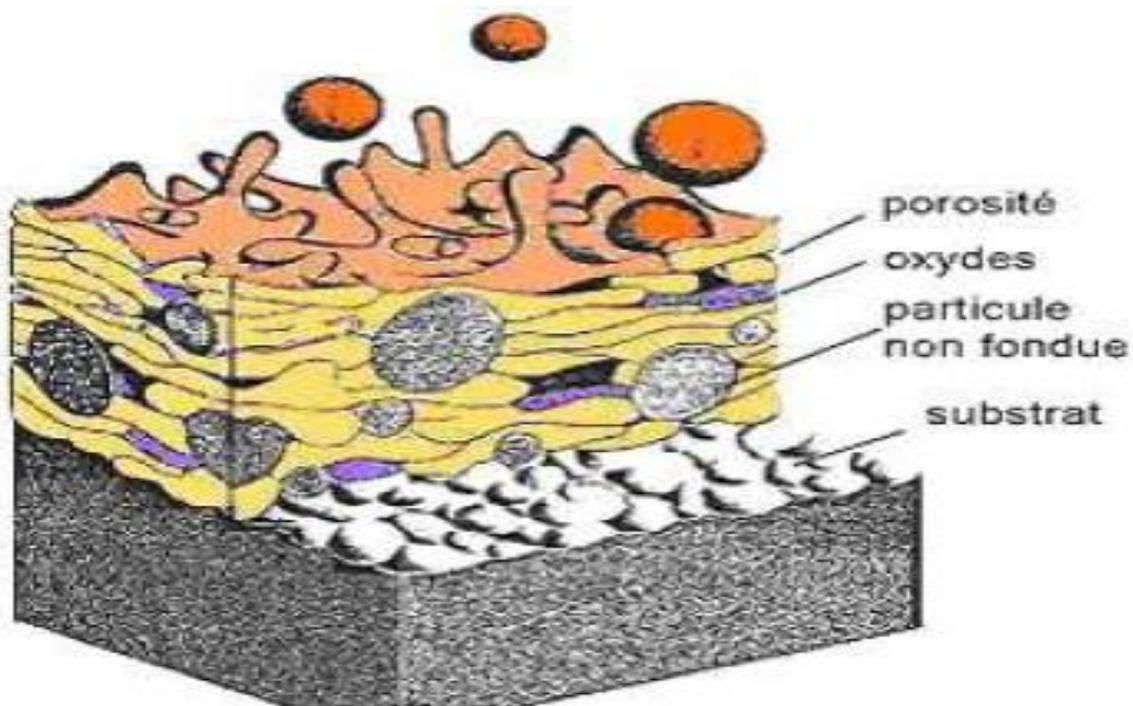
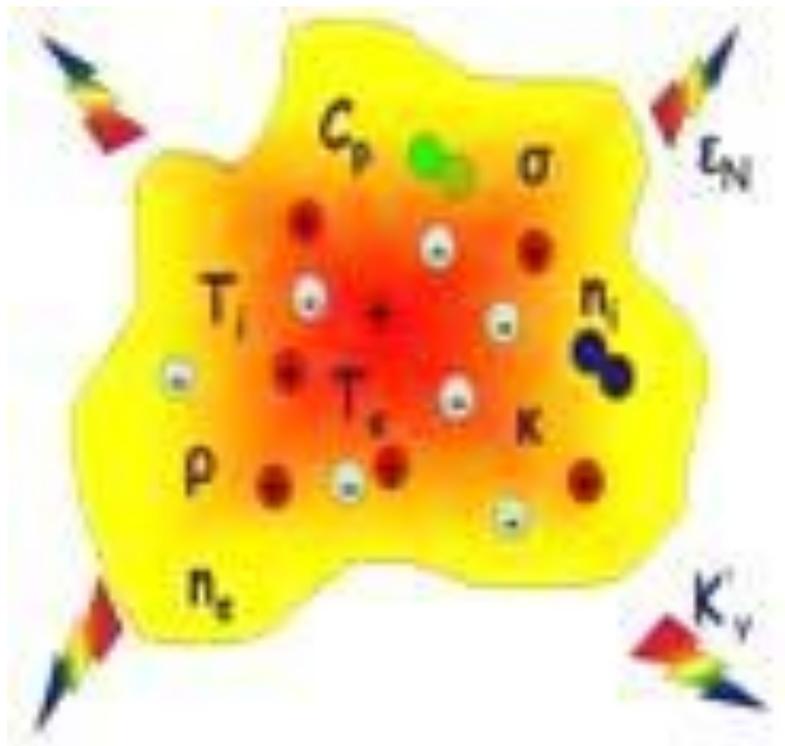


Figure3, 10 : Schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique

## Chapitre IV

### Calcul de composition chimique plasmas en équilibre thermodynamique local



### V-1. Introduction

La détermination de tous les coefficients et les propriétés de transport du plasma, repose sur la connaissance de sa composition. Dans ce paragraphe, l'obtention de la composition d'équilibre est développée.

On distingue essentiellement deux catégories de méthodes de calcul de la composition du plasma. D'une part, on peut utiliser les méthodes thermodynamiques, ou bien les calculs basés sur la loi d'action de masse. Cette loi aboutit à d'autres lois qui concernent l'équilibre d'excitation (loi de Boltzmann), de dissociation (loi de Guldberg-Wage) ou bien d'ionisation (loi de Saha-Eggert). D'autre part, pour les plasmas en déséquilibre chimique, on peut aussi avoir recours à une méthode cinétique basée sur le suivi individuel de chaque particule au travers des réactions chimiques dans lesquelles les espèces sont mises en jeu [32].

### IV-2. Calcul de la composition

Pour le calcul de la composition du plasma à l'équilibre du mélange Ar-H<sub>2</sub> On suppose que le plasma est en équilibre thermodynamique local (ETL), les particules ont toutes la même énergie cinétique moyenne pour l'ensemble des espèces chimiques du mélange, avec une variation de température de 5000 à 30000K, une pression variant entre 1 et 4 atm. Les espèces, atomiques et ioniques présentes dans le plasma sont : H, H<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>, e<sup>-</sup>, Ar, Ar<sup>+</sup>, Ar<sup>++</sup>.

#### IV-2-1. Ecriture des équations

Les densités de ces espèces ne sont pas indépendantes, elles sont reliées par les lois imposées par l'équilibre thermodynamique (la loi de Saha et la loi de Guldberg-Waage) car on a les réactions suivantes :

- 1)  $H_2 \Leftrightarrow H + H$
- 2)  $H \Leftrightarrow H^+ + e^-$
- 3)  $Ar \Leftrightarrow Ar^+ + e^-$
- 4)  $Ar \Leftrightarrow Ar^{++} + 2e^-$

Pour la 1<sup>er</sup> réaction on utilise la loi de Guldberg-Waage et pour les autres la loi de Saha,

On pose :

$$N_1 \rightarrow N_{H_2} ; N_2 \rightarrow N_{H^+} ; N_3 \rightarrow N_H ; N_4 \rightarrow N_{e^-}$$

$$N_5 \rightarrow N_{Ar} ; N_6 \rightarrow N_{Ar^+} ; N_7 \rightarrow N_{Ar^{++}}$$

Et  $Q_1 \rightarrow Q_{H_2} ; Q_2 \rightarrow Q_{H^+} ; Q_3 \rightarrow Q_H ; Q_4 \rightarrow Q_{e^-}$

$$Q_5 \rightarrow Q_{Ar} ; Q_6 \rightarrow Q_{Ar^+} ; Q_7 \rightarrow Q_{Ar^{++}}$$

On obtient le système d'équations :

$$\frac{N_3^2}{N_1} = \frac{Q_3^{\text{int}} Q_3^{\text{int}}}{Q_1^{\text{int}}} \left( \frac{m_H m_H}{m_{H_2}} \right)^{3/2} \left( \frac{2\pi K_B T}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left( -\frac{E_{\text{dis}} - \Delta E_{\text{dis}}}{K_B T} \right) \quad (\text{IV},1)$$

$$\frac{N_4 N_2}{N_3} = 2 \frac{Q_2^{\text{int}}}{Q_3^{\text{int}}} \left( \frac{2\pi m_e K_B T}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left( -\frac{E_{\text{ion}} - \Delta E}{K_B T} \right) \quad (\text{IV},2)$$

$$\frac{N_4 N_6}{N_5} = 2 \frac{Q_6^{\text{int}}}{Q_5^{\text{int}}} \left( \frac{2\pi m_e K_B T}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left( -\frac{E_{\text{ion}} - \Delta E}{K_B T} \right) \quad (\text{IV},3)$$

$$\frac{N_4 N_7}{N_5} = 2 \frac{Q_7^{\text{int}}}{Q_5^{\text{int}}} \left( \frac{2\pi m_e K_B T}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left( -\frac{E_{\text{ion}} - \Delta E}{K_B T} \right) \quad (\text{IV},4)$$

Avec  $N_i$  : les densités de chaque particule

$Q_i$  : les fonctions de partition

$E_{\text{ion}}$  : Energie d'ionisation

$E_{\text{dis}}$  : Energie de dissociation

#### IV-2-2. Lois annexes

Mais ces 4 équations sont pas suffisantes pour résoudre ce problème de 7 inconnues Le système doit être complété par certaines équation appelée lois annexes qui sont les suivantes :

##### **a- La loi de neutralité électrique**

Le plasma est totalement ou partiellement neutre donc les densités des espèces de charges négatives égales aux densités des espèces de charges positives

$$n_e = \sum_i z_i n_i \quad (\text{IV},5)$$

Avec  $n_e$  : la densité électrique,  $n_i$  : la densité des ions de charge  $z_i$ .

La loi de neutralité dans ce cas s'écrit alors sous la forme :

$$n_e = n_{H^+} + n_{Ar^+} + 2n_{Ar^{++}} \quad (\text{IV},6)$$

##### **b- La loi de Dalton**

On suppose que le plasma se comporte comme un mélange de gaz parfaits et cette loi relie la densité des espèces à la pression et à la température par :

$$P = \sum_i n_i K T \quad (\text{IV},7)$$

La loi de Dalton s'écrit sous la forme suivante :

$$P = KT(n_e + n_H + n_{H^+} + n_{H_2} + n_{Ar^+} + n_{Ar^{++}} + n_{Ar}) \quad (IV,8)$$

**c- Loi de conservation de la quantité de la matière**

La conservation de la quantité de la matière  $\Leftrightarrow$  la conservation de nombre de mole dans le mélange

On pose  $P_1$  est le pourcentage de  $H_2$  et  $P_2$  est le pourcentage d'Ar avec  $P_1 + P_2 = 1$

Donc on peut écrire

$$P_2 n_{H_2} = P_1 n_{Ar} \quad (IV,9)$$

**IV-2-3. Méthode de calcul**

La résolution du système d'équations formé de toutes ces lois est réalisée par la méthode de Newton-Raphson, car ce système est non linéaire.

**Principe**

Soit  $X^* = (X^*1, X^*2, \dots, X^*10)$  vecteur solution du système non linéaire

$$F_i(X) = 0 \quad i = 1, \dots, 10$$

Si chaque fonction  $f_i$  est continue et différentiable, alors par développement (de premier ordre) en série de Taylor dans le voisinage d'une estime  $X^{(k)}$  (valeur initiale) proche de la solution  $X^*$ .

$$f_i(X^*) = f_i(X^{(k)}) + \sum_{j=1}^{10} \left. \frac{\partial f_i(X)}{\partial X_j} \right|_{X=X^{(k)}} (X_{ij}^* - X_j^{(k)}) = 0$$

Où

$$\sum_{j=1}^{10} \frac{\partial f_i(\mathbf{X})}{\partial X_j} \Big|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}^{(k)}} (\mathbf{X}_{ij}^* - \mathbf{X}_j^{(k)}) = -f(\mathbf{X}^{(k)})$$

Cette dernière relation peut se mettre sous la forme

$$\mathbf{E}^{(K)} \cdot \Delta \mathbf{X}^{(K)} = \mathbf{F}^{(K)}$$

En posant la matrice

$$E_{ij} = \frac{\partial f_i(\mathbf{X})}{\partial X_j}$$

Le vecteur

$$\Delta \mathbf{X}^{(k)} = \mathbf{X}^* - \mathbf{X}^{(k)}$$

Et le vecteur

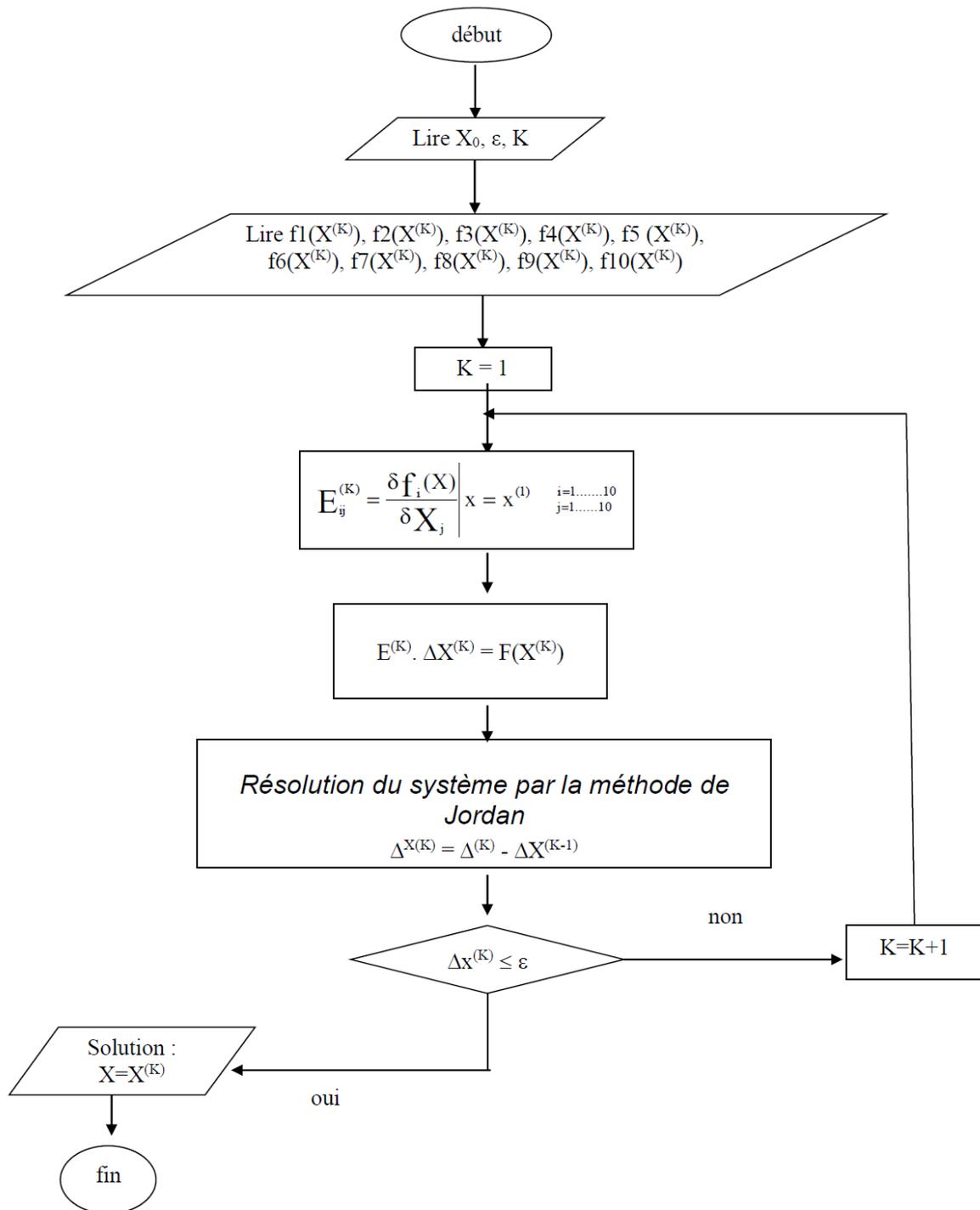
$$\mathbf{F}^{(k)} = -f(\mathbf{X}^{(k)})$$

Le système linéaire ainsi obtenu est résolu par la méthode de Jordan avec pivotation totale. On peut alors calculer  $\Delta \mathbf{X}^{(k)}$  qui est une estime de l'erreur commise en approximant  $\mathbf{X}^*$  par  $\mathbf{X}^{(k)}$ . On peut donc obtenir une meilleure estime  $\mathbf{x}^{(k+1)}$  de  $\mathbf{X}^*$  par

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} + \Delta \mathbf{X}^{(k)}$$

On continue jusqu'à ce que l'erreur  $\Delta \mathbf{X}^{(k+1)}$  tende vers 0.

$$|\mathbf{X}^{(k+1)} - \mathbf{X}^{(k)}| < \varepsilon$$



Organigramme de la méthode de Newton – Raphson pour la résolution de système non linéaire.

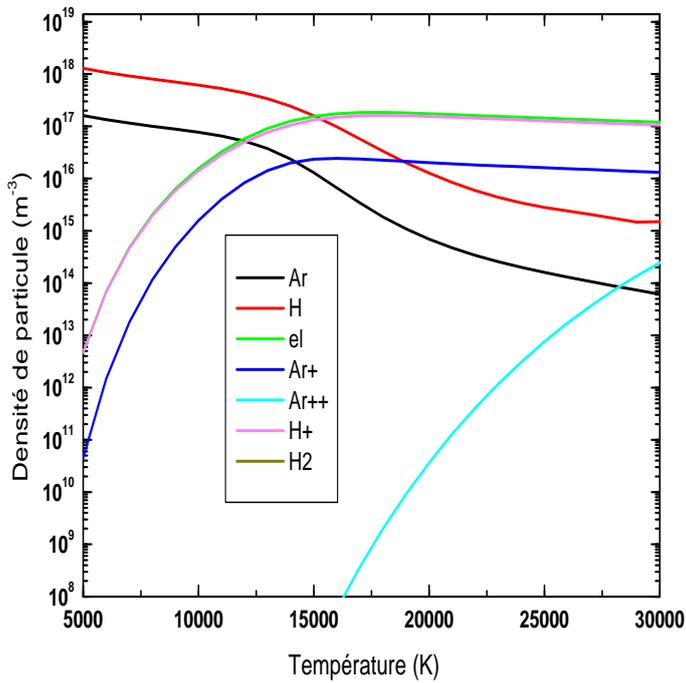
#### IV-2-4. Résultats

##### Résultats de La composition chimique du mélange Ar-H<sub>2</sub>

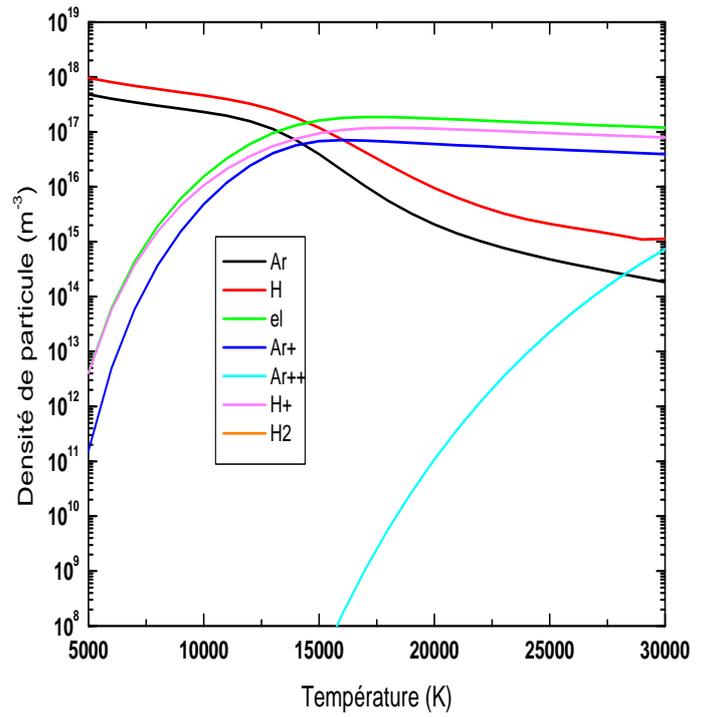
Les figures 4,1 représentent les densités des particules de mélange Ar-H<sub>2</sub> avec plusieurs pourcentages de H<sub>2</sub> (20%,50%,80%,100%) en faisant varier la température de 5000 à 30000 K.

Comme on peut le constater, à basse température, le plasma contient principalement des atomes neutres et peu de particules chargés. La molécule d'hydrogène est complètement dissociée à partir de 5000 K. L'énergie de dissociation de H<sub>2</sub> n'est pas trop élevée.

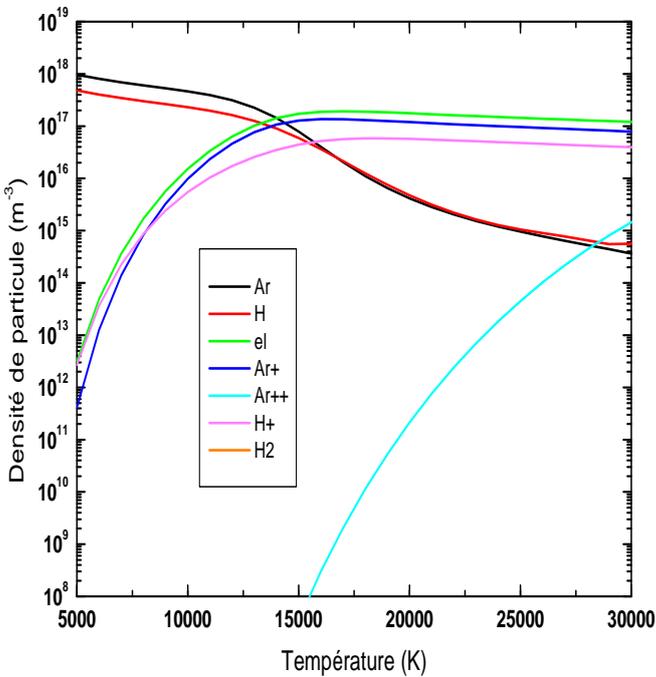
Mais à partir de 13000 K on trouve une diminution des densités d'hydrogène et de l'argon, où on marque une augmentation de la densité électronique. Cette augmentation est due essentiellement à l'ionisation de l'atome de H, à cause de son faible potentiel d'ionisation (90820.32 cm<sup>-1</sup>), par rapport à celui de l'atome d'argon (127109.80cm<sup>-1</sup>) Pour les températures relativement hautes (13000-30000K), les électrons sont les particules majoritaires. Nous avons plus d'ions d'hydrogène que d'argon, les atomes neutres s'épuisent partiellement mais continuent de produire des électrons et ceci par ionisation. On remarque également que la densité de l'argon Ar<sup>++</sup> reste très faible.



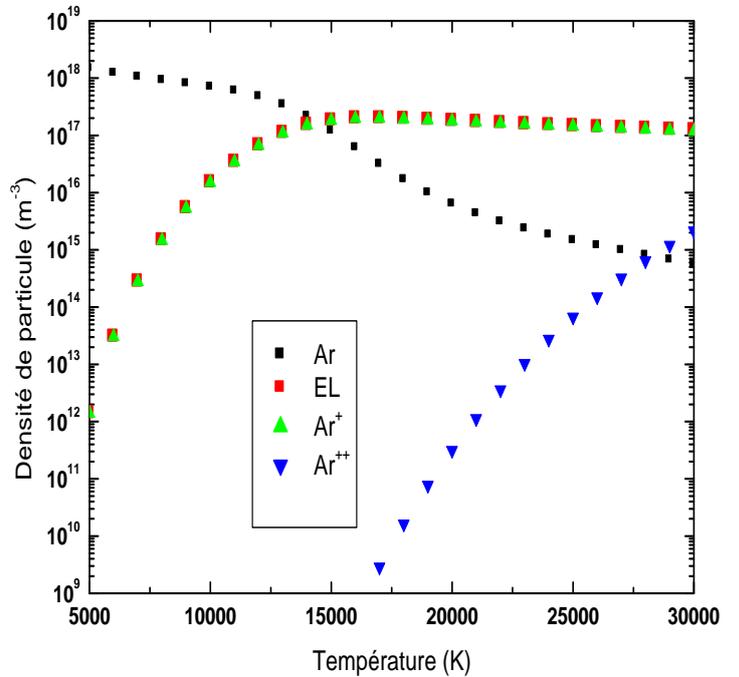
(a) Un mélange de 20% Ar et 80% H



(b) Un mélange de 50% Ar et 50% H



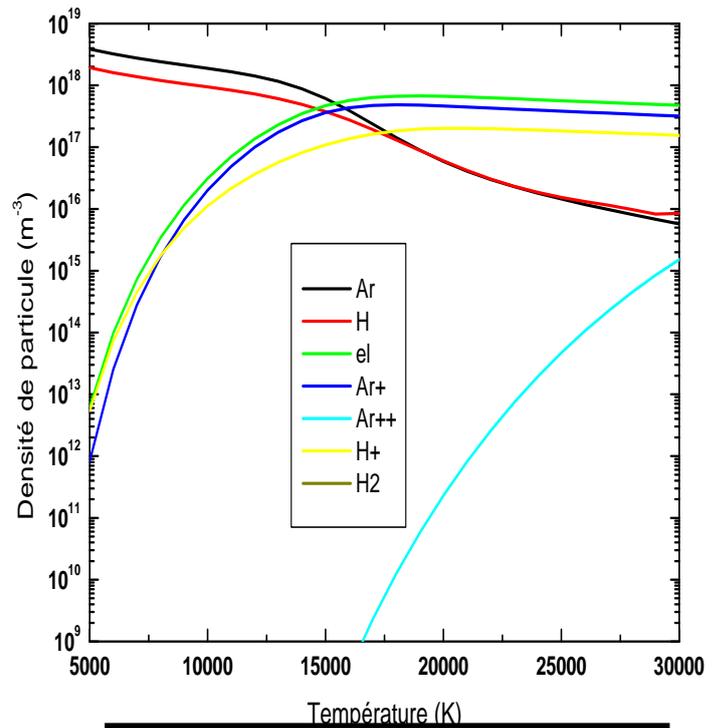
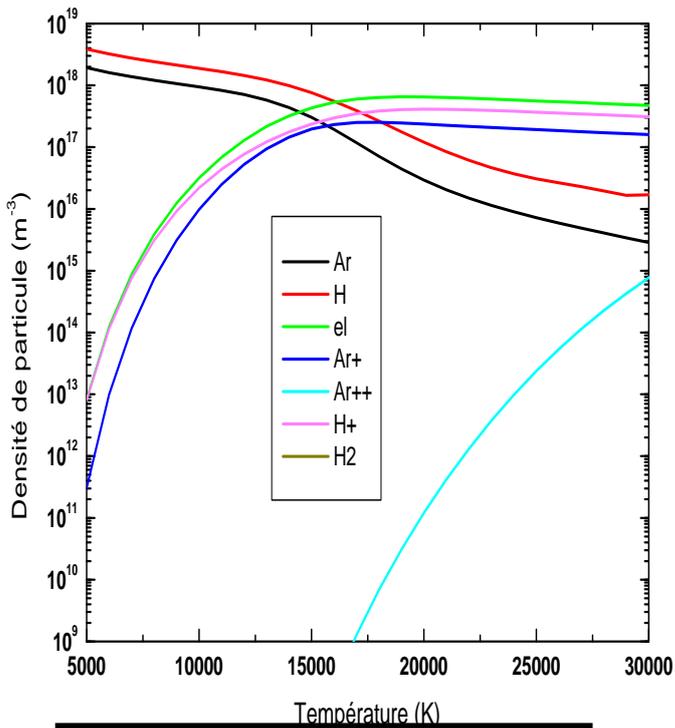
(c) Un mélange de 80% Ar et 20% H



(d) Un mélange de 100% Ar

Figure 4, 1 Composition d'un mélange avec différents pourcentages à pression =1 atm

En faisant la comparaison entre les deux graphes de la figure 4,2, et les courbes a et b des figures 4,1, on remarque que les densités des différentes espèces sont sensiblement proportionnelles à la pression suivant la loi de Dalton



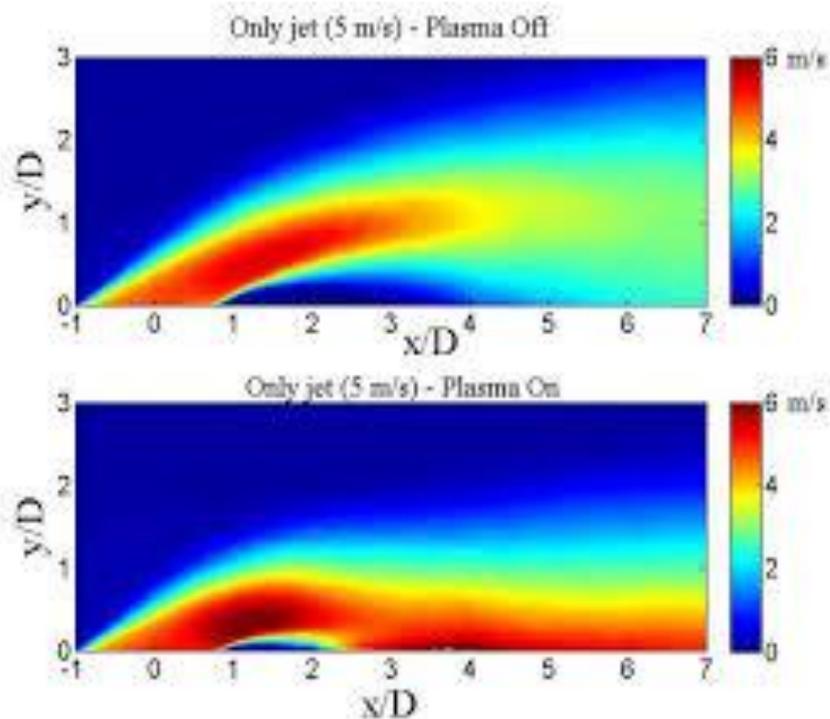
(a) Un mélange de 50% Ar et 50% H

(b) Un mélange de 20% Ar et 80% H

Figure 4,2 Composition d'un mélange avec différents pourcentages à pression = 4 atm

## Chapitre V

### Détermination du profil de Température dans un plasma thermique (Modèle Mathématique)



## **V-1. Introduction**

Lorsqu'ils sont constitués de photons, d'électrons, d'ions et de particules neutres, dans leurs états fondamentaux ou excités, les mélanges gazeux sont qualifiés de plasma à condition que les charges présentes s'équilibrent de façon à ce que le milieu soit électriquement neutre. Les électrons, du fait de leur faible masse par rapport aux particules lourdes (environ 1836 fois plus léger qu'un atome d'hydrogène), sont les espèces les plus mobiles. De multiples collisions entre les électrons et les particules lourdes vont avoir lieu dans le plasma.

Lors des collisions inélastiques, une partie de l'énergie cinétique est transformée en énergie interne modifiant l'état d'excitation des particules lourdes. Cependant ce sont les collisions élastiques, lors desquelles l'énergie cinétique et la quantité de mouvement des particules sont conservées, qui seront les plus fréquentes. Ces collisions élastiques sont à l'origine d'un effet thermique (effet Joule) important dans le plasma.

Au fur et à mesure des interactions ou bien de l'effet thermique, alors que les états d'excitation de plusieurs particules lourdes sont modifiés, l'énergie absorbée par certains atomes peut atteindre un gap correspondant à leur énergie d'ionisation (15.7 eV pour l'argon par exemple). Ils se transforment alors en ions en libérant un électron. Dans les plasmas thermiques, ces processus d'ionisation sont principalement responsables d'un fort pouvoir enthalpique du gaz, le conduisant à des températures de l'ordre de dizaines de milliers de kelvins. Par ailleurs, des processus tels que la désexcitation et la recombinaison de certains ions sont à l'origine d'émission de photons, et sont principalement responsables de la luminosité du milieu.

## V-2. Mécanisme de transfert d'énergie aux particules

L'énergie totale fournie aux électrons est égale à :  $\sigma E^2$ , une fraction de cette énergie est transférée aux ions et aux neutres par collisions élastiques  $W_{col}$ , 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 [33] :

$$W_{col} = 3 \frac{m_e}{M} k(T_e - T_g) n_e \nu \quad (VI,1)$$

$\nu$  : étant la fréquence des collisions

$m_e$  et  $T_e$  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

$$W_{Th} = -\vec{\nabla}(\lambda_e \cdot \vec{\nabla}) \Gamma \quad (VI, 2)$$

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

$$W_{Th} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \lambda_e \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (VI, 3)$$

$\lambda_e$  étant le coefficient de conductivité thermique des électrons.

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

$$W_{amb} = \left( E_i + \frac{5}{2} kT_e \right) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot D_a \cdot \frac{\partial n_e}{\partial r} \right) \quad (\text{VI, 4})$$

$D_a$  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 [33] :

$$\sigma E^2 = 3 \frac{m_e}{M} k(T_e - T_g) n_e f - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \lambda_e \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \left( E_i + \frac{5}{2} kT_e \right) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot D_a \cdot \frac{\partial n_e}{\partial r} \right) + U_{rad} \quad (\text{VI, 5})$$

### V-3. Equations de conservation

Le plasma étant considéré comme un fluide, sa modélisation repose sur les équations de Navier-Stokes relatives aux bilans de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

#### V-3-1. Equations de conservation de la 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 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v) = 0 \quad (\text{VI, 6})$$

Avec

$$\rho = \sum_i m_i n_i \quad (\text{VI, 7})$$

$\rho$  désigne la masse volumique du plasma,  $\vec{v}$  : sa vitesse d'ensemble

$n_i$  : La concentration de a particule  $i$

### V-3-2. Equations de conservation de la quantité de mouvement

Cette équation permet de prendre en compte les forces agissant sur l'écoulement du gaz. Ces forces sont la force de Laplace due à la circulation du courant et au champ, magnétique induit, les forces de pression et les contraintes visqueuses. Les forces de gravité sont négligées. Cette équation peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + (\rho \vec{v} \vec{\nabla}) \vec{v} = -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot \overline{\overline{\tau}} + \vec{j} \wedge \vec{B} \quad (\text{VI},8)$$

P : désigne la pression.

$\overline{\overline{\tau}}$  : le tenseur de contraintes visqueuses.

$\vec{j}$  : le vecteur densité de courant.

$\vec{B}$  : le champ magnétique induit.

### V-3-3. Equations de conservation de l'énergie

En sommant les équations de l'énergie cinétique pour chacune des espèces, on fait disparaître les termes d'échanges 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 [34] :

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \text{div}(\rho H \vec{v}) = \rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \overline{\overline{\text{grad}}}) H = \frac{dP}{dt} + \vec{v} \cdot \overline{\overline{\text{grad}}} P + \vec{J} \cdot \vec{E} - U_{rad} - W_{th} \quad (\text{VI},9)$$

En faisant intervenir la chaleur spécifique  $C_p = \frac{dH}{dT}$  et en remplaçant

$W_{th}$  par sa valeur, on obtient :

$$\rho C_p \left( \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overline{\overline{\text{grad}}} \right) T = \sigma E^2 - U + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{dP}{dt} + \vec{v} \cdot \overline{\overline{\text{grad}}} P \quad (\text{VI},10)$$

La pression est supposée constante et uniforme, on :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p v \frac{\partial T}{\partial r} = \sigma E^2 - U + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (\text{VI, 11})$$

On obtient alors :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho C_p} \left( \sigma E^2 - U + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) - v \frac{\partial T}{\partial r} \quad (\text{VI, 12})$$

Dans un milieu stationnaire, le premier membre de l'équation (VI,12) est nul, et on négligeant l'écoulement ainsi que les pertes par convection, notre équation se réduit à la forme simplifiée [35]:

$$\sigma E^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) - U_{rad} = 0 \quad (\text{VI, 13})$$

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.

[36, 37]

#### V-4. 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 ( $P = P_0$ ) à l'intérieur de la décharge.
- On considère que 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

#### V-5. Principe de la méthode de Runge Kutta :

Soit l'équation différentielle du premier ordre suivante :

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

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

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

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

$$\text{Avec } Y'_i = f(t_i, Y_i)$$

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 :

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

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

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

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

$$\text{avec } Y''_i = f(Y_i, Y'_i)$$

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

#### L'algorithme de Runge-Kutta d'ordre 4

Les méthodes de Runge-Kutta, d'ordre 2 ou 4, sont très couramment utilisées pour la résolution d'équations différentielles ordinaires [38]. Ce sont des méthodes à pas unique, directement dérivées de la méthode d'Euler. Elles ont l'avantage d'être simples à programmer et d'être assez stables pour les fonctions courantes de la physique. Sur le plan de l'analyse numérique, elles ont surtout l'immense avantage de ne pas nécessiter autre chose que la connaissance des valeurs initiales. Elles démarrent toutes seules.

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 :

$$k_1 = h * f(x_n, y_n)$$

$$k_2 = h * f(x_n + h/2, y_n + k_1/2)$$

$$y_{n+1} = y_n + k_2 + O(h^3)$$

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 :

$$k_1 = h * f(x_n, y_n)$$

$$k_2 = h * f(x_n + h/2, y_n + k_1/2)$$

$$k_3 = h * f(x_n + h/2, y_n + k_2/2)$$

$$k_4 = h * f(x_n + h, y_n + k_3)$$

$$y_{n+1} = y_n + k_1/6 + k_2/3 + k_3/3 + k_4/6 + O(h^5)$$

La méthode Runge-Kutta RK<sub>4</sub> 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  $O(h^5)$ .

Les méthodes de Runge-Kutta sont bien utilisées dans la pratique, car elles présentent plusieurs avantages (facilité de programmation, stabilité de la solution, modification simple du pas et la connaissance de  $y^{(0)}$  suffit pour intégrer l'équation différentielle). Les inconvénients de cette méthode se résument au temps de calcul lent et à la difficulté de l'estimation de l'erreur locale.

## *Conclusion générale*

Le but recherché de ce travail était de déterminer certaines grandeurs fondamentales caractérisant les plasmas thermiques d'arc formés de mélanges Ar-H<sub>2</sub>. Ce mélange de gaz qui très utilisé dans la projection thermique à cause de certaines propriétés remarquable (grande valeur de l'énergie cinétique et de la conductivité thermique).

Nous avons calculé la composition chimique du plasma formé de mélanges Ar-H<sub>2</sub>, dont la connaissance est indispensable pour toutes modélisation du plasma thermique et pour le calcul des coefficients de transport (conductivités électrique et thermique, viscosité) et aussi le rayonnement émis par le plasma. Ce type a été réalisé pour des températures comprises entre 5000 et 30000 K, pour plusieurs pourcentages de H<sub>2</sub> dans le mélange et deux valeurs de la pression.

On s'est intéressé également au profil de température dans le cas d'un régime stationnaire et avec une géométrie cylindrique. On a présenté un modèle mathématique permettant de donner l'évolution de la température axiale en fonction la distance radiale. 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 radiatif dans les plasmas nécessite aussi la connaissance des champs de température.

Dans le futur, Il intéressant d'étudier les plasmas Ar-H<sub>2</sub> mélange à des vapeurs métallique produite par vaporisation des poudre. Ces vapeurs peuvent influencer sur les propriétés des plasmas. On doit aussi étudier le transfert thermique du plasma avec les particules injectées.

# Références

- [1] CAYET S. « Densité des espèces dans un jet à basse pression de plasma air-vapeur d'eau en proportions variables. expérience et modélisation. », thèse d'université, paris sud centre d'Orsay (1993).
- [2] CLUB EDF ARC Électrique. \* L'arc électrique et ses applications \* tome 2, éditions du CNRS(1984).
- [3] BOULOS, FAUCHAIS ET PFENDER. \*Thermal plasma, Fundamentals and Applications\*.VOL. 1 .PLENUM PRESS NEW YORK (1994).
- [4] Solomenko and A.I.Fedorechenko. « High température Dust- leden jets in plasma technology », VSP (1990).
- [5] DmitrySokolov. Contribution au développement de la projection thermique à très faible pression. Mechanics. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009. French
- [6] KiyotakaWasa, ShigeruHayakawa. « Handbook of SputterDepositiontechnology principales Technology and applications » (Materials science and ProcessTechnologySeries,Noyes Publications(1992)
- [7] JOURNAL DE PHYSIQUE. « Plasma in laboratory and space », Colloque C7, supplément au n°7, Tome 40(Juillet 1979)
- [8] [www.areelis.for/information-applications-plasma-27.html](http://www.areelis.for/information-applications-plasma-27.html)
- [9] DROUET et Gruber « Dynamicmeasurements of chatodicemission in a moving arc IEE trans On plasma Science (1976)
- [10] Julien PATRU « Modélisation du Développement des Contraintes Résiduelles au Sein de Dépôts Plasma de Zircone et d'Acier »DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES.
- [11] La technologie des plasmas potentiels d'application au canada Michel G.DROUET « Institue de recherche d'hydro Québec Varennes Québec. Canada
- [12] M. Fadhel BEN ETTOUIL. Université de Limoges « Modélisation rapide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc »2008
- [13] PECKER et SCHATZMAN, « Astrophysique Générale »Masson et Cie EDITEURS (1959)
- [14] Riadh HANNACHI. « Etude expérimentale et propriétés radiatives d'un plasma thermique induit par impact Laser à la surface de milieux aqueux » thèse de Doctorat, université de Toulouse III (2007)
- [15] Griem H.R. « Spectral line Broadening by Plasma »Phys.Rev.n°3 (1962)
- [16] Griem H.R. «Plasma spectroscopy » Mc Graw-Hill, New York (1964)
- [17] Antonio MERCADO CABRERA « Modélisation de la cinétique chimique d'un plasma en extinction dans un disjoncteur basse tension »L'UNIVERSITE PAUL SABATIER (2003)
- [18] C. Moreau, J. F Bisson, R. S. Lima, B. R Marple, Diagnostic for advancedmaterialsprocessing by plasma spraying, (2005)
- [19] « Contribution au développement de la projection thermique à très faible pression »Dmitry Sokolov (2011)
- [20] <http://tss.asminternational.org/portal/site/TSS>
- [21] « Simulation numérique de dépôts céramiques plasma »Frédéric SarretL'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX (2015)
- [22] « Élaboration par projection thermique de barrières de diffusion finement structurées dans le cadre de l'élaboration d'aluminium et étude de leurs performances »UNIVERSITÉ DE LIMOGES (2010) Olivier PREZIOSA
- [23] K. Korpiola, P. Vuoristo, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1996)

# Références

- [24] B.R. Marple, B. Arsenault, J. Voyer, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1997)
- [25] A. Prôner, Revêtements par projection thermique, technique de l'ingénieur
- [26] Kriballhem Rafika « Etude numérique de l'écrasement de particules fondues sur des substrats métalliques Application au procédé de projection thermique » (2010) UNIVERSITE DE BATNA
- [27] Elise NOGUÈS – DELBOS Densification de dépôts de zircone yttrée projetés par plasma d'arc Ar-H<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> pour leur utilisation dans l'industrie des semi-conducteurs DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES (2007)
- [28] « Contribution à la modélisation tridimensionnelle de procédé de projection par plasma et application à un dispositif à deux torches » Eric Legros
- [29] Mohamed BOUNEDER, « Modélisation Des Transferts de Chaleur et De Masse dans Les Poudres Composites Métal/Céramique en Projection Thermique : Application A La Projection Par Plasma D'arc Souffle Argon Hydrogène », Université de Limoges, France.
- [30] SOKOLOV Dmitry Evguenievitch « Contribution au développement de la projection thermique à très faible pression » Université technique d'Etat de Tver
- [31] L. Li, B. Kharas, H. Zhang, S. Sampath, Mater. Sci. Eng. (2007)
- [32] Zo Alain RANARIJAONA « ETUDE DES ECARTS A L'EQUILIBRE THERMIQUE DANS LES PLASMAS D'ARC » 2011
- [33] S. Vacquié ; « L'arc électrique et ses application », Editeur : Eyrolles (31 mars 2000) Paris
- [34] A. Gleizes et al 1993 , J. Phys D : Appl. Phys. 26, 1921-1927
  
- [35] S. Vacquié, Pure & App. Chem., Vol. 68, No. 5, pp. 1133-1136, 1996.
- [36] Lianiet al 1997 J. Phys. D: Appl. Phys. 30 2964
- [37] H. Abdelhakim, J.P. Dingirard and S. Vacquié, J. Phys. D: Appl. Phys. 13, 1427 (1980)
- [38] J. P. Dmailly « Analyse numérique et équations différentielles, ed :Edp Sciences

Collection Grenoble Sciences, Avril 2006

**Titre :** « Etude de la projection thermique par plasma d'arc »

**Résumé**

Le but recherché de ce travail était de déterminer certaines grandeurs fondamentales caractérisant les plasmas thermiques d'arc formés de mélanges Ar-H<sub>2</sub>. Ce mélange de gaz qui très utilisé dans la projection thermique Nous avons calculé la composition chimique du plasma formé de mélanges Ar-H<sub>2</sub>, dont la connaissance est indispensable pour toutes modélisation du plasma thermique et pour le calcul des coefficients de transport On s'est intéressé également au profil de température dans le cas d'un régime stationnaire et avec une géométrie cylindrique. On a présenté un modèle mathématique permettant de donner l'évolution de la température axiale en fonction de la distance radiale.

**Mots clés :** plasma thermique, projection thermique, arc électrique, composition chimique, profil de température

---

**Titre :** « Study of the thermal projection by plasma of arc»

**Summary:**

The goal searched for of this work was to determine some fundamental property characterizing the thermal plasmas of bow formed of Ar-H<sub>2</sub> miscellanies. This mixture of gas that very used in the thermal projection Us calculated the chemical composition of plasma formed of Ar-H<sub>2</sub> miscellanies, whose knowledge is indispensable for all modelling of the thermal plasma and for the calculation of the transportation coefficients One was interested also in the profile of temperature in the case of a stationary régime and with a cylindrical geometry. One presented a mathematical model permitting to give the evolution of the axial temperature according to the radial distance.

**Keywords :** Arc discharge, chemical composition, thermal plasma, profil of temperature, thermal projection