



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN**

# MEMOIRE

Présentée à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

**MASTER EN PHYSIQUE**

Spécialité : Physique des Plasmas

Par :

**Mlle ZERRADI Amal**

Sur le thème

---

## **Traitement et valorisation des déchets par procédés plasmas thermiques**

---

Soutenue publiquement le **29 septembre 2020** à **Tlemcen** devant le jury composé de :

Mr BEKHECHI Smain	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr LIANI Bachir	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrant
Mr LEMERINI Mostefa	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur

Année Universitaire : **2019 ~ 2020**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



## *Remerciements*

*Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Physique Théorique, au Département de Physique, à la Faculté des Sciences de l'Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen.*

*Tout d'abord, je remercie Dieu, le tout puissant de m'avoir donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce travail.*

*Je tiens également à adresser mes sincères remerciements à :*

*Monsieur LIANI Bachir, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaid de m'avoir fait le grand honneur d'encadrer ce travail, et lui exprime ma gratitude pour sa disponibilité, ses conseils précieux et ses orientations qui m'ont permis de mener au bout ce travail.*

*Madame BEKHECHI Smain, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaid, qui m'a fait le grand honneur de présider le jury.*

*Monsieur LEMERJINI Mostefa, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaid, qui a bien voulu assurer la tâche d'examineur de mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

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



## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste mémoire :*

*À mes chers parents qui m'ont soutenue durant toutes mes années*

*d'études, qu'ALLAH me les garde en bonne santé.*

*À mon frère Bilal et ma sœur Hayet.*

*À mes amies et mes collègues.*

*À tous ceux qui me sont chers.*

*ZERRADI Amal*

# *Table des matières*

Introduction générale..... 1

## **Chapitre I : Généralités sur les plasmas thermiques**

I.1 Introduction.....3  
I.2 Plasmas thermiques..... 3  
I.3 Techniques de production des plasmas thermiques ..... 4  
I.3.1 Torches inductives ..... 4  
I.3.2 Torches à arc ..... 4  
I.3.2.1 Torches à arc non transféré ..... 5  
I.3.2.2 Torches à arc transféré ..... 5  
I.4 Classification des plasmas thermiques..... 6  
I.4.1 Plasmas d'arc ..... 6  
I.4.1.1 Amorçage de l'arc électrique ..... 6  
I.4.1.2 Classification de l'arc ..... 7  
I.5 Équilibre thermodynamique..... 7  
I.5.1 Équilibre thermodynamique complet..... 7  
I.5.1.1 Lois d'équilibre ..... 7  
I.5.1.1.1 Loi de Maxwell-Boltzmann ..... 7  
I.5.1.1.2 Loi de Boltzmann..... 8  
I.5.1.1.3 Loi de Saha ..... 8  
I.5.1.1.4 Loi de Guldberg-Waage..... 9  
I.5.1.1.4 Loi de Planck ..... 9  
I.5.2 Équilibre thermodynamique local..... 10  
I.6 Composition d'équilibre ..... 10  
I.6.1 Lois annexes..... 11  
I.6.1.1 Loi de neutralité électrique ..... 11  
I.6.1.2 Loi de Dalton ..... 11  
I.6.1.3 Loi de conservation de la quantité de la matière..... 11  
I.7 Applications des plasmas thermiques ..... 11

## **Chapitre II : Aperçu bibliographique sur les déchets**

II.1 Introduction ..... 15  
II.2 Historique ..... 15  
II.3 Qu'est-ce qu'un déchet ? ..... 16

## Table des matières

---

II.4 Origine de la production des déchets.....	16
II.5 Classification des déchets selon leurs origines.....	17
II.6 Modes de traitement des déchets.....	17
II.6.1 Enfouissement.....	18
II.6.1.1 Décharge classique.....	18
II.6.1.2 Décharge contrôlée.....	18
II.6.1.3 Effluents de l'enfouissement.....	19
II.6.2 Traitements biologiques.....	20
II.6.2.1 Méthanisation.....	20
II.6.2.1.1 Principe.....	20
II.6.2.1.2 Produits de la méthanisation.....	21
II.6.2.2 Compostage.....	21
II.6.2.2.1 Principe.....	21
II.6.2.2.2 Produit du compostage.....	22
II.6.3 Traitements thermiques.....	23
II.6.3.1 Pyrolyse.....	23
II.6.3.1.1 Types de pyrolyse.....	23
II.6.3.1.2 Valorisation des produits de pyrolyse.....	24
II.6.3.2 Gazéification.....	24
II.6.3.2.1 Principe.....	24
II.6.3.2.2 Valorisation du gaz combustible.....	25
II.6.3.3 Incinération.....	25
II.6.3.3.1 Principe.....	25
II.6.3.3.2 Résidus de l'incinération.....	26

## **Chapitre III : Traitement et valorisation des déchets par procédés plasmas thermiques**

I.1 Introduction.....	28
III.2 Traitement et valorisation des déchets par procédés plasmas thermiques.....	28
III.2.1 Procédé de la vitrification.....	28
III.2.1.1 Principe.....	28
III.2.1.2 Caractéristiques du vitrifiat.....	28
III.2.1.3 Valorisation du vitrifiat.....	29
III.2.2 Procédé Inertam.....	29
III.2.2.1 Conditionnement et stockage des déchets amiantés.....	29
III.2.2.2 Principe.....	30
III.2.2.3 Valorisation du cofalit.....	31
III.2.3 Procédé Plasmox.....	32

## Table des matières

---

III.2.3.1 Principe.....	32
III.2.4 Procédé SHIVA.....	33
III.2.4.1 Description du réacteur .....	33
III.2.4.2 Principe.....	34
III.2.4.3 Produits finis .....	34
III.2.5 Procédé CHO Power .....	35
III.2.5.1 Principe.....	35
III.3 Avantages et inconvénients des plasmas thermiques pour le traitement des déchets .....	37

## Chapitre IV : Calcul du profil de la température

IV.1 Introduction.....	39
IV.2 Calcul du profil de la température.....	39
IV.2.1 Mécanismes du transfert d'énergie aux particules.....	39
IV.2.2 Hypothèses de base .....	40
IV.2.3 Équations de base.....	41
IV.2.3.1 Équation de conservation de la masse.....	41
IV.2.3.2 Équation de conservation de l'énergie .....	41
IV.2.4 Méthode de la résolution .....	43
IV.4 Résultats et discussions .....	45
IV.4.1 Profil radial de la température dans un plasma de CH <sub>4</sub> pur .....	45
IV.4.2 Effet du pourcentage de H <sub>2</sub> sur le profil de la température.....	45
IV.4.3 Effet des pertes radiatives sur le profil de la température.....	46
IV.4.4 Profil axial de la température dans un plasma de SF <sub>6</sub> pur.....	47
IV.4.4 Effet du pourcentage de Cu sur le profil de la température .....	47
Conclusion générale .....	49
Bibliographie.....	50

# *Introduction Générale*

Depuis la dernière décennie, les plasmas thermiques sont devenus en pleine expansion, leurs intérêts industriels ont grandis et leurs applications sont considérablement diversifiées [1]. Ce développement est dû aux propriétés spécifiques des plasmas thermiques à savoir la compatibilité avec les processus existant, le traitement direct avec des matériaux bruts même sous des formes inutilisables, la fiabilité et la simplicité, l'utilisation rationnelle de l'énergie, la variété des configurations géométriques ainsi que les paramètres physiques (la densité, la température, la fréquence et l'intensité des potentiels électriques appliqués) [2].

Les plasmas thermiques sont présents ou utilisés dans des nombreux systèmes, configurations et procédés, notamment dans les appareils de coupure électrique, dans le traitement métallurgique (soudage, découpage des matériaux), la projection thermique, l'éclairage, le traitement et le revêtement des surfaces et le traitement des déchets ou des polluants qui constitue l'axe de notre étude, etc [1,2].

Les procédés plasmas thermiques sont maintenant parfaitement intégrés dans la technologie où ils sont devenus indispensables car ils complètent d'autres procédés avec des coûts tout à fait compétitifs. Ils sont devenus une part importante de nombreux procédés puisqu'ils s'agissent d'une technologie suffisamment mature et reproductible pour se développer encore dans les procédés où elle existe déjà en particulier avec le contrôle en ligne [3].

Dans le domaine des déchets, après les débuts industriels dans les années **1980** relativement balbutiants avec des travaux essentiellement limités aux poussières métallurgiques, dès les années **1990** les techniques plasmas thermiques ont commencées à trouver des débouchés dans la destruction des déchets toxiques militaires et industriels, le traitement des solides contaminés et des déchets nucléaires faiblement actifs, la décontamination des sols, etc. Depuis les années **2000**, ce développement est devenu exponentiel, en particulier pour les déchets municipaux et le gaz de synthèse produit étant très intéressant [3].

L'objectif de ce travail de mémoire est d'étudier la distribution de l'énergie thermique dans les plasmas d'arc dans le but de déterminer les profils de la température. On s'intéresse d'une part au profil radial de la température d'un plasma d'arc formé de mélanges de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de l'hydrogène ( $\text{H}_2$ ), dans le cas d'un régime stationnaire avec une géométrie

cylindrique. D'autre part, au profil axial de la température d'un plasma d'arc disjoncteur formé de mélanges de l'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ) et de la vapeur métallique ( $\text{Cu}$ ), dans le cas d'un régime transitoire.

Le présent manuscrit est segmenté en quatre chapitres enchaînés de la manière suivante :

- ✚ Dans le premier chapitre, nous présentons dans un premier temps des notions générales sur les plasmas thermiques, sa définition, ses techniques de production et ses types ensuite nous décrivons les modèles d'équilibre thermodynamique local et complet ainsi que les lois valables dans chacun des équilibres et en fin nous exposons quelques applications des plasmas thermiques.
- ✚ Dans le deuxième chapitre, nous présentons dans un premier temps des généralités sur les déchets, son historique, sa définition, son origine de la production et ses types ensuite nous passons en revue les diverses techniques de traitement des déchets qui existent dans la littérature.
- ✚ Dans le troisième chapitre, nous abordons d'une manière détaillée quelques procédés de traitement des déchets par voie plasmas thermiques, ses avantages et ses inconvénients.
- ✚ Le dernier chapitre est dédié au calcul du profil de la température dans les plasmas d'arc en se basant sur les équations de conservation de la masse et de l'énergie.
- ✚ En fin, nous terminons le manuscrit par une conclusion générale.

En vous souhaitant une bonne lecture.....

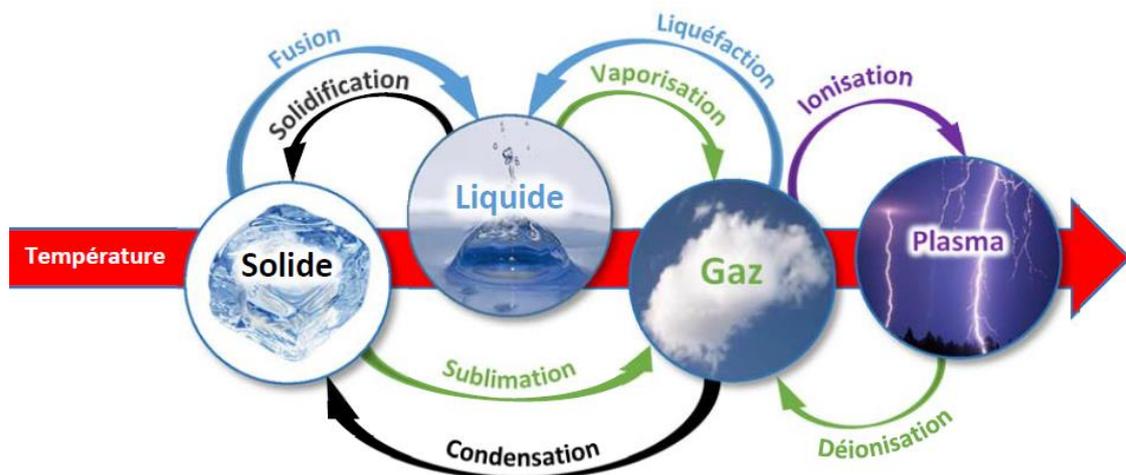
# *Chapitre I*

## *Généralités sur les plasmas*

### *thermiques*

### I.1 Introduction

Les plasmas se confondent avec le quatrième état de la matière, faisant suite dans l'échelle de la température aux trois états classiques: solide, liquide et gaz. Ce sont des gaz partiellement ou totalement ionisés, globalement neutres, contenant un grand nombre de particules : des atomes, des molécules et des ions qui peuvent être dans leurs états fondamentaux ou excités, des électrons et des photons qui proviennent de la désexcitation des états excités [4].



**Figure I.1:** Les différents états de la matière avec les principaux changements de phase.

En effet, les plasmas constituent près de **99 %** de l'Univers. Ils existent soit à l'état naturel (le soleil, les étoiles, les aurores, les éclairs...), soit à l'état artificiel dans les laboratoires où ils sont généralement produits par des décharges électriques (les plasmas de fusion nucléaires, les plasmas de gravure, les lampes à néons...) [4].

Il existe de très nombreuses variétés des plasmas [4], parmi lesquelles nous limiterons notre étude aux plasmas thermiques.

### I.2 Plasmas thermiques

Les plasmas thermiques sont des milieux gazeux partiellement ou totalement ionisés, dans lesquels toutes les particules (molécules, atomes, ions, électrons) ont sensiblement la même énergie cinétique moyenne, autrement dit la même température  $T_n \sim T_i \sim T_e$  [5].

La principale caractéristique des plasmas thermiques est qu'ils sont générés à la pression atmosphérique ou à son voisinage (entre  $10^4$  et  $10^6$  Pa), ce qui favorise les collisions entre particules. Ils sont également caractérisés par des densités électroniques comprises entre  $10^{20}$  et  $10^{24} \text{ m}^{-3}$  et des températures entre **6000** et **25000 K** [4]. Dans ces plasmas, les champs

électriques (sauf au voisinage des électrodes dans les arcs) et les libres parcours moyens sont trop faibles pour produire un état d'ionisation par collision inélastique directe. L'ionisation est donc produit essentiellement par un effet thermique qui est dû aux collisions élastiques [4].

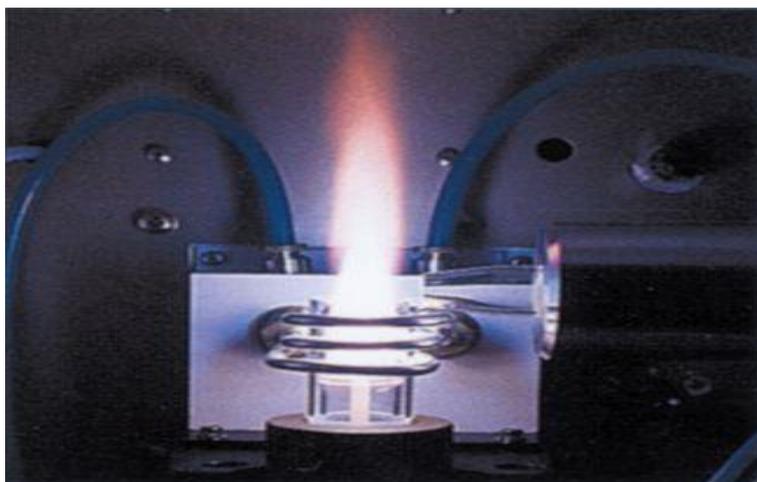
L'état de ces plasmas est très proche de l'équilibre thermodynamique local (ETL) pour lequel les lois de l'équilibre statistique sont valables à l'exception des lois qui sont relatives au rayonnement [6].

### I.3 Techniques de production des plasmas thermiques

Il existe deux techniques de production des plasmas thermiques, dépendant de la manière dont est apportée l'énergie pour transformer le gaz en plasma [5].

#### I.3.1 Torches inductives

Les torches inductives sont alimentées en courant alternatif, elles sont caractérisées par une absence totale d'électrodes. Dans cette technique, la création du plasma est obtenue par le passage d'un courant électrique alternatif à haute fréquence (comprise généralement entre **5** et **60 MHz**) dans une bobine conductrice qui génère un champ électromagnétique variable à l'intérieur d'un tube en quartz par exemple où circule le gaz plasmagène. Ce champ provoque l'ionisation du gaz circulant à l'intérieur de la torche dont les ions et les radicaux sont produits par collisions des électrons avec le gaz [7].



**Figure I.2:** Torche à plasma inductif.

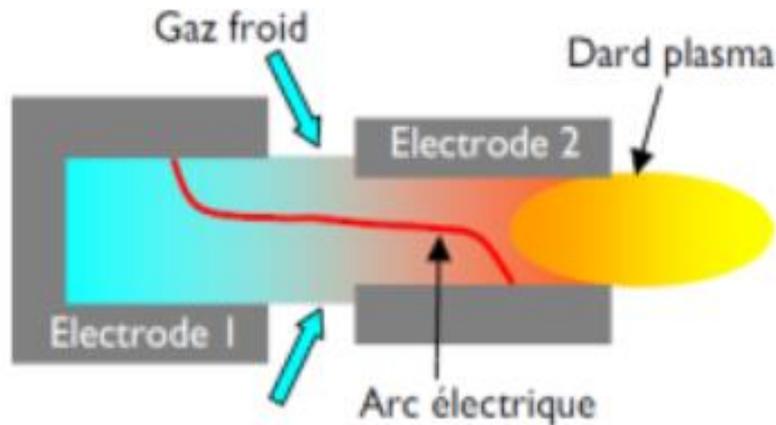
#### I.3.2 Torches à arc

Les torches à arc sont alimentées en courant continu. Dans cette technique, la création du plasma est réalisée par le passage du gaz dans un arc électrique amorcé [5].

Ces torches sont classifiées en deux catégories [5]:

### I.3.2.1 Torches à arc non transféré

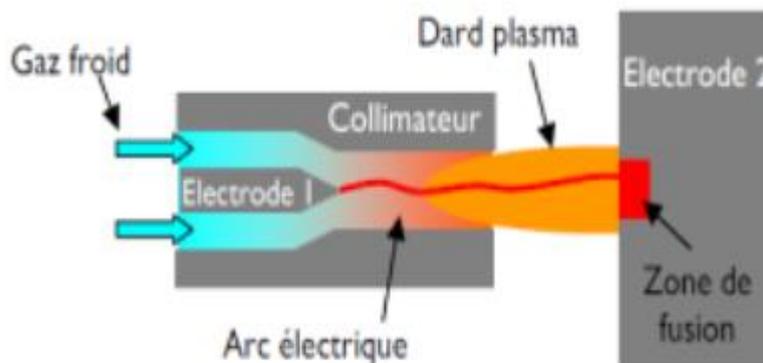
Elles comportent deux électrodes métalliques (anode et cathode) séparées par un isolant où circule le gaz. Dans ce cas, l'arc électrique est amorcé à l'intérieur de la torche entre les deux électrodes et reste toujours à l'intérieur de la torche [5,8].



**Figure I.3:** Torche à arc non transféré.

### I.3.2.2 Torches à arc transféré

Elles ne comportent qu'une seule électrode (froide ou chaude) [9]. Dans ce cas, l'arc électrique est amorcé entre l'électrode interne à la torche et un corps conducteur à l'extérieur de la torche, généralement le matériau à traiter ce qui permet à l'arc de se former à l'extérieur de la torche sur une grande distance [5,8].



**Figure I.4:** Torche à arc transféré.

Dans chaque technique, le gaz plasmagène utilisé peut être inerte tels que l'argon et l'hélium ou réactif : l'oxygène, l'azote, la vapeur d'eau..., comme il peut également s'agir d'un mélange gazeux [5].

### I.4 Classification des plasmas thermiques

Les plasmas thermiques sont classés en deux grandes familles : « **les plasmas inductifs** » et « **les plasmas d'arc** » [9].

#### I.4.1 Plasmas d'arc

Par définition, l'arc est une décharge électrique à forte densité de courant [10], son apparition est conditionnée par celles des phénomènes thermiques. Le caractère principal de cette décharge est que l'émission thermoélectronique qui est le mécanisme prépondérant pour l'émission des électrons (lorsque la cathode présente un point d'ébullition ou de sublimation très élevé) s'effectue à partir d'une région très localisée et souvent très mobile, appelée « **spot cathodique** » [10,11].

##### I.4.1.1 Amorçage de l'arc électrique

Il existe trois méthodes pour amorcer un arc électrique [11]:

###### ✓ **Transition continue**

Au départ, le système occupe un état de décharge luminescente; la cathode est recouverte par le plasma de décharge. Lorsqu'on augmente l'intensité du courant, la tension d'extraction des électrons augmente, la température s'élève et l'émission thermoélectronique devient majoritaire. On arrive donc à passer d'une manière continue d'une décharge luminescente à un arc électrique [11].

###### ✓ **Contact**

On considère deux contacts métalliques initialement parcourus par un courant électrique suffisant. Lorsqu'on les sépare grâce aux irrégularités de la surface, le courant passe par un contact très fin ; la température s'élève par effet joule jusqu'à la fusion du métal. On obtient donc un filet de métal fondu très fin par lequel passe tout le courant. Dans cette méthode, l'arc électrique se forme lors de la rupture du pont fondu [11].

###### ✓ **Surtension**

Lorsque la tension appliquée entre les électrodes dépasse une valeur critique  $V_a$  dite « **tension de claquage** », une décharge se forme entre les électrodes, cette décharge dégénère en arc électrique si la source ne limite pas le courant. On obtient donc un arc électrique par le phénomène de claquage [11].

### I.4.1.2 Classification de l'arc

On distingue deux types d'arc [11]:

#### ✓ Les arcs thermoïoniques

Où l'émission cathodique est d'origine thermique ; les électrons sont émis lorsque la cathode atteint une température suffisamment élevée. Cette dernière est maintenue sous l'impact des ions accélérés par des moyens extérieurs de chauffage [11].

#### ✓ Les arcs à émission du champ

Où les électrons sont extraits de la cathode sous l'effet d'un champ électrique très intense. Ce champ peut être dû soit à la présence d'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 sera ainsi portée à un potentiel positif très élevé [11].

## I.5 Équilibre thermodynamique

### I.5.1 Équilibre thermodynamique complet

L'équilibre thermodynamique complet (ETC) est réalisé dans un plasma lorsqu'un ensemble de particules (électrons, ions, atomes, molécules) enfermées dans une enceinte possèdent la même température ; l'ETC suppose que le plasma ne présente pas des gradients de température ou de pression. De plus, l'ETC exige que le principe de la micro-réversibilité des processus collisionnels et radiatifs soit satisfait [4]. Ce dernier stipule que chaque processus d'interaction est contrebalancé exactement par son processus inverse. Cela signifie par exemple que les phénomènes d'ionisation ne peuvent pas se produire sans l'apparition des phénomènes de recombinaison, de même pour l'émission et l'absorption des photons. Dans ces conditions, l'état physique du plasma est décrit statistiquement par un ensemble des lois dites « lois d'équilibre » [4].

#### I.5.1.1 Lois d'équilibre

Il existe cinq lois importantes dont quatre régissent l'équilibre des processus collisionnels : la loi de Maxwell-Boltzmann, la loi de Boltzmann, la loi de Saha, la loi de Guldberg-Waage et la cinquième régit l'équilibre des processus radiatifs : la loi de Planck [12].

##### I.5.1.1.1 Loi de Maxwell-Boltzmann

Cette loi décrit la distribution stationnaire des vitesses des particules, elle permet de

déterminer le nombre  $dN$  de particules d'une espèce donnée dont le module de la vitesse est compris entre  $v$  et  $v + dv$  dans un plasma de température  $T$  [10].

$$\frac{dN}{N} = \left( \frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left( - \frac{mv^2}{2k_B T} \right) 4\pi v^2 dv \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$m$  : la masse de la particule,

$N$  : le nombre total de particules,

$k_B$  : la constante de Boltzmann ( $k_B = 1.38066 \times 10^{-23}$  J/K).

### I.5.1.1.2 Loi de Boltzmann

Cette loi régit l'équilibre des processus collisionnels d'excitation et de désexcitation des particules, elle permet de donner les populations des différents niveaux d'énergies [10].

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

Avec :

$N_i$ ,  $E_i$  et  $g_i$  : sont respectivement la population, l'énergie et le poids statistique associé au niveau  $i$ ,

$N$  : la densité totale de l'espèce,

$Q^{\text{int}}$  : la fonction de partition interne de l'espèce considérée, elle est définie par la relation suivante :

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

### I.5.1.1.3 Loi de Saha

Cette loi régit l'équilibre des processus collisionnels d'ionisation et de recombinaison dans un plasma, elle permet de déterminer le degré d'ionisation du milieu [10].

$$\frac{n_e n_i}{n_0} = 2 \frac{Q_i^{\text{int}}}{Q_0^{\text{int}}} \left( \frac{2\pi m_e k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left( - \frac{E_i - \Delta E}{k_B T} \right) \quad (\text{I.4})$$

Avec :

$n_e, n_i$  et  $n_0$  : sont respectivement les densités de l'électron, de l'ion et de l'espèce neutre d'un même élément,

$Q_i^{int}, Q_0^{int}$  : sont les fonctions de partition interne de l'ion et de l'espèce neutre,

$2$  : la fonction de partition interne associée à l'électron,

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

$\Delta E$  : l'abaissement du potentiel d'ionisation dû aux effets des champs électriques créés par les particules chargées, il est donné par la relation suivante :

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

#### I.5.1.1.4 Loi de Guldberg-Waage

C'est une forme plus générale de la loi de Saha, elle exprime l'équilibre de dissociation des espèces moléculaires [6].

$$\frac{n_A n_B}{n_{AB}} = 2 \frac{Q_A^{int} Q_B^{int}}{Q_{AB}^{int}} \left( \frac{m_A m_B}{m_{AB}} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{2\pi k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left( - \frac{E_{AB} - \Delta E_{AB}}{k_B T} \right) \quad (\text{I.6})$$

Avec :

$Q_A^{int}, Q_B^{int}$  et  $Q_{AB}^{int}$  : sont les fonctions de partitions internes des espèces **A**, **B** et **AB**,

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

$E_{AB}, \Delta E_{AB}$  : sont respectivement l'énergie de dissociation et l'abaissement du potentiel associée

à cette énergie de la réaction suivante :  $\mathbf{A} + \mathbf{B} \xrightleftharpoons{E_{AB}} \mathbf{AB}$

#### I.5.1.1.5 Loi de Planck

Lorsque le plasma est en équilibre thermodynamique complet à une température **T**, le rayonnement émis par le plasma est totalement absorbé. Autrement dit, le rayonnement émis subit à une certaine distribution spectrale, c'est celle du corps noir donnée par Planck [10].

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

Avec :

$L_{\lambda}^0$  : la luminance spectrale d'un corps noir à la température  $T$ ,

$c$  : la vitesse de la lumière dans le vide ( $c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ),

$h$  : la constante de Planck ( $h = 6.62618 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ ).

### I.5.2 Équilibre thermodynamique local

Généralement, dans les plasmas de laboratoire la distance parcourue moyenne par les photons entre deux collisions est très grande devant les dimensions du plasma. Cela signifie que le rayonnement émis n'est pas totalement réabsorbé donc le plasma ne se comporte pas comme un corps noir mais il est totalement ou partiellement optiquement mince [4]. Pour cette raison, le concept d'équilibre thermodynamique local (ETL) a été défini. Il stipule que le plasma est optiquement mince et que ce sont les processus collisionnels entre les particules qui gouvernent les transitions et les réactions au sein du plasma. Autrement dit, localement il y a micro-réversibilité des processus collisionnels [4]. Dans cette hypothèse, les populations de toutes les espèces et de leurs niveaux excités restent bien décrites par les lois de Maxwell-Boltzmann, de Boltzmann, de Saha et de Guldberg-Waage. Par contre il n'y a pas micro-réversibilité des processus radiatifs ce qui implique que la loi de Planck n'est plus valable, elle est remplacée par la loi de Kirchhoff qui traduit l'équilibre des processus radiatifs liés à l'émission et l'absorption. Cette loi exprime la relation entre le coefficient d'émission spectral (relatif au flux émis) et le coefficient d'absorption spectral (relatif au flux absorbé), elle est donnée par la relation suivante [6]:

$$\varepsilon_{\lambda}(\mathbf{r}) = k'_{\lambda}(\mathbf{r}) L_{\lambda}^0(T) \quad (\text{I.8})$$

Avec :

$\varepsilon_{\lambda}$ : le coefficient d'émission spectral, il s'exprime en ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$ ),

$k'_{\lambda}$ : le coefficient d'absorption spectral, il s'exprime en ( $\text{m}^{-1}$ ).

### I.6 Composition d'équilibre

Dans les plasmas de laboratoire, l'ETC n'est jamais réalisé à cause de la présence des gradients de température et de densité qui font que la micro-réversibilité des processus radiatifs n'est plus vérifiée. Dans ce cas, la composition d'équilibre du plasma est calculée à partir des lois d'équilibre statistique hormis la loi de Planck et aussi d'autres lois dites « lois

**annexes** » : la loi de neutralité électrique, la loi de Dalton et la loi de conservation de la quantité de la matière [12].

### I.6.1 Lois annexes

#### I.6.1.1 Loi de neutralité électrique

Le plasma est un milieu globalement neutre. Ceci signifie qu'il y a autant de particules chargées positivement que de particules chargées négativement au sein du plasma [12].

$$\mathbf{n}_e = \sum_i \mathbf{Z}_i \mathbf{n}_i \quad (\text{I.9})$$

Avec :

$\mathbf{n}_e$  : la densité électronique,

$\mathbf{n}_i$  : la densité des ions de charge  $\mathbf{Z}_i$ .

#### I.6.1.2 Loi de Dalton

Souvent, les plasmas thermiques se comportent comme un mélange de gaz parfaits. Compte-tenu du degré d'ionisation de ces plasmas, une meilleure approximation de la pression est donnée par l'expression suivante [10,12]:

$$\mathbf{P} = \sum_j^n \mathbf{n}_j \mathbf{k}_B \mathbf{T} - \Delta\mathbf{P}_d - \Delta\mathbf{P}_v \quad (\text{I.10})$$

Avec :

$\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{T}$  : sont respectivement la pression et la température locale du plasma,

$\mathbf{n}_j$  : la densité de l'espèce  $\mathbf{j}$ ,

$\Delta\mathbf{P}_d$ : la correction de Debye-Hückel, elle permet de tenir compte du champ coulombien généré par les particules chargées du plasma,

$\Delta\mathbf{P}_v$ : la correction du Viriel, elle permet de compenser les écarts à l'idéalité du gaz engendrés par les interactions entre les particules neutres.

#### I.6.1.3 Loi de conservation de la quantité de la matière

Elle exprime la conservation de nombre de moles ou de la quantité de la matière dans le mélange considéré.

### I.7 Applications des plasmas thermiques

Les plasmas thermiques couvrent un très large domaine d'applications, et notamment [13]:

#### ✓ Découpage

Le découpage par plasma appartient aux techniques de découpage thermique (l'oxycoupage, la découpe laser). Il consiste à produire une fusion locale sur la pièce à découper par un plasma d'arc de très haute température comprise entre **20 000** et **25 000 °C**, la zone fondue est ensuite éjectée de la pièce par le soufflage du jet de plasma confiné. Ce procédé est essentiellement utilisé dans l'industrie métallurgique tels que : la fabrication des pièces pour l'automobile, l'aéronautique ou les matériaux de construction, etc [14].

Le découpage par plasma permet de traiter n'importe quels types des matériaux (le cuivre, l'aluminium, l'acier inoxydable, le nickel...), ayant des épaisseurs comprises entre quelques dixièmes et plusieurs centaines de millimètres. Il se caractérise par la simplicité d'utilisation, une faible zone affectée thermiquement (**ZAT**), qualité et précision moyennes et un faible coût d'opération ce qui le rend très compétitif par rapport aux autres techniques de découpage thermique [15].



Figure I.5: Découpage par plasma.

#### ✓ Soudage

Le soudage par plasma permet d'assurer la continuité physique entre les pièces à assembler [16]. Il consiste à fusionner les pièces par un plasma d'arc de haute température comprise entre **3 500** et **5 550 °C** avec l'addition d'un métal d'apport, l'ensemble de métal fondu et le métal d'apport crée un bain de fusion [17]. Cette technique est applicable sur tous les matériaux métallurgiques soudables comme les aciers alliés et en particulier les aciers inoxydables austénitiques, ayant des faibles épaisseurs (inférieures à **0.5 mm**) où la qualité du soudage

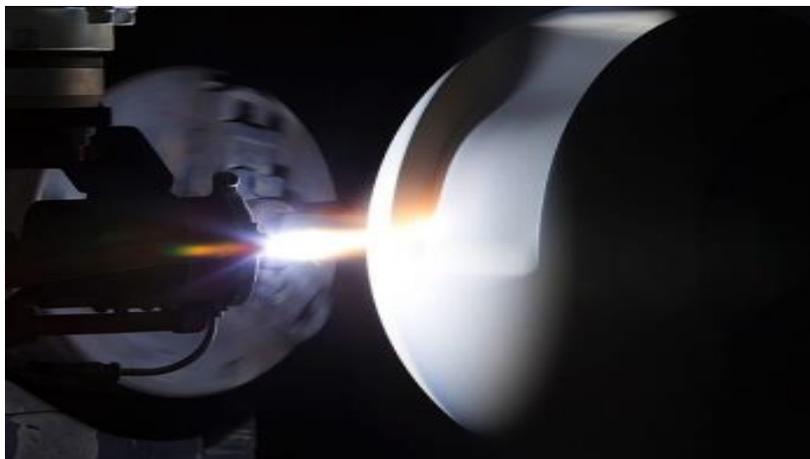
dépend fortement du courant d'arc, la vitesse du soudage et la forme de la zone fondue au cours du soudage [14,15].



**Figure I.6:** Soudage par plasma.

### ✓ Projection

La projection par plasma est l'une des techniques de projection thermique (flamme de diffusion, flamme haute pression ou haute vitesse, canon à détonation et arc fil). Elle consiste à introduire des particules solides (granulométrie comprise entre **10** et **100  $\mu\text{m}$** ) dans un jet de plasma où la température est supérieure à **10 000 °C** à l'aide d'un gaz porteur afin de les y accélérer et de les fondre [13,15]. Les particules fondues sont ensuite écrasées sur un substrat où elles forment un dépôt de structure lamellaire constituant des couches successives de lamelles écrasées, ayant des épaisseurs comprises entre **3** et **0,6  $\mu\text{m}$**  [13,15]. Ces dépôts servent à protection contre l'usure, la corrosion et les effets thermiques. Ils peuvent avoir également des propriétés électriques, magnétiques, etc [13].



**Figure I.7:** Projection par plasma.

La projection par plasma est utilisée dans des nombreuses industries tels que: l'aéronautiques, la mécanique, le biomédical, l'imprimerie, les industries minières....elle permet de traiter tous types de matériaux (céramiques et réfractaires) [15].

### ✓ **Traitement des déchets**

Le traitement des déchets par technologies plasmas thermiques a débuté depuis les années **1990** [3]. Ces techniques sont généralement utilisées pour le traitement ou la destruction des déchets potentiellement dangereux avec une production possible d'énergie et éventuellement d'une fraction à valoriser [18].

Il existe plusieurs procédés de traitement des déchets par plasmas thermiques seront présentés dans le troisième chapitre.

## *Chapitre II*

# *Aperçu bibliographique sur les déchets*

### II.1 Introduction

Les déchets sont indissociables de la vie humaine, ils constituent un marqueur de la vie de l'homme et de ses activités. La variété des déchets ainsi que leurs volumes ont fortement augmentés grâce au développement industriel et ils sont devenus un problème sérieux d'environnement [19]. Pour cette raison, des techniques de traitement ont apparus comme une solution permettant de réduire le volume et la toxicité des déchets. Ces techniques visent à la valorisation (énergétique, organique, matière) et/ou l'élimination des déchets dans le milieu naturel, d'une manière assure la protection de la santé publique et/ou de l'environnement contre les effets nuisibles qui peuvent les provoquer [20,21].

### II.2 Historique

Au moyen âge, la croissance urbaine se fit rapidement sentir ainsi que la production des ordures qui étaient jetées dans les rues et les rivières, généraient ainsi des odeurs nauséabondes. Ces odeurs ont rapidement insupportées les habitants, pour cela en **1184**, **Philippe Auguste** ordonna le pavage des rues de Paris et l'aménagement des canaux et des fossés centraux afin de faciliter l'évacuation des déchets [20].

Plus tard, plusieurs autres tentatives ont été menées et légiférées grâce aux actions combinées de **Saint-Louis**, de **Louis XII** et de **Philippe Auguste** qui tentent d'organiser un service d'enlèvement des ordures mais en vain car il est financé par un impôt spécial. En **1531**, des réelles mesures sont appliquées comme l'obligation d'installer des fosses septiques dans chaque maison. Et en **1870**, le **Baron Haussmann** remplace « le tout à la rue » par « le tout à l'égout » pour les déchets liquides [20].

Le **24 juillet 1883**, le préfet de la ville de Paris **Eugène Poubelle** obligea les propriétaires à mettre à la disposition de leurs locataires des récipients munis d'un couvercle afin qu'ils puissent y déposer leurs déchets, dits « **poubelles** ». Quatre mois plus tard, le **24 novembre 1883**, **Eugène Poubelle** fit évoluer l'obligation d'avoir une poubelle par l'obligation d'avoir quatre poubelles : une pour les matières putrescibles, une pour le verre, une pour les faïences et une pour les chiffons et le papier [20].

Quelques siècles plus tard, lors de l'industrialisation qu'apparurent deux nouveaux métiers : le vidangeur qui récupère l'urine et les excréments dans les fosses d'aisance et les revendent comme engrais aux paysans ainsi que les boues de rues qui permettent l'essor du maraîchage. Et le chiffonnier qui par le recyclage des déchets participe à l'essor de l'industrialisation [20].

La disparition de ces métiers au cours du **XX<sup>ème</sup> siècle** donna naissance à un nouveau système de traitement des déchets, dit « **centres de stockage** ». Ces initiatives de tri et de recyclage (ne concernent pas le reste de la population) ont poussés les villes à utiliser les services d'éboueurs équipés de bennes, dans un premier temps à cheval et rapidement en véhicules motorisés [20].

Parallèlement, les recherches menées par **Pasteur** au cours des années **1850** jusqu'à sa mort ont permis de faire avancer les décisions dans la gestion des déchets. En effet, les hygiénistes conclurent qu'il était préférable de brûler les ordures que de les enfouir, de ce fait fut mise en place la construction des premiers incinérateurs en région parisienne [20].

### II.3 Qu'est-ce qu'un déchet ?

Le mot déchet vient du verbe « **déchoir** », signifie un bien dont la valeur est diminuée. En effet, ce terme peut avoir plusieurs définitions selon le contexte et également selon le niveau législatif, parmi lesquelles nous pouvons mentionner celle issue de l'article **L 541-1-1** du code de l'environnement qui définit le déchet comme étant : « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, objet, produit ou plus généralement tout bien meuble dont le détenteur se défait, projette de se défaire ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer » [21].

### II.4 Origine de la production des déchets

Toutes les activités humaines engendrent des déchets [21]:

- ✓ **Biologique** : tout cycle de vie animale ou végétale génère naturellement des métabolites (matière fécale, cadavre...) [21].
- ✓ **Chimique** : les réactions chimiques mises en œuvre lors de l'élaboration d'un produit s'accompagnent par la formation des sous-produits si les réactifs n'ont pas l'usage évident [21].
- ✓ **Économique** : la durabilité des produits, des objets et des machines a forcément une limite ce qui conduit à leurs éliminations [21].
- ✓ **Technologique** : quelles que soient la fiabilité et la qualité des outils et des procédés de production, il y a inévitablement des rejets tels que les chutes, les copeaux, les solvants usés, les emballages, les fumées, etc [21].

- ✓ **Écologique** : les activités de dépollution (eau, air, déchets) génèrent à leur tour d'autres déchets et ainsi de suite [21].
- ✓ **Accidentelle** : les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont à l'origine des déchets [21].

### II.5 Classification des déchets selon leurs origines

Les déchets peuvent être classés selon leurs origines en cinq catégories :

- **Les déchets ménagers et assimilés** : sont ceux générés par les activités ménagères, industrielles, commerciales, artisanales et d'autres qui sont par leurs natures et leurs compositions assimilables aux déchets ménagers [21].
- **Les déchets industriels** : sont ceux générés par les industries et les entreprises, ils sont classés en deux catégories : les déchets industriels banals (**DIB**) identiques aux déchets ménagers et les déchets industriels spéciaux (**DIS**) ou dangereux (amiante, plomb...) dont la toxicité nécessite un traitement particulier [20].
- **Les déchets agricoles** : sont ceux générés par les activités d'agriculture, d'élevage et de jardinage à savoir les cannes, les feuilles, les fumiers, les déchets d'abattoirs ...,et aussi tous les déchets d'emballages liés à ces activités [20].
- **Les déchets inertes** : sont les déchets qui ne subissent aucunes modifications physique, chimique ou biologique importantes et ne constituent pas des substances polluantes à savoir les déchets de démolition, de construction ou de rénovation [20].
- **Les déchets hospitaliers** : sont ceux générés par les activités de soins, ils sont classés selon leurs caractères polluants en deux catégories : les déchets d'activités de soins à risques infectieux (**DASRI**) et les déchets d'activités spécifiques (**DAS**) [19].

### II.6 Modes de traitement des déchets

Les modes de traitement des déchets sont subdivisés en deux catégories : les modes d'élimination visent à obtenir des substances qui peuvent être soit restituées sans effet nocif au milieu naturel, soit réinsérées dans les circuits économiques à des fins de valorisation [21]. Et les modes de valorisation qui visent à extraire à partir des déchets soit un potentiel énergétique, soit un retour dans le cas des biodéchets ou un potentiel dit de matière [20,21].

### II.6.1 Enfouissement

Deux modes d'enfouissement peuvent être constatés [21]:

#### II.6.1.1 Décharge classique

Appelée également « **décharge incontrôlée** » ou « **décharge sauvage** ». C'est le mode d'élimination le plus utilisé dans les pays en développement. Il n'est précédé d'aucune étude d'impact ni d'analyse environnementale et les déchets sont mélangés aléatoirement sans tri [21]. Ce type de décharge consiste à déposer les déchets en couches successives au sein de l'ouvrage, les couches des déchets sont ensuite recouvertes régulièrement par la terre afin de limiter les envols, les odeurs, la prolifération de nuisibles (rats, mouettes, corbeaux...)[21,22].



**Figure II.1:** Décharge classique.

#### II.6.1.2 Décharge contrôlée

Appelée aussi « **Centre d'Enfouissement Technique (CET)** » ou « **Centre de Stockage des Déchets (CSD)** » qui est par définition, une installation permettant de stocker les déchets acceptés en les isolant du milieu extérieur et d'éviter toute contamination du sol [21]. Cette installation est composée d'un ensemble de casiers creusés dans le sol dont le volume est délimité par une digue stable et étanche, ce qui permet d'éviter les débordements d'un casier à un autre. Le casier lui-même peut contenir plusieurs alvéoles dans lesquelles sont stockés les déchets. Le fond et les côtés de chaque casier sont recouverts successivement par des couches de sable, de bentonite et/ou d'argile, de polyéthylène étanche et de sable, surmontée d'un drainage des lixiviats [20,21]. Les casiers une fois pleins, ils sont recouverts par un matériau étanche et également d'un système de captage du biogaz [21].



**Figure II.2:** Décharge contrôlée.

Les centres d'enfouissement techniques sont répartis en trois classes selon la nature physique des déchets [20,21]:

- **CET de classe 1:** pour les déchets industriels dangereux [21].
- **CET de classe 2:** pour les déchets ménagères et assimilés [21].
- **CET de classe 3:** pour les déchets inertes [21].

### II.6.1.3 Effluents de l'enfouissement

#### ✓ Les lixiviats

Les lixiviats sont des liquides pollués percolant à travers les déchets, ils sont produits par le contact entre les déchets et l'eau. Les lixiviats constituent des substances minérales et organiques toxiques, ils doivent donc subir un traitement avant de leurs rejets au milieu naturel, par exemple sur un site de production pour l'entretien des espaces verts [20,21].

#### ✓ Le biogaz

Le biogaz est un gaz combustible produit par la décomposition anaérobie des déchets organiques, il constitue essentiellement de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Compte-tenu des propriétés énergétiques du biogaz, en cas d'une forte production il est préférable de le valoriser que de l'éliminer dans l'atmosphère. Les principaux modes de valorisation sont les suivants [21]:

- La production de l'électricité qui est consommée soit directement, soit vendue aux systèmes locaux ou régionaux de distribution de l'énergie [21].

- La conversion du biogaz en gaz naturel comme source de carburant pour les véhicules [21].
- La production de la vapeur ou de l'eau chaude [21].
- La production mixe de la chaleur et de l'électricité (cogénération) [21].

### II.6.2 Traitements biologiques

Le traitement des déchets par voie biologique avec valorisation (organique et/ou énergétique) de leurs contenus est réalisé de deux manières différentes [20]:

#### II.6.2.1 Méthanisation

La méthanisation est un processus naturel de dégradation de la matière organique par l'interaction de plusieurs micro-organismes en absence de l'oxygène. Elle est applicable à la plupart des déchets organiques qu'ils soient d'origine municipale, industrielle ou agricole, solides ou liquides [20,21].

##### II.6.2.1.1 Principe

La méthanisation s'effectue au sein d'un réacteur fermé dit « **digesteur** », elle nécessite une préparation mécanique des déchets (broyage grossier puis fin des classes fermentescibles, suivi d'un criblage et tamisage, puis d'une humidification). Ce processus biologique se déroule en quatre étapes [21]:

**1 - Hydrolyse** : c'est l'étape la plus lente durant laquelle les macromolécules qui constituent la matière organique se décomposent en petites molécules solubles [21].

**2 - Acidogénèse** : les petites molécules obtenues lors de l'hydrolyse sont transformées en acides, en alcools, en hydrogène et en dioxyde de carbone [21].

**3 - Acétogénèse** : les produits issus de l'étape précédente sont transformés en acétate, en dioxyde de carbone et en hydrogène. L'hydrogène doit être éliminé en continu pour éviter son accumulation qui conduit à l'arrêt de l'étape [21].

**4 - Méthanogénèse** : les produits issus de l'acétogénèse sont minéralisés et transformés en méthane par des micro-organismes méthanogènes selon deux voies [21]:

✓ La première dite "**acétotrophes**", s'effectue à partir de l'acétate selon la réaction suivante :  $\text{CH}_3\text{COOH}^- \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$  [21].

✓ La deuxième dite "**hydrogénotrophes**", s'effectue à partir du mélange de l'hydrogène et

de dioxyde de carbone selon la réaction suivante :  $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$  [21].

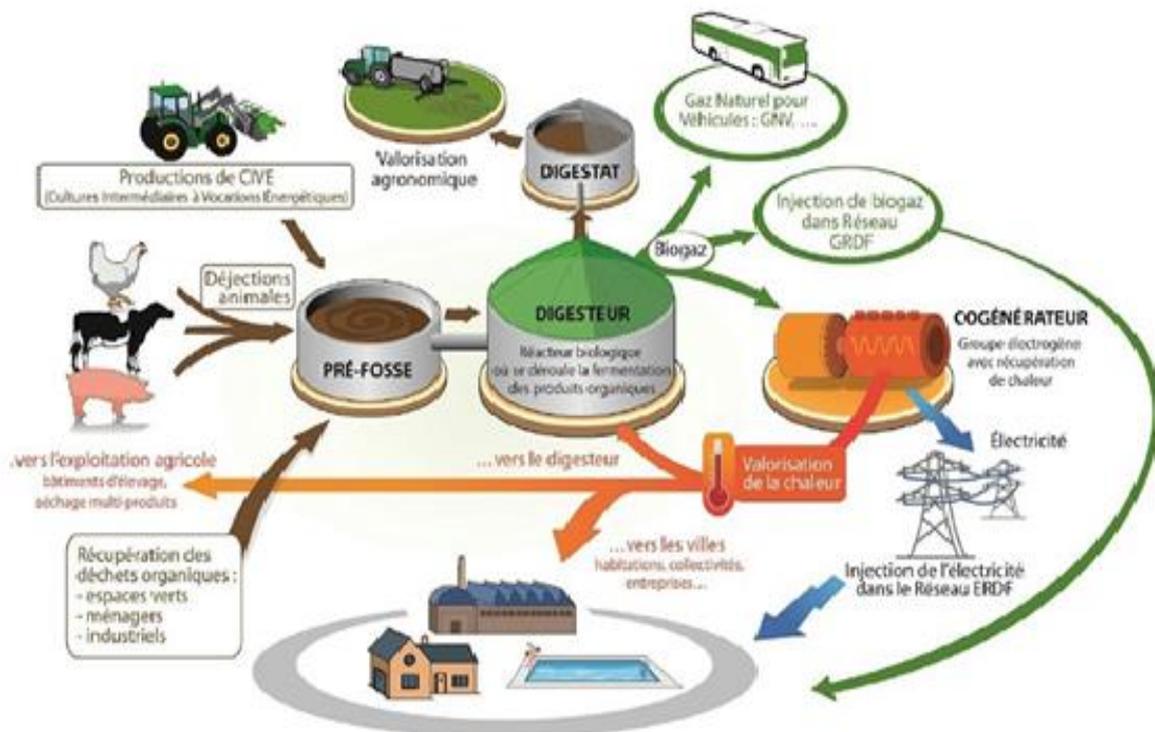


Figure II.3: Schéma de la méthanisation.

### II.6.2.1.2 Produits de la méthanisation

#### ✓ Le biogaz

La définition du biogaz et leurs modes de valorisation sont mentionnés précédemment dans la partie "effluents de l'enfouissement".

#### ✓ Le compost

Le compost est un composé solide, stable, de forme granulaire, humique, assainie et riche en matière organique. Ce produit est potentiellement valorisé dans le domaine d'agriculture pour améliorer la qualité des sols agricoles et augmenter leurs capacités de rétention de l'eau [21].

### II.6.2.2 Compostage

Le compostage est un processus contrôlé (aération, température, humidité) de dégradation de la matière organique solide ou semi-solide, d'origine végétale ou animale par des micro-organismes en présence de l'oxygène [21].

#### II.6.2.2.1 Principe

Le compostage nécessite que les déchets organiques sont broyés et débarrassés autant que

possible de leurs emballages. Il s'effectue en deux grandes étapes [20]:

**1 - L'étape de fermentation** : consiste à mettre les déchets préparés dans des andains (tas en extérieur) ou des casiers avec atmosphère contrôlée pendant un mois et demi. Durant cette période, les matières organiques se dégradent intensivement sous l'action des micro-organismes qui consomment l'oxygène et libèrent la chaleur, ce qui conduit à l'augmentation de la température des andains à environ **60 à 70 °C**. Cette montée en température permet d'éliminer les germes pathogènes contenus dans la matière organique et d'hygiéniser le compost. Au cours de cette étape, les matières à traiter doivent être arrosées afin de garantir un taux humidité optimum et de maintenir une température moyenne (**70 °C**) [20,21].

**2 - L'étape de maturation** : cette étape dure deux mois, elle se caractérise par une dégradation lente des composés organiques résiduelles jusqu'à l'obtention d'un produit organique stable riche en humus, dit « **compost** » qui va ensuite tamisés afin de récupérer un compost plus ou moins fin, exempt d'indésirables [20,21].

En fin, le compost est stocké pendant trois mois minimum pour être affiné puis chaque lot de compost est analysé avant d'être mis en vente afin d'assurer sa qualité et son intérêt agronomique [20].



**Figure II.4:** Schéma du compostage.

### II.6.2.2.2 Produit du compostage

Le compostage engendre également la production du compost mais d'une valeur agronomique différente que celle issue de la méthanisation [20].

### II.6.3 Traitements thermiques

La destruction des déchets par voie thermique avec valorisation (énergétique et/ou matière) de leurs contenus est réalisée de quatre manières différentes [24]:

#### II.6.3.1 Pyrolyse

Appelée aussi « **thermolyse** », est un processus de décomposition endothermique ( $\Delta H > 0$ ) consistant à décomposer la fraction organique des déchets en les chauffant en absence de l'air ou en atmosphère réductrice ( $O_2 < 2\%$ ) dans des fours hermétiques à température modérée variée entre **450** et **750 °C** [21,23].



Figure II.5: Schéma de la pyrolyse.

##### II.6.3.1.1 Types de pyrolyse

Deux types de pyrolyse peuvent être rencontrés [23]:

###### ✓ Pyrolyse lente

La pyrolyse est dite lente lorsque les déchets sont chauffés lentement (**~60 min**), à température moyenne variée entre **350** et **400 °C**. Dans ce cas, le produit majoritaire obtenu est un solide carboné appelé « **coke** » ou « **charbon** » [23].

###### ✓ Pyrolyse rapide

À l'inverse, la pyrolyse est dite rapide lorsque les déchets sont chauffés rapidement (**~1-10 min**), à haute température variée entre **500** et **750 °C**. Dans ce cas, le produit majoritaire obtenu est un « **gaz combustible** » [23].

### II.6.3.1.2 Valorisation des produits de pyrolyse

- ✚ Cas d'une pyrolyse lente, le coke peut être valorisé [23]:
  - ✓ Soit par combustion directe où l'énergie calorifique fournie est récupérée par chaudière [23].
  - ✓ Soit après transport, la valorisation s'effectue cette fois par autres types de combustion tel que co-incinération en cimenteries où après épuration est utilisé comme un combustible secondaire [23].
- ✚ Cas d'une pyrolyse rapide, le gaz combustible peut être [23]:
  - ✓ Soit brûlé directement où l'énergie calorifique fournie est récupérée par chaudière [23].
  - ✓ Soit craqué thermiquement et épuré afin d'alimenter un moteur thermique ou une turbine à gaz à des fins de production d'énergie électrique [23].

### II.6.3.2 Gazéification

La gazéification est un processus d'oxydation partielle endothermique ( $\Delta H > 0$ ), consistant à convertir des matières carbonées en un gaz combustible par le chauffage à haute température variée entre **850** et **900 °C** et en présence d'un agent limité de gazéification (air, oxygène, vapeur) [24,25].

#### II.6.3.2.1 Principe

La gazéification s'effectue en quatre étapes [25]:

- 1 - Séchage** : c'est l'étape durant laquelle l'humidité présente dans les déchets s'évapore [25].
- 2 - Pyrolyse** : les substances organiques contenues dans les déchets se décomposent sous l'effet thermique, en absence d'oxygène formant ainsi des matières volatiles sous forme d'hydrocarbures gazeux (goudrons) et du coke [25].
- 3 - Combustion** : les matières volatiles issues de la pyrolyse vont s'oxyder grâce à un apport d'air, ce qui entraîne l'augmentation de la température et l'apport d'énergie dans le réacteur [25].
- 4 - Gazéification** : c'est l'étape durant laquelle le coke issu de la pyrolyse est converti en un gaz combustible, appelé « **gaz de synthèse** » ou encore « **syngaz** » constitué essentiellement

de monoxyde de carbone (CO) et de l'hydrogène (H<sub>2</sub>) dans des proportions variables [25].

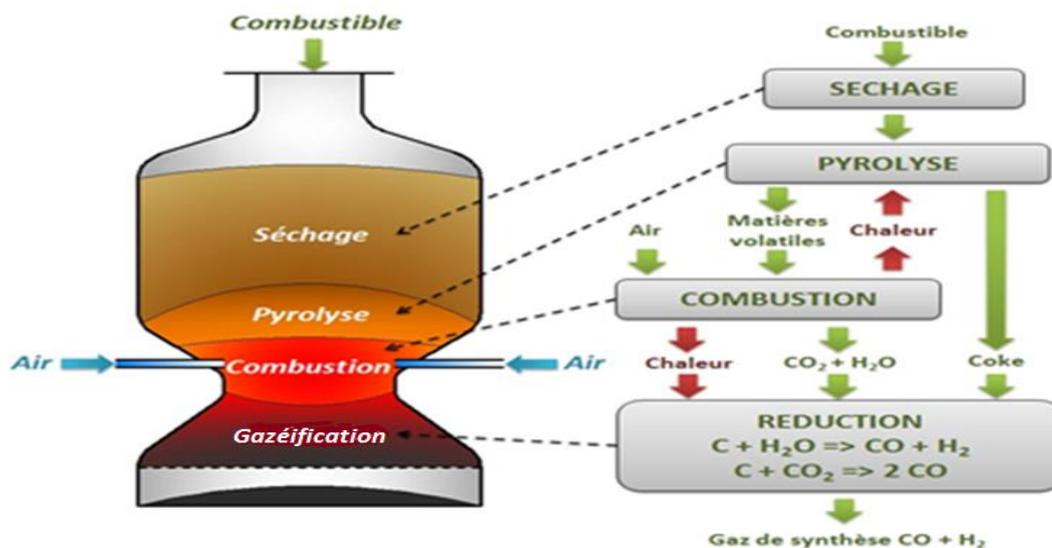


Figure II.6: Schéma de la gazéification.

### II.6.3.2 Valorisation du gaz combustible

Le gaz combustible issu de la gazéification va d'abord craquer thermiquement pour éliminer les goudrons puis épuré et refroidi à l'aide d'une chaudière permettant la production de la vapeur. Cette dernière peut être ensuite utilisée pour alimenter un réseau de chauffage, une turbine à vapeur couplée à un alternateur ou fonctionnant en cogénération [23,24].

### II.6.3.3 Incinération

L'incinération est un processus d'oxydation totale exothermique ( $\Delta H < 0$ ), consistant à brûler les substances organiques des déchets en présence d'excès d'air dans des fours à haute température variée entre 900 et 1000 °C [21,24].

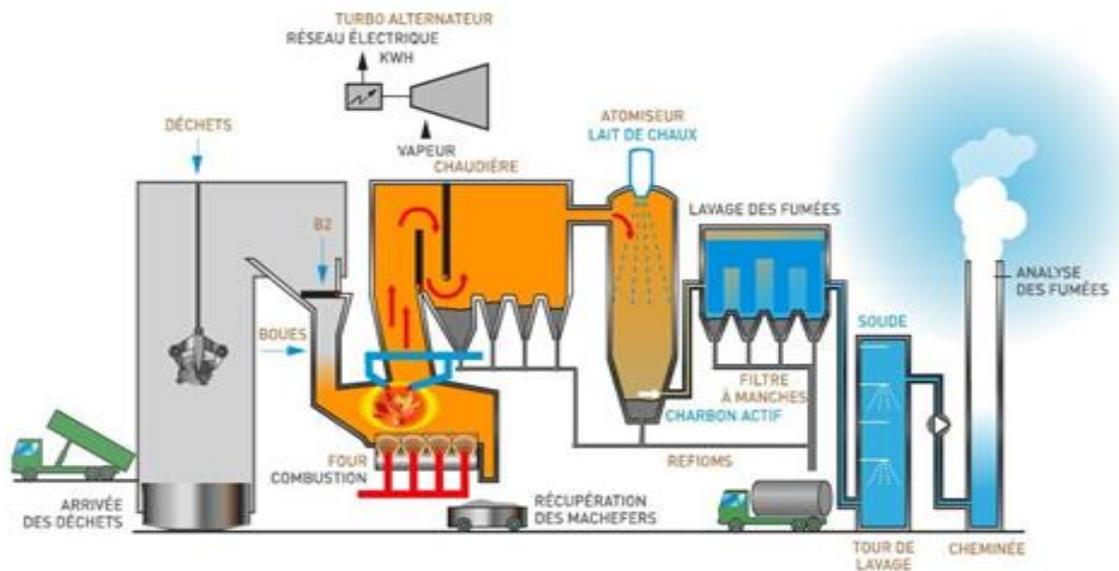
#### II.6.3.3.1 Principe

L'incinération se déroule en trois étapes [26]:

**1 - Séchage et dégazage :** durant lesquels l'humidité présente dans les déchets s'évapore et les matières volatiles se dégagent à température située entre 100 et 300 °C [21,26].

**2 - Pyrolyse et gazéification :** cette étape permet la décomposition des substances organiques en absence d'un agent oxydant et à température modérée variée entre 450 et 750 °C, suivie par la transformation des résidus carbonés vers la phase gazeuse (gaz de synthèse) via un agent limité de gazéification et à température plus élevée d'ordre 850 °C [25,26].

**3 - Oxydation:** les gaz combustibles générés lors de l'étape précédente sont oxydés [26].



**Figure II.7:** Schéma de l'incinération.

### II.6.3.3.2 Résidus de l'incinération

#### ✓ Les mâchefers

Sont des scories solides noirâtres de formes granulaires constituant des résidus silicieux, métalliques et des imbrûlés. Ils représentent environ **30%** de la masse des déchets incinérés. Les mâchefers sont valorisés essentiellement en technique routière sous forme de remblais (bords d'autoroute remblais de quais des voies ferroviaires, comblement de mines) ou en couche de forme rond-point, parking et autoroute [21].

#### ✓ Les cendres volantes

Sont des fines particules solides de poussière et de suie émises dans l'air, représentant environ **3%** de la masse des déchets incinérés [19]. Elles constituent des substances minérales (silice, calcaire) et d'autres polluants tels que les métaux lourds, le chlore, les dioxines et les furanes, etc. Compte-tenu de leurs propriétés polluantes, elles sont soit évacuées et stockées dans des CET de classe 1 après un traitement de stabilisation et de solidification qui permet de réduire leurs fractions lessivables, soit vitrifiées [20,21].

#### ✓ Les fumées

Sont des résidus gazeux, représentant environ **70%** de la masse des déchets incinérés. Ils constituent un grand nombre d'espèces gazeuses (la vapeur d'eau,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,

$\text{SO}_2$ ...). La valorisation énergétique (thermique et/ou électrique) des fumées s'effectue par leurs refroidissements à l'aide d'une chaudière permettant la production de la vapeur. Cette vapeur est condensée et peut être ensuite utilisée pour alimenter un réseau de chauffage urbain, transformée en électricité à l'aide d'un turboalternateur ou bien fonctionnant en cogénération [20,21].

La quatrième technique est le traitement par procédés plasmas thermiques, sera présentée et détaillée dans le chapitre suivant.

## *Chapitre III*

# *Traitement et valorisation des déchets par procédés plasmas thermiques*

### III.1 Introduction

Le traitement des déchets par procédés plasmas thermiques offre une nouvelle alternative environnementale et économique aux techniques conventionnelles de traitement des déchets. Ces techniques constituent une solution performante au problème d'élimination des déchets potentiellement dangereux, elles assurent soit la destruction définitive des éléments polluants, soit l'immobilisation et le confinement physique des contaminants dans une matrice vitreuse avec valorisation de l'énergie et/ou de la matière sans aucun risque de pollution future [9,18].

### III.2 Traitement et valorisation des déchets par procédés plasmas thermiques

Il existe plusieurs procédés de traitement des déchets par voie plasmas thermiques. Le choix du procédé dépend principalement de la nature du déchet à traiter (contenu en polluants, caractéristiques physiques, chimiques et/ou biologiques) et des objectifs de valorisation matière et/ou énergétique [18]. Parmi les nombreux procédés existant, nous pouvons mentionner les suivants :

#### III.2.1 Procédé de la vitrification

Actuellement, le procédé de la vitrification est utilisé comme un complément de la technique d'incinération. Il permet de traiter les cendres volantes (déchets hautement toxiques) issues de l'incinération et de valoriser un produit totalement inerte [27].

##### III.2.1.1 Principe

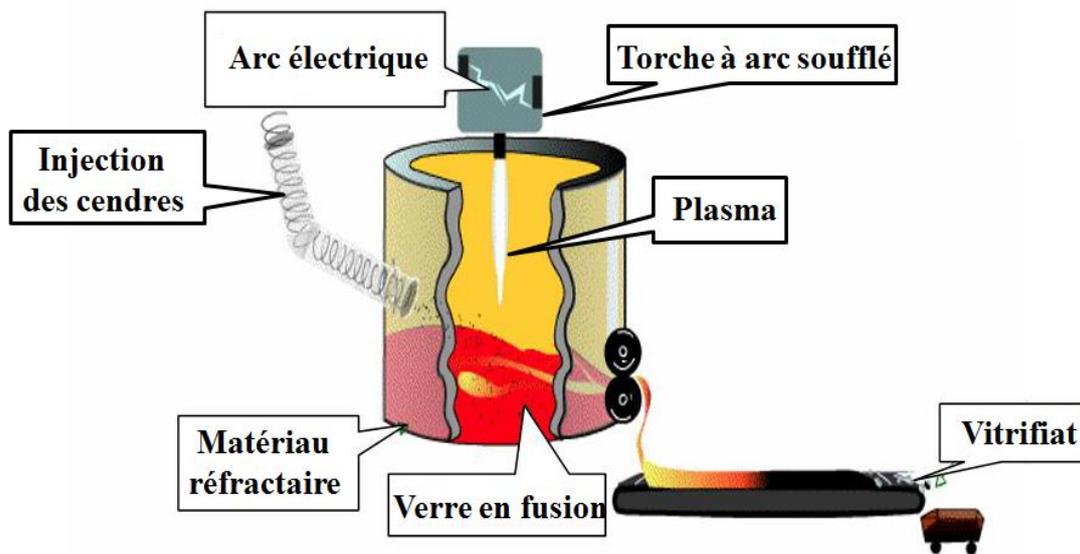
Tout d'abord, les cendres volantes sont introduites dans un four où elles sont fondues en étant soumises à une température extrême d'ordre **1500 °C**, obtenue à l'aide d'une torche à arc non transféré. La partie fondue est extraite à la base du réacteur et après un refroidissement brutal généralement dans un bain d'eau se présente sous forme d'une roche inerte, d'aspect vitreuse, généralement de couleur noir appelée « **vitrifiat** » [18,27]. Les gaz combustibles toxiques issus de la vitrification sont dès la sortie du four refroidis puis filtrés et peuvent être ensuite utilisés comme un combustible dans des turbines à gaz [27].

##### III.2.1.2 Caractéristiques du vitrifiat

- ✓ Très bon piégeage des métaux lourds [28].
- ✓ Pas de relargage des polluants [28].
- ✓ Produit stable dans le temps [28].



✓ Produit valorisable [28].



**Figure III.1:** Schéma du procédé de la vitrification des cendres.

### III.2.1.3 Valorisation du vitrifiat

Le vitrifiat obtenu est valorisé comme un matériau de remblai, de construction (les dalles de sol par exemple) ou agrégat pour les sous-couches routières [9].

### III.2.2 Procédé Inertam

Le procédé Inertam est consacré au traitement des déchets contenant de l'amiante qui est par définition une fibre minérale naturelle obtenue par broyage des roches constituant essentiellement de la silice ( $\text{SiO}_2$ ). Cette fibre est souvent présente dans les conduites de canalisations, les dalles ou les revêtements de sols, les faux-plafonds, les peintures... elle provoque plusieurs pathologies telles que le cancer des poumons ou l'asbestose [29].

#### III.2.2.1 Conditionnement et stockage des déchets amiantés

Avant d'entamer le traitement des déchets amiantés qui résultent généralement des travaux de destruction des bâtiments et de désamiantage des matériaux ou d'équipements amiantés, ils doivent être préparés [29]. En effet, les déchets amiantés ont la particularité d'être extrêmement friables et volatiles ce qui leur confère un fort potentiel de pollution, pour cela ils doivent être conditionnés immédiatement après leur dépose en doubles sacs étanches dont l'enveloppe extérieure comporte le pictogramme amiante, contenant en proportions variables des éléments inertes (amiante, verre, gravas...) et des combustibles (déchets plastiques, textiles...). Les sacs doivent être ensuite rassemblés dans des récipients de grande capacité,

nommés "**Big-Bag**" afin de limiter le risque de pollution et d'éviter l'augmentation des concentrations des fibres dans l'air [8,29].



**Figure III.2:** Schéma de stockage des déchets amiantés.

### III.2.2.2 Principe

Notons que, le procédé Inertam est le seule monde de traitement permettant la destruction totale et définitive de l'amiante avec valorisation d'un produit inerte. Il s'effectue en trois grandes étapes [8]:

#### 1 - Préparation de charge et broyage

Tout d'abord, les conteneurs des déchets amiantés sont déposés sur un chariot porte-conteneur automatisé sans chauffeur, se déplace via un sas à trois portes équipé d'un poste de lavage et de décontamination. Les déchets sont ensuite déversés sur le convoyeur d'alimentation du broyeur où ils sont broyés puis ils sont dirigés vers quatre stockeurs selon leurs types (silice, calcium, combustible, plâtre) [8].

Le convoyeur de chargement du four est alimenté simultanément par les quatre stockeurs des déchets broyés dont les proportions sont réglées par les automatismes et les besoins du four, ce qui permet d'obtenir un mélange fin et régulier ainsi que de garantir une bonne fusibilité des déchets [8].

#### 2 - Ligne de fusion

Les déchets amiantés sont injectés en continu dans un four où les fractions minérales sont fondues et les fibres d'amiante sont totalement détruites sous l'effet de haute température variée entre **1400** et **1600 °C**, obtenue à l'aide de deux torches à arc soufflé de puissance

égale à **2 MW**, fonctionnant à l'air comme un gaz plasmagène. Le matériau fondu est ensuite soutiré progressivement de la zone de fusion vers la zone d'affinage où une troisième torche de même type et de puissance inférieure (**700 kW**) que les deux autres agit [8,29]. Cette torche permet le maintien du cofalut (le produit résultant de la fusion des déchets amiantés) tout en repoussant les éléments infondus ou surnageant vers la zone de fusion. Concernant les fractions combustibles des déchets elles sont gazéifiées et les gaz résultant dans le four sont extraits puis dirigés vers un système de traitement des fumées [8].

### 3 - Evacuation du cofalut

La coulée du bain en fusion s'effectue dans une lingotière à partir d'un trou qui existe au niveau du four [8,29]. La lingotière est ensuite dirigée vers une zone de stockage pour le refroidissement à l'air libre puis elle retourne et le cofalut stocke sur une plateforme de stockage avant le concassage en vue de sa valorisation [8].

#### III.2.2.3 Valorisation du cofalut

Le cofalut est un matériau inerte semblable à un verre de couleur noir ou une roche basaltique selon sa composition et sa vitesse de refroidissement, il est notamment valorisé comme sous-couche routière. Actuellement, d'autres voies de valorisation sont à l'étude, notamment pour le stockage d'énergie solaire [8].

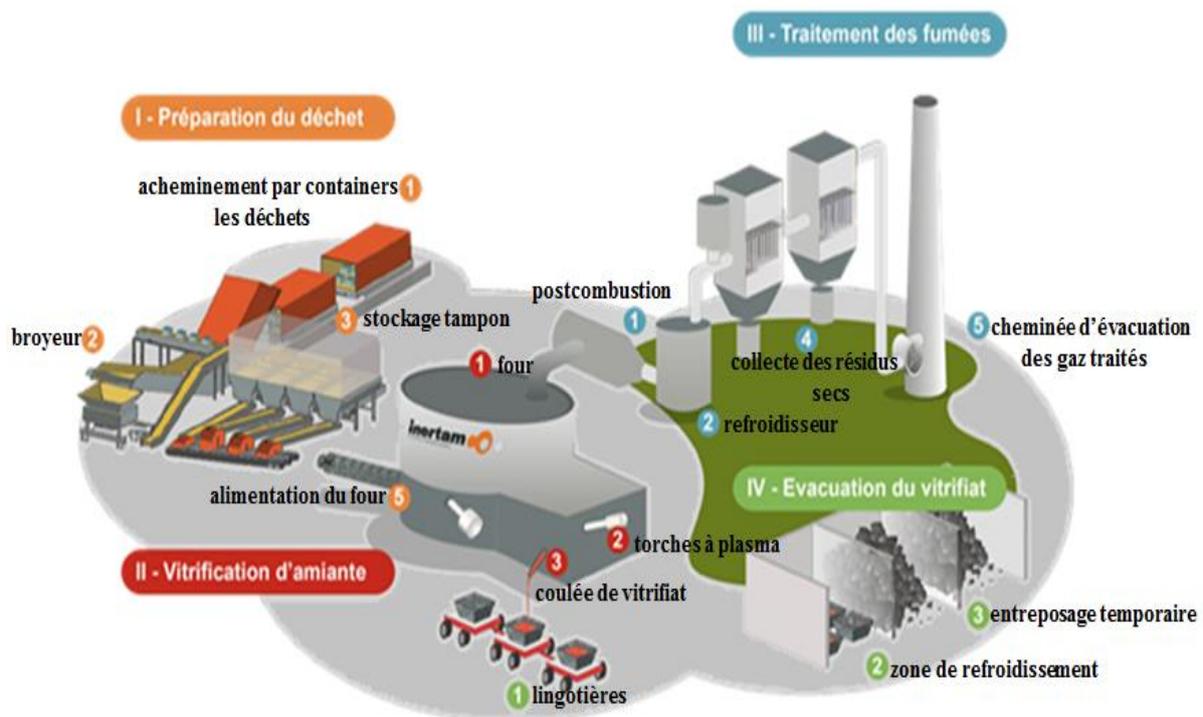


Figure III.3: Schéma du procédé Inertam

### III.2.3 Procédé Plasmox

Le procédé Plasmox est consacré au traitement des sols contaminés et les déchets nucléaires faiblement radioactifs. Il est muni d'une torche à arc transféré fonctionnant à l'air comme un gaz plasmagène, placée dans la chambre de fusion et de pyrolyse [10].

#### III.2.3.1 Principe

Tout d'abord, la charge préparée (sol contaminé + ajouts + traceurs) et préalablement broyée est introduite au travers d'un double sas à vis d'Archimède (un compartiment qui est rempli pendant que l'autre est en opération, ce dispositif permet une alimentation quasi-continue qui évite les bouffées du gaz de pyrolyse lors d'une alimentation en batch) où les déchets sont acheminés dans des fûts d'environ **250 L** [10]. Le fût à traiter pénètre dans le bâtiment du four où dans une première chambre, il est inerté à l'azote et perforé à l'aide d'une canne et d'une pompe à vitesse variable. La fraction liquide est aspirée et injectée avec un débit contrôlé dans la chambre de pyrolyse, le fût perforé est ensuite introduit dans un sas (peut accepter jusqu'à cinq fûts) qui est une fois chargé automatiquement, il est fermé et inerté à l'azote [10].

Lorsqu'un nouveau fût doit être introduit dans le four la porte du sas s'ouvre, le fût est avancé et saisi par un manipulateur qui le soulève et perce le couvercle. La porte se referme : le manipulateur abaisse le fût et l'amène en contact avec une rototrode (c'est une électrode en cuivre mise en rotation à grande vitesse autour de son axe pour déplacer le pied d'arc et répartir l'érosion sur toute sa surface) [10]. Lors de ce contact un arc électrique est amorcé entre l'extrémité de la rototrode et le fût, créant ainsi un plasma qui entraîne l'augmentation de la température de la chambre à plus de **1000 °C**. À cette température la paroi métallique du fût est rapidement fondue, la rototrode est mobile suivant les trois directions ce qui permet de tourner le fût autour de son axe et de le déplacer suivant la verticale, sachant que les ouvertures sont pratiquées dans le fût à partir du haut, il est vidé progressivement de son contenu pour éviter autant que possible les bouffées du gaz [10].

La matière minérale se mélange avec le fût ou ce qu'il en reste, le tout est ensuite lâché, fondu et se mélange au laitier. En ce qui concerne les matières volatiles générées lors de la pyrolyse, elles sont brûlées immédiatement avec un apport d'oxygène dans la chambre de combustion. En fin, le laitier (verre fondu quasi-inerte) s'écoule à travers la chambre de combustion dans un creuset placé dans une chambre spécifique à la décharge du verre fondu [10].

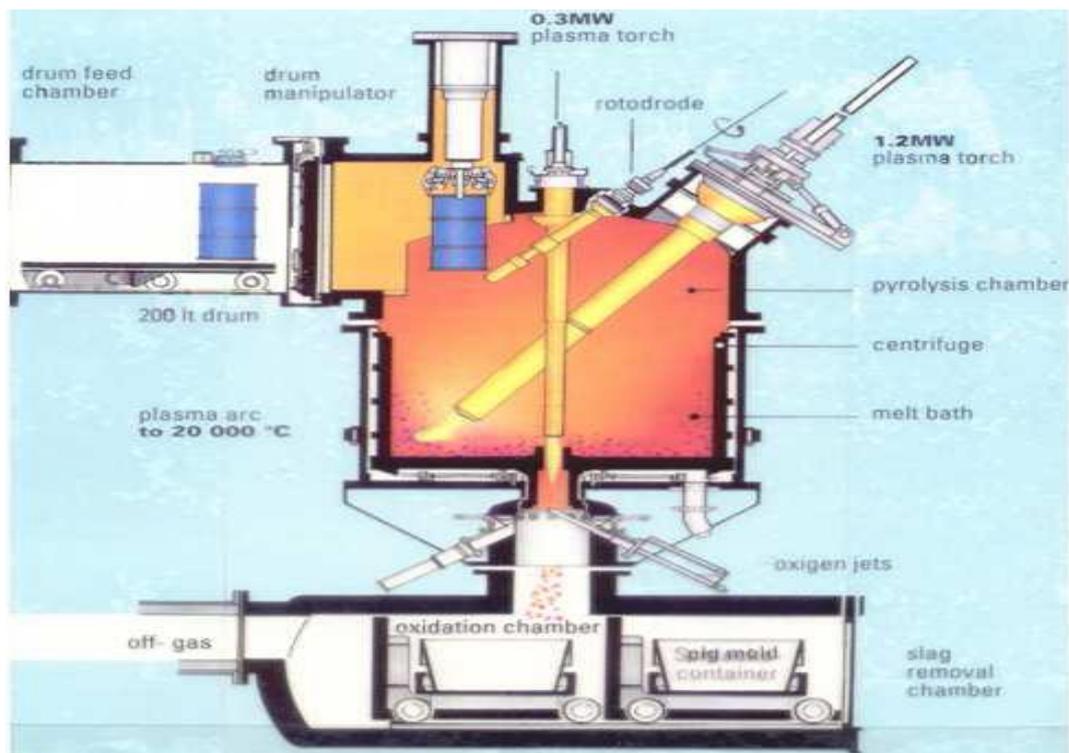


Figure III.4: Schéma du procédé Plasmox.

### III.2.4 Procédé SHIVA

Le procédé SHIVA d'acronyme « **Système Hybride d'Incinération Vitrification Avancée** », est consacré au traitement des déchets technologiques radioactifs. Ce procédé assure l'élimination totale de la fraction organique des déchets tout en stabilisant et en confinant leur fraction minérale, réduisant ainsi les risques de lixiviation de ces éléments dans l'environnement [5,30].

#### III.2.4.1 Description du réacteur

Le réacteur du procédé SHIVA dispose d'un creuset entièrement refroidi par la circulation d'eau afin d'éviter la corrosion des parois internes. Le creuset lui-même est équipé d'une sole inductive assurant le maintien en fusion du verre et deux torches à arc transféré localisées de façon inclinées au-dessus d'un bain de verre en fusion, fonctionnant avec un mélange d'oxygène et d'argon comme un gaz plasmagène [5,30]. Chaque torche comporte une électrode centrale mobile en graphite sacrificielle centrée à l'intérieur d'un corps externe en inox, refroidi par un circuit d'eau. Lorsque les deux électrodes mises en contact un plasma d'arc se crée [5].

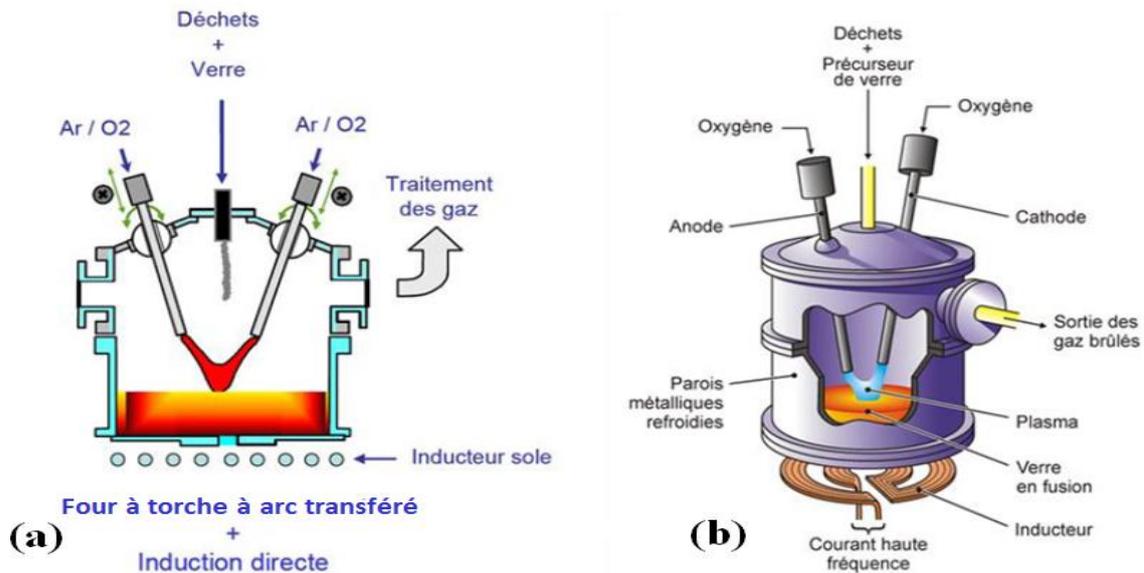


Figure III.5: (a), (b) Représentation 2D et 3D du réacteur du procédé SHIVA.

### III.2.4.2 Principe

Le principe du procédé SHIVA repose sur l'introduction des déchets fragmentés et une autre additive (le verre afin d'encourager la formation de la matrice vitreuse) d'une manière progressive dans un bain de verre en fusion où sous l'effet de haute température d'ordre **1200°C**, obtenue par le plasma créé d'une part, une combustion directe s'effectue entre la matière organique et l'oxygène présent [30]. D'autre part, une pyrolyse se produit pour les matières non exposées aux oxydants. Les composés volatils issus de la pyrolyse sont oxydés très rapidement à proximité du panache de plasma en étant soumises à une température extrême, formant ainsi des espèces réactives qui sont par la suite refroidies, filtrées et neutralisées dans un système de traitement des gaz connecté au réacteur [30]. Concernant la charge minérale des déchets, une partie est vaporisée sous l'effet de haute température et l'autre est intégrée dans la matrice vitreuse à l'aide d'un processus de digestion au niveau de l'interface [5].

En plus de le rôle majeur qui joue plasma, il est également utilisé pour initier la fusion du verre, évitant ainsi l'addition des éléments métalliques susceptibles au démarrage de la fusion du verre [5,30].

### III.2.4.3 Produits finis

Le procédé SHIVA génère des gaz inertes totalement décontaminés ainsi qu'un composé solide comportant la quasi-totalité des radioéléments présents dans les déchets, baptisé

« vitrifiat » qui est dirigé vers un site de stockage des déchets ultimes [30].

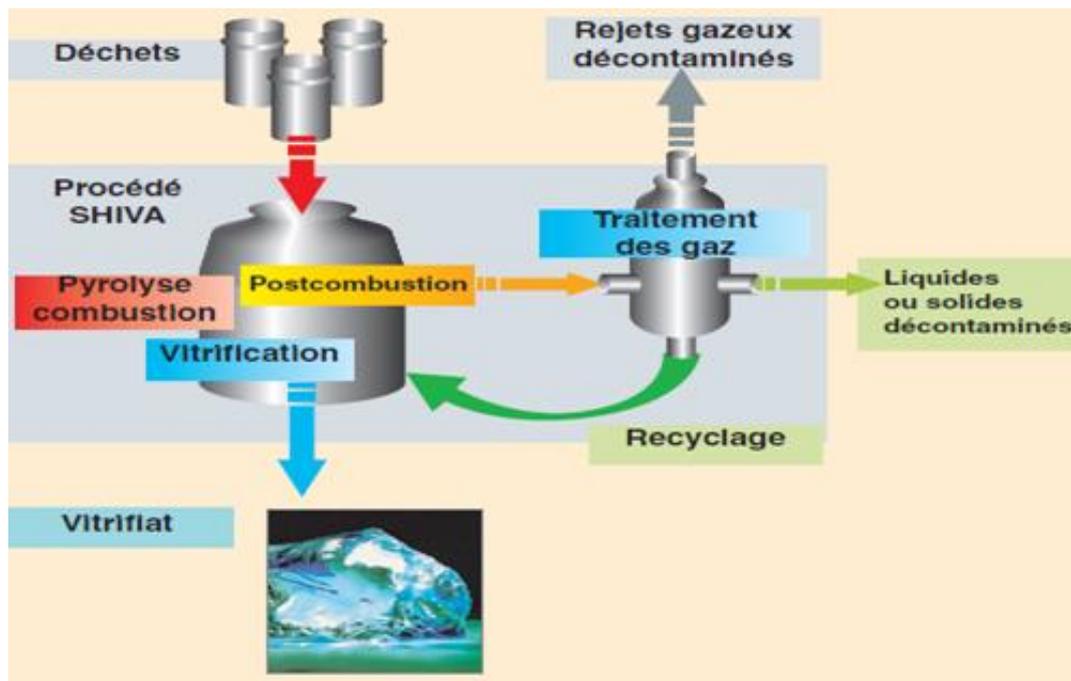


Figure III.6: Schéma du procédé SHIVA complet.

### III.2.5 Procédé CHO Power

Par définition, le procédé CHO Power est une gazéification moderne repose sur l'association d'un procédé de gazéification et d'une technologie innovante de torche à plasma. Ce procédé permet de traiter efficacement tout type de biomasse ainsi que les déchets non dangereux et de valoriser une électricité de proximité propre et continue [8].

#### III.2.5.1 Principe

Le procédé CHO Power se divise en trois grandes étapes [8]:

##### 1 - Préparation du combustible

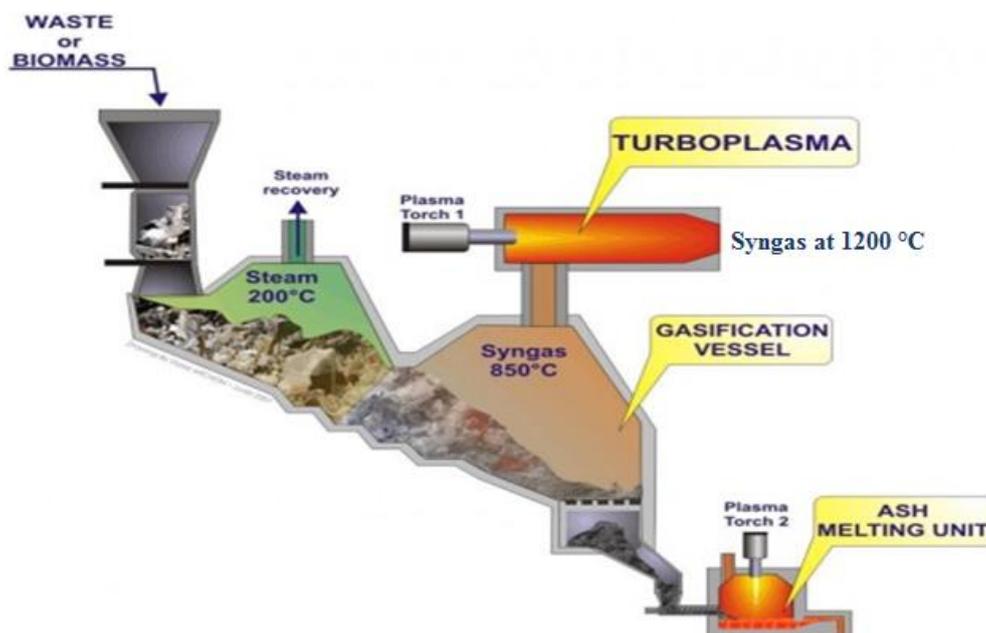
Dans cette étape, le procédé CHO Power fait appel aux techniques de broyage, de tri et de séparation matures et reconnues ; les déchets sont initialement broyés puis les matières inertes lourdes et les métaux sont retirés. Après ces opérations, les déchets sont mélangés dans une zone tampon afin d'obtenir un combustible homogène appelé « CHO Fuel », garantissant le fonctionnement optimal de la suite du procédé [8].

##### 2 - Gazéification

Le CHO Fuel est introduit dans la partie inférieure du réacteur de gazéification où sous l'effet

de chauffage à une température d'ordre  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  se transforme en gaz de synthèse, constitué essentiellement de monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ) et de l'hydrogène ( $\text{H}_2$ ), chargé en goudrons [8]. Le gaz de synthèse résultant est ensuite acheminé vers un réacteur plasma, nommé « **Turboplasma** » où il est chauffé à haute température d'ordre  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ce qui permet de craquer thermiquement les goudrons tout en maximisant la quantité du gaz de synthèse produite et donc d'élever le rendement énergétique global du système [8]. Après cette opération qui est indispensable pour l'utilisation finale du gaz de synthèse dans les moteurs à gaz, le gaz de synthèse est refroidi, dépoussiéré et filtré afin d'obtenir un gaz propre, de qualité commerciale [8].

En ce qui concerne les résidus solides non gazéifiés, ils sont acheminés vers un four localisé à la sortie du réacteur de gazéification où ils sont fondus à l'aide d'une torche à arc et après refroidissement se présentent sous forme d'un solide inerte, nommé « **vitrifiat** » qui est valorisé comme agrégat routier ou matériaux de construction [24,26].



**Figure III.7:** Schéma du cœur du procédé CHO Power : le réacteur de gazéification avec un étage plasma.

### 3 - Production d'électricité et de chaleur

D'une part, le gaz obtenu est injecté dans des moteurs à gaz qui activent un alternateur afin de produire l'électricité. D'autre part, la chaleur récupérée sous forme de vapeur lors de refroidissement du gaz de synthèse et à la sortie des moteurs à gaz peut être utilisée pour alimenter une turbine à vapeur ou bien livrée à un client [8].

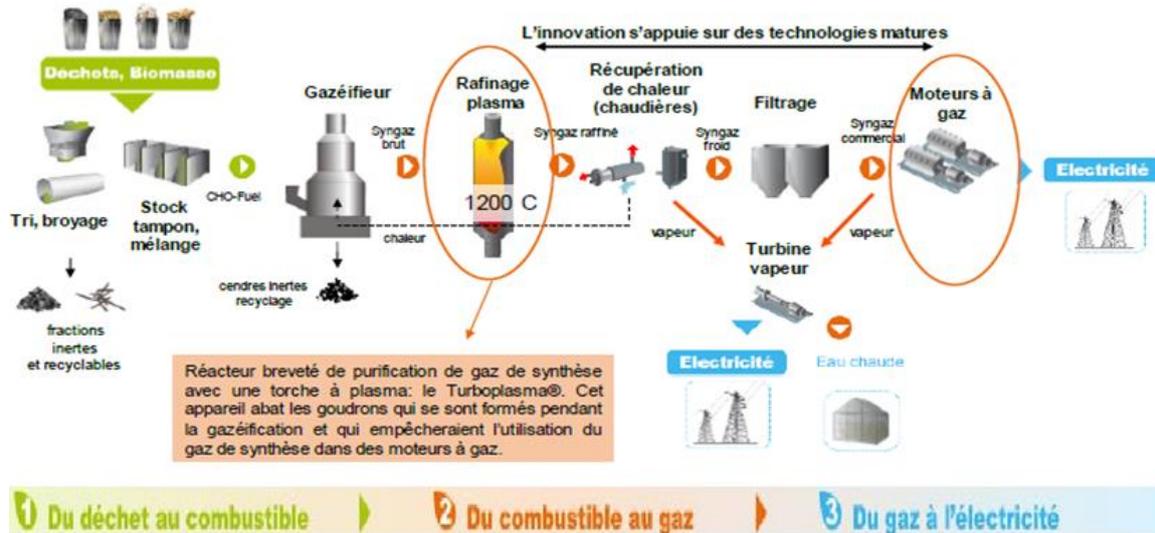


Figure III.8: Schéma du procédé CHO Power.

### III.3 Avantages et inconvénients des plasmas thermiques pour le traitement des déchets

Par rapport aux techniques conventionnelles de traitement des déchets, les procédés plasmas thermiques se distinguent par un ensemble des avantages, nous pouvons citer les suivants [3]:

- ✓ Une grande flexibilité d'utilisation (le démarrage et l'arrêt du système plasma ne prennent que quelques secondes) [3,10].
- ✓ Une très vaste gamme des déchets susceptibles à traiter par plasmas thermiques (solides, liquides, gazeux, organiques et inorganiques en mélange...) [10].
- ✓ Haute qualité de traitement (les taux de destruction des éléments polluants sont souvent supérieurs à **99,999 %** et aucun reformation des rejets polluants) [3,10].
- ✓ Les températures atteintes par les plasmas thermiques sont extrêmement élevées, les vitesses des réactions chimiques sont donc très rapides et les efficacités des procédés sont considérablement accrues [10].
- ✓ Les débits des gaz utilisés sont plus faibles, les réacteurs plasmas sont donc de petite taille et les dimensions des unités de traitement des gaz en aval sont réduites [10].
- ✓ Le choix du gaz plasmagène qui peut être le réactif chimique est quasiment illimité (classiquement: l'argon, l'hélium, l'azote, l'hydrogène, l'oxygène, l'air...) [10].
- ✓ Un meilleur rendement énergétique (la production de l'énergie est deux fois plus grande

que celle obtenue par le procédé d'incinération) [9].

- ✓ Plusieurs étapes de traitement des déchets peuvent être envisagées dans un seul réacteur c'est par exemple, le cas de l'incinération/vitrification des déchets technologiques radioactifs (procédé SHIVA) [10].

Cependant, le traitement des déchets par voie plasmas thermiques présente quelques inconvénients qui sont dus à leurs caractéristiques particulières, paradoxalement les mêmes qui apportent des avantages à leurs utilisations [10]:

- ✓ Les hautes températures atteintes peuvent engendrer une volatilité importante de certains métaux contenus dans le bain [10].
- ✓ La formation de certains composés indésirables est également possible du fait de la très grande réactivité chimique du milieu, par exemple les oxydes d'azote (**NO<sub>x</sub>**) formés dans un plasma contenant de l'azote et de l'oxygène [10].
- ✓ Les coûts de fonctionnement sont toutefois élevés en raison notamment de l'énergie dépensée pour alimenter la torche et celle pour récupérer les gaz sortants [9].

## *Chapitre IV*

### *Calcul du profil de la température*

### IV.1 Introduction

Afin de contrôler les procédures et améliorer le rendement des techniques plasmas et notamment celles qui utilisent l'énergie thermique du plasma, on a l'intérêt de connaître certaines propriétés telles que les phénomènes de transport d'énergie et la distribution de l'énergie thermique dans ces plasmas. Cette distribution de l'énergie thermique permet d'étudier le transfert thermique des plasmas d'arc avec les matériaux. Le plasma est un milieu réactif, afin de poursuivre étudier la cinétique chimique on a besoin de connaître les champs de la température.

Dans ce chapitre, nous nous proposons de déterminer les profils de la température dans les plasmas d'arc. Pour cela, nous allons donner les équations différentielles de base qui décrivent l'évolution de la température durant les régimes stationnaire et transitoire d'un arc électrique en se basant sur les propriétés thermodynamiques.

### IV.2 Calcul du profil de la température

#### IV.2.1 Mécanismes du transfert d'énergie aux particules

L'énergie est transférée à la colonne d'arc par l'intermédiaire du champ électrique appliqué. Compte-tenu de la grande masse et de la faible mobilité des particules lourdes, elles sont généralement peu influencées par la présence du champ. Ce sont donc les électrons qui sont très accélérés dans le champ électrique [11].

L'énergie totale fournie aux électrons est  $\sigma E^2$ , une fraction de cette énergie est transférée aux ions et aux neutres par collision élastique, le reste étant perdu par conduction thermique et par diffusion ambipolaire vers les parois ainsi que par collision inélastique et sous forme de rayonnement [11].

✚ L'énergie transmise aux particules lourdes lors d'une collision élastique est donnée par [11]:

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

Avec :

$m_e, n_e, T_e$  : sont respectivement la masse, la densité et la température des électrons,

$M, T_g$  : sont respectivement la masse et la température des particules lourdes,

$k_B$  : la constante de Boltzmann ( $k_B = 1.38066 \times 10^{-23}$  J/K),

$\nu$  : la fréquence des collisions.

✚ L'énergie perdue par conduction thermique des électrons est donnée par [11]:

$$\mathbf{W}_{th} = - \vec{\nabla} \cdot (\lambda_e \vec{\nabla} T_e) \quad (\text{IV.2})$$

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

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

Avec :

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

✚ L'énergie perdue par diffusion ambipolaire est donnée par [11]:

$$\mathbf{W}_{amb} = \left( \mathbf{E}_i + \frac{5}{2} k_B T_e \right) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot D_a \cdot \frac{\partial n_e}{\partial r} \right) \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

$D_a$ : le coefficient de diffusion ambipolaire.

✚ L'énergie perdue sous forme du rayonnement est donnée par [11]:

$$\mathbf{U}_{rad} = 4\pi \epsilon_N \quad (\text{IV.5})$$

Avec :

$\epsilon_N$ : le coefficient d'émission nette.

Le bilan total d'énergie des électrons s'écrit donc sous la forme suivante [11]:

$$\sigma E^2 = 3 \frac{m_e}{M} k_B (T_e - T_g) n_e - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \lambda_e \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \left( \mathbf{E}_i + \frac{5}{2} k_B T_e \right) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot D_a \cdot \frac{\partial n_e}{\partial r} \right) + \mathbf{U}_{rad} \quad (\text{IV.6})$$

### IV.2.2 Hypothèses de base

Dans le calcul du profil de la température, on suppose que :

- ✓ Le plasma est en équilibre thermodynamique local (ETL) et il est caractérisé par une seule température ( $T_e = T_g$ ).
- ✓ Le plasma a une symétrie cylindrique.
- ✓ La température  $T$  ne dépend que de la distance radiale  $r$ .
- ✓ La pression est constante ( $P = Cste$ ) à l'intérieur de la décharge.

- ✓ Le champ électrique est constant et uniforme radialement.
- ✓ Le plasma se comporte comme un gaz parfait.

### IV.2.3 Équations de base

Afin de déterminer le profil de la température, on doit résoudre un système de deux équations différentielles :

#### IV.2.3.1 Équation de conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse est donnée par [31]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v) = 0 \quad (\text{IV.7})$$

Avec :

$\rho$  ,  $v$  : sont respectivement la masse volumique et la vitesse du plasma.

#### IV.2.3.2 Équation 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 les espèces et en faisant apparaître l'enthalpie  $\mathbf{H}$  ( $\mathbf{H}=\mathbf{U}+\mathbf{PV}$ ) qui doit se conserver, on obtient l'équation de conservation sous cette forme [32]:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{H}}{\partial t} + \text{div} (\rho \mathbf{H} \vec{\mathbf{V}}) = \rho \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}) \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + \vec{\mathbf{V}} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \mathbf{P} + \vec{\mathbf{J}} \cdot \vec{\mathbf{E}} - \mathbf{U}_{\text{rad}} + \mathbf{W}_{\text{th}} \quad (\text{IV.8})$$

En faisant intervenir la chaleur spécifique à pression constante  $\mathbf{C}_P = \frac{d\mathbf{H}}{dT}$  et en remplaçant  $\mathbf{W}_{\text{th}}$  par son expression, on obtient :

$$\rho \mathbf{C}_P \left( \frac{\partial}{\partial t} + \vec{\mathbf{v}} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \right) \mathbf{T} = \frac{d\mathbf{P}}{dt} + \vec{\mathbf{V}} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \mathbf{P} + \sigma \mathbf{E}^2 - \mathbf{U}_{\text{rad}} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \lambda_e \cdot \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial r} \right) \quad (\text{IV.9})$$

La pression est supposée constante et uniforme, on obtient :

$$\rho \mathbf{C}_P \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} + \rho \mathbf{C}_P \mathbf{V} \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial r} = \sigma \mathbf{E}^2 - \mathbf{U}_{\text{rad}} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \lambda_e \cdot \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial r} \right) \quad (\text{IV.10})$$

En négligeant l'écoulement ainsi que les pertes par convection, on obtient alors :

$$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} = \frac{1}{\rho \mathbf{C}_P} \left( \sigma \mathbf{E}^2 - \mathbf{U}_{\text{rad}} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \lambda_e \cdot \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial r} \right) \right) \quad (\text{IV.11})$$

Dans un régime stationnaire, le premier membre de l'équation (IV.11) est nul ( $\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} = 0$ ), notre

équation se réduit donc à la forme simplifiée suivante [33]:

$$\sigma E^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \lambda_e \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) - U_{\text{rad}} = 0 \quad (\text{IV.12})$$

Ces équations requièrent la connaissance d'un certain nombre de grandeurs qui ne sont pas toutes aisément calculables à savoir les conductivités thermique et électrique ainsi que la puissance radiative libérée du plasma ou bien le coefficient d'émission nette [34,35,36]. L'évolution de ces grandeurs en fonction de la température est tirée de la littérature, elle est illustrée respectivement dans les figures IV.1, IV.2 et IV.3.

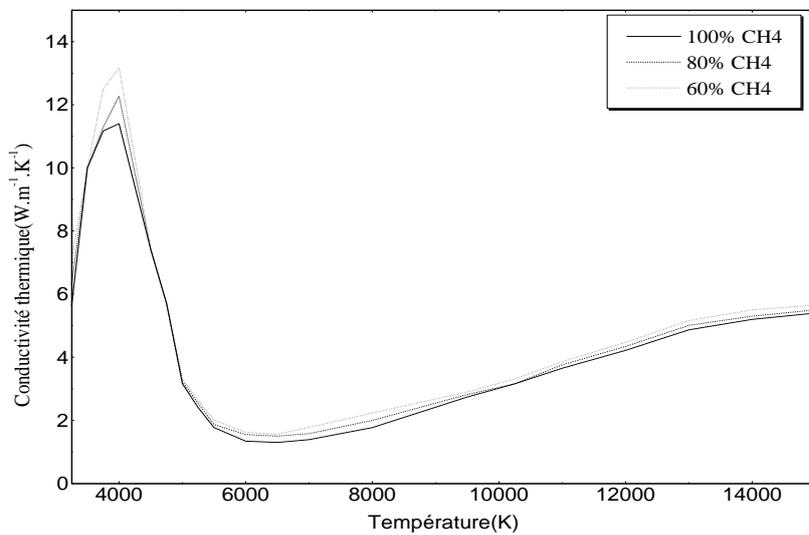


Figure IV.1: Conductivités thermiques de CH<sub>4</sub> pur et de mélanges CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>.

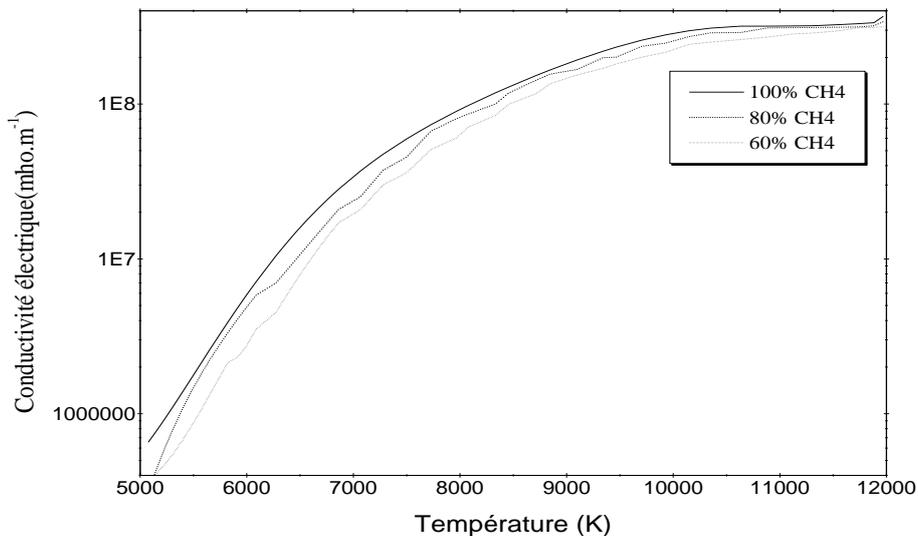


Figure IV.2: Conductivités électriques de CH<sub>4</sub> pur et de mélanges CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>.

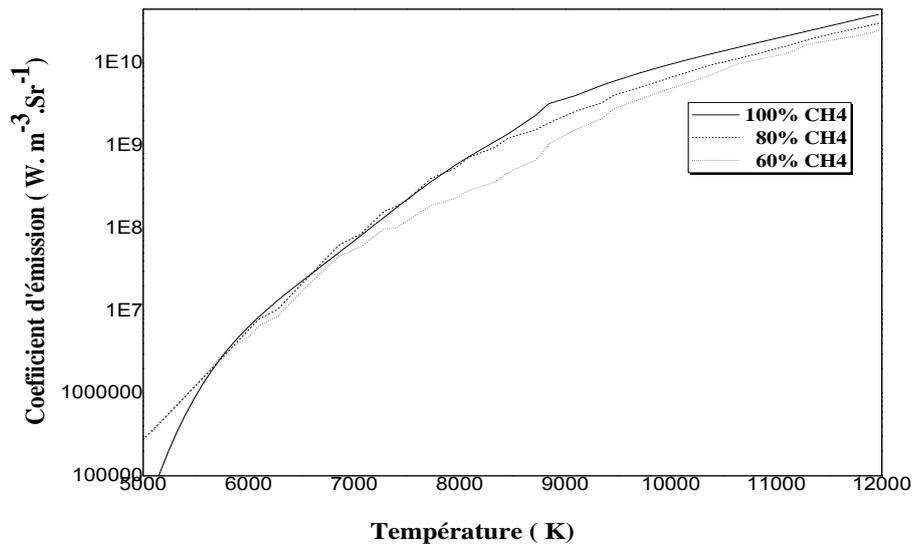


Figure IV.3: Coefficients d'émission nette de  $CH_4$  pur et de mélanges  $CH_4-H_2$ .

#### IV.2.4 Méthode de la résolution

La résolution des équations (IV.11) et (IV.12) a été réalisée numériquement par la méthode de **Runge-Kutta** d'ordre quatre (**RK4**), en tenant compte les pertes radiatives négligées aux travaux antérieures. [21].

Par définition, la méthode **RK4** est une procédure numérique d'intégration reposant sur le principe de l'itération c'est-à-dire qu'une première estimation de la solution est utilisée pour calculer une seconde estimation plus précise et ainsi de suite. Cette méthode garantit la précision des résultats ainsi que la stabilité des comportements et des problèmes physiques [37].

#### Principe

Soit l'équation différentielle du premier ordre suivante, modélisant un système physique [37]:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} = f(x, y) \\ y(x_0) = y_0 \end{cases} \quad x \in [x_n, x_{n+1}]$$

Avec :

$$x_{n+1} = x_n + h$$

La valeur approchée de  $y_{n+1}$  est calculée à partir de la valeur de  $y_n$  additionnée au produit de

la taille de l'intervalle entre les deux points ( $h = x_{n+1} - x_n$ ) par une moyenne pondérée des quatre pentes existant entre ces deux points. Les pentes sont faites comme suit [37]:

- $K_1$  est la pente au début de l'intervalle [38].
- $K_2$  est la pente au milieu de l'intervalle, obtenue en utilisant la pente  $K_1$  pour calculer la valeur de  $y$  au point  $x_n + h/2$  [38].
- $K_3$  est de nouveau la pente au milieu de l'intervalle mais obtenue cette fois en utilisant la pente  $K_2$  pour calculer la valeur de  $y$  [38].
- $K_4$  est la pente à la fin de l'intervalle, obtenue en utilisant la pente  $K_3$  pour calculer la valeur de  $y$  [38].

En résumé, la méthode **RK4** nous a fourni deux séries permettant de définir les valeurs de  $x$  et de  $y$  par les relations de récurrence suivantes [37]:

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + h \\ y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \end{cases}$$

Sachant que :

$$\begin{cases} K_1 = f(x_n, y_n) \\ K_2 = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} K_1\right) \\ K_3 = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} K_2\right) \\ K_4 = f(x_n + h, y_n + hK_3) \end{cases}$$

Notre calcul a été réalisé comme suit :

- Dans le cas d'un régime stationnaire, le calcul du profil radial de la température a été effectué pour un plasma de méthane ( $CH_4$ ) pur où nous avons examinés l'effet du pourcentage de l'hydrogène ( $H_2$ ) sur le profil de la température, de même nous avons examinés l'effet des pertes radiatives sur le profil de la température d'un plasma formé de mélange  $CH_4-H_2$ .
- Dans le cas d'un régime transitoire, le calcul du profil axial de la température a été effectué pour un plasma de l'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ) pur où nous avons examinés l'effet du pourcentage de la vapeur de cuivre ( $Cu$ ) sur le profil de la température.

### IV.4 Résultats et discussions

#### IV.4.1 Profil radial de la température dans un plasma de $\text{CH}_4$ pur

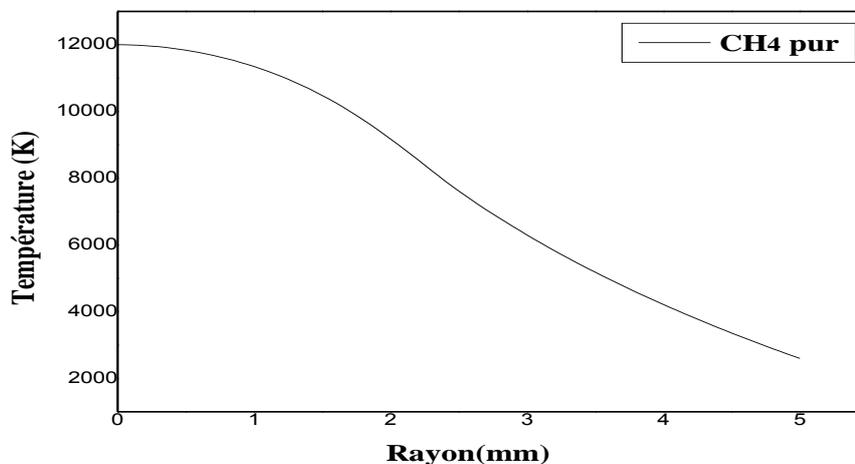


Figure IV.4: Profil radial de la température dans un plasma de  $\text{CH}_4$  pur.

La figure IV.4 représente l'évolution de la température radiale en fonction du rayon dans un plasma de  $\text{CH}_4$  pur, supposé cylindrique et en régime stationnaire. Le rayon de la décharge est fixé à 5 mm, l'intensité de courant électrique initiale est de 10 A pour une pression égale à une atmosphère ( $P = 1 \text{ atm}$ ).

Nous observons que la température décroît lorsque le rayon de la décharge augmente, elle passe de 12000 K (température axiale) jusqu'à une valeur de 2000 K à  $r = 5 \text{ mm}$ .

#### IV.4.2 Effet du pourcentage de $\text{H}_2$ sur le profil de la température

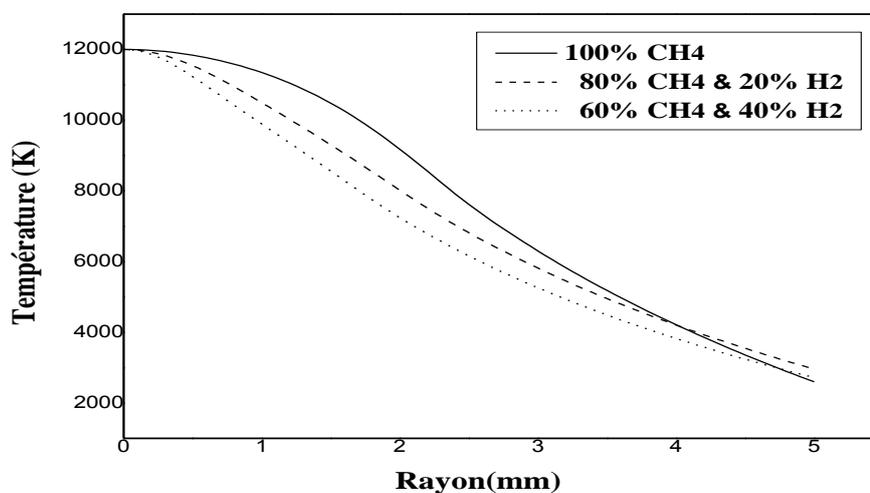


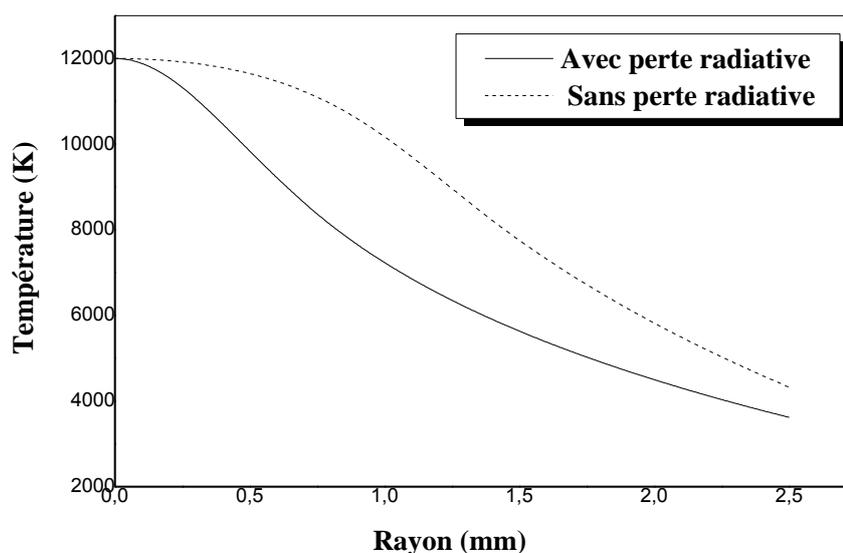
Figure IV.5: Profils radiaux de la température dans un plasma de  $\text{CH}_4$  pur et celui formé de mélanges  $\text{CH}_4\text{-H}_2$ .

La figure IV.5 représente l'évolution de la température radiale en fonction du rayon dans un plasma de  $\text{CH}_4$  pur et celui formé de mélanges  $\text{CH}_4\text{-H}_2$ . La valeur de la température axiale est fixée à **12000 K** et celle des parois à **2000 K**.

Nous observons que les trois courbes  $T = f(r)$  obtenues montrent une atténuation du gradient de température à  $T = 4000 \text{ K}$ . Cette atténuation se produit pour la valeur correspondant au pic des conductivités thermiques (voir ci-dessus la figure IV.1).

Nous remarquons également que la présence de l'hydrogène conduit à un abaissement dans le profil de la température par rapport à celui de  $\text{CH}_4$  pur car l'effet de l'hydrogène est beaucoup plus ressenti sur la conductivité électrique que sur le rayonnement (voir ci-dessus la figure IV.2 et la figure IV.3).

### IV.4.3 Effet des pertes radiatives sur le profil de la température



**Figure IV.6:** Effet des pertes radiatives sur le profil de la température d'un plasma formé de mélange  $\text{CH}_4\text{-H}_2$ .

La figure IV.6 montre clairement que la présence du rayonnement dans le mélange  $\text{CH}_4\text{-H}_2$  a une grande influence sur le profil de la température, cet effet mène à une diminution considérable dans le profil de la température.

Le rayonnement émis par le plasma représente donc un terme non négligeable 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.

### IV.4.4 Profil axial de la température dans un plasma de SF<sub>6</sub> pur

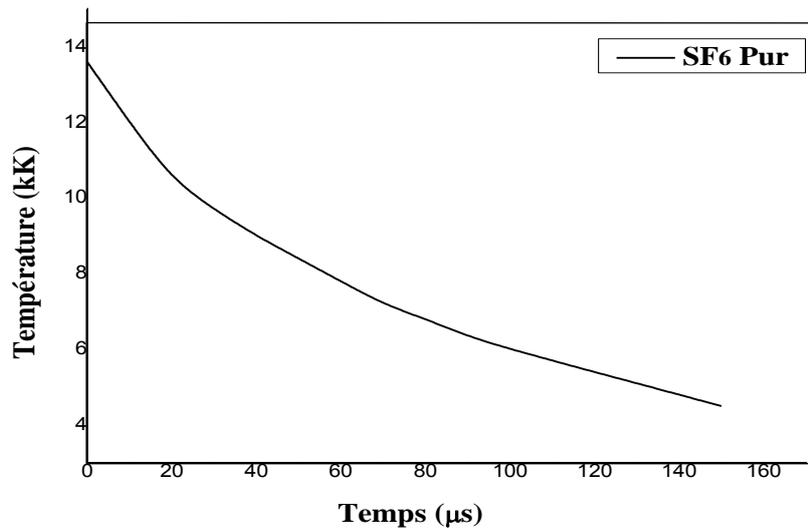


Figure IV.7: Profil axial de la température dans un plasma de SF<sub>6</sub> pur.

La figure IV.7 représente l'évolution de la température axiale en fonction du temps dans un plasma de SF<sub>6</sub> pur, supposé cylindrique et en régime transitoire.

Nous remarquons que durant la période étalée du début de l'extinction jusqu'à 50 µs la température décroît rapidement. Tandis que durant la deuxième période qui s'étale de 50 µs jusqu'à 150 µs la décroissance de la température est légèrement inférieure que la première période.

### IV.4.5 Effet du pourcentage de Cu sur le profil de la température

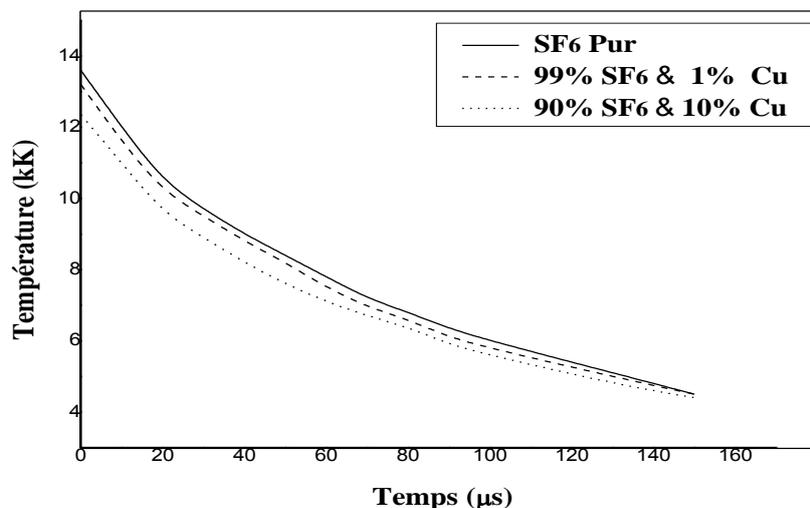


Figure IV.8: Profils axiaux de la température dans un plasma de SF<sub>6</sub> pur et celui formé de mélanges SF<sub>6</sub>-Cu.

La figure **IV.8** montre que la présence de la vapeur de cuivre conduit à un écart dans le profil de la température par rapport à celui de **SF<sub>6</sub>** pur, cet écart est dû à la conductivité électrique et aux pertes radiatives.

Nous observons qu'en présence de **1%** de la vapeur de cuivre le profil de la température est légèrement modifié, autrement dit l'écart produit est trop faible. Tandis qu'en présence de **10%** de la vapeur de cuivre l'écart produit augmente par rapport au premier cas.

# *Conclusion Générale*

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'intérêt qui apporte les plasmas thermiques dans le domaine de traitement et de valorisation des déchets.

L'objectif de ce travail de mémoire était de déterminer une grandeur fondamentale caractérisant les plasmas thermiques qui est « **le profil de la température** ». On s'est intéressé d'une part au profil radial de la température d'un plasma d'arc formé de mélanges de méthane (**CH<sub>4</sub>**) et de l'hydrogène (**H<sub>2</sub>**), dans le cas d'un régime stationnaire avec une géométrie cylindrique. D'autre part, au profil axial de la température d'un plasma d'arc disjoncteur formé de mélanges de l'hexafluorure de soufre (**SF<sub>6</sub>**) et de la vapeur métallique (**Cu**), dans le cas d'un régime transitoire.

Les résultats obtenus prouvent que le rayonnement émis par le plasma représente une limite prépondérante dans le bilan énergétique, son effet se fait ressentir beaucoup sur le profil de la température, de même la présence de l'hydrogène dans un plasma de **CH<sub>4</sub>** pur provoque un refroidissement du plasma.

La connaissance du profil réel de la température permettra de déterminer l'évaluation de la distribution de l'énergie thermique ainsi que l'étude des transferts thermiques et radiatifs du plasma avec d'autres particules. Elle permettra également de valider les résultats théoriques du rayonnement et des conductivités thermique et électrique.

## *Bibliographie*

- [1] [http : // dspace.univ-tlemcen.dz / bitstream /112/265/8/ Introduction-Hicham-ZEGGAI.pdf](http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/265/8/Introduction-Hicham-ZEGGAI.pdf).
- [2] M.I. Boulos, P. Fauchais, « Thermal plasmas : fundamentals and applications », vol 1 Springer-Verlag GmbH, New York, U.S.A.1994.
- [3] P. Fauchais, « Technologies plasma: applications au traitement des déchets », Université de Limoges, 2007.
- [4] P. Fauchais, « Plasmas thermiques: aspects fondamentaux », Université de Limoges, 2005.
- [5] M. Marchand, P. Charvin, S. François, A. Russello, R. Magnin, K. Poizot et F. Lemont, « Technologies plasmas appliquées aux traitements thermiques des déchets nucléaires », Journal international de technologie, de l'innovation, de la physique, de l'énergie et de l'environnement, Vol. 3, N°1, 6, 2017.
- [6] N. Kabbaj, « Étude du transfert radiatif d'un plasma thermique d'air : influence des propriétés radiatives dans la modélisation d'un arc libre », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2019.
- [7] H. Bahouh, « Modèle fluide d'une décharge plasma radiofréquence », Thèse de doctorat, Université de Constantine 1, 2014.
- [8] P. Catlin, Document de référence incluant le rapport financier annuel 2017, Société Europlasma SA.
- [9] Y. Cressault, « Le traitement des déchets par plasmas thermiques », Laboratoire de LAPLACE UE Découverte, 2008/2009.
- [10] Ch. Giroid, « Incinération/vitrification de déchets radioactifs et combustion de gaz de pyrolyse en plasma d'arc », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 1997.
- [11] S. Vacquie , « L'arc électrique », 75700 Paris, 2000.
- [12] P. L. Ratovoson, « Caractérisation expérimentale d'un arc impulsif », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2015.
- [13] P. Fauchais, « Plasmas thermiques : production et applications », Université de Limoges,

1990.

[14] R. Ramanantsoa, « Caractérisation expérimentale d'un plasma d'arc et de son interaction avec les électrodes », Thèse de doctorat, Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2011.

[15] P. Fauchais, « Plasmas thermiques aux puissances inférieures à 400 kW : applications », Université de Limoges, 2008.

[16] A. Kechaou « Étude du soufflage magnétique de l'arc électrique de soudage », Thèse de doctorat, Université de Liège, 2013.

[17] C. Routhier et G. Desjardins, « Soudage et assemblage – soudage », Guide d'auto-apprentissage, Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle & Centre d'élaboration des moyens d'enseignement du Québec, 2010.

[18] A. Kunégel, « Traitement des déchets par torche à plasma », 2010.

[19] F.A. Ahsene, « Étude des composés toxiques issus de l'incinération des médicaments périmés et des dasri », Thèse de doctorat, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2015.

[20] Ch. Hatik, « Proposition de scénarios de gestion raisonnée des déchets en vue de leur valorisation énergétique », Thèse de doctorat, Université de la Réunion, 2015.

[21] T. Bennama, « Les bases de traitement des déchets solides », Polycopié de cours, Université Mohamed Boudiaf-Oran, 2016.

[22] E. Grisey, « Impact de l'évolution des déchets d'une installation de stockage de déchets non dangereux sur l'environnement », Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2013.

[23] G. Antonini, « Traitements thermiques des déchets - Procédés et technologies associées », Université de Technologie de Compiègne, 2005.

[24] G. Antonini et M. Hazi, « Pyrolyse - Gazéification de déchets solides », Procedis, 2004.

[25] Ch. Rehmet, « Étude théorique et expérimentale d'une torche plasma triphasée associée à un procédé de gazéification de matière organique », Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris, 2013.

[26] « Incinération des déchets », Document de référence sur les meilleures techniques disponibles, Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer- République française, 2006.

[27] « La torche à plasma », Fiche technique, Centre national d'information indépendante sur les déchets-Paris.

[28] [http://www.association-arc-electrique.org/mediatheque/Le\\_Traitement\\_Des\\_Dejets.pdf](http://www.association-arc-electrique.org/mediatheque/Le_Traitement_Des_Dejets.pdf).

[29] M. J. Bougrini, « Amiante : quelles sont les alternatives à l'enfouissement et est-ce que la valorisation est possible ? », Mémoire de master, Faculté ingénierie et management de la Santé-ILIS, 2016/2017.

[30] F. Lemont et Ch. Girold, « Apport du plasma pour le traitement des déchets par incinération / vitrification. Le procédé SHIVA », Département d'études du traitement et du conditionnement des déchets.

[31] B. Liani, « Calcul du coefficient d'émission nette dans les plasmas thermiques formés de mélanges de gaz et de vapeurs métallique », Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, N°1103, 1992.

[32] A. Gleizes et al, « Effect of pressure on thermodynamic properties of CH<sub>4</sub> thermal plasmas mixed with H<sub>2</sub> », J. Phys. D: Appl. Phys. 26, 1921-1927,1993.

[33] S. Vacquié, « Influence of metal vapours on arc properties », Pure &App/. Chem, Vol.68, N° 5, pp. 1133-1136, 1996.

[34] B. Liani et al, « Computation of net emission of CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> thermal plasmas », J. Phys. D: Appl. Phys. 30 2964,1997.

[35] H. Abdelhakim, J.P. Dinguirard and S.Vacqui, « Effects of metal vapor on electron temperature in helium gas tungsten arcs », J. Phys. D: Appl. Phys. 13 1427, 1980.

[36] J.B. Belhaouari et al, « Simulation of a decaying SF<sub>6</sub> arc plasma: hydrodynamic and kinetic coupling study », J. Phys. D : Appl. Phys. 31 1219, 1998.

[37] Z. Khedim, « Réalisation d'une interface Matlab pour la simulation des bioprocédés : application au modèle ADM1 », Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2013.

[38] [https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thodes\\_de\\_Runge-Kutta](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thodes_de_Runge-Kutta).

## Résumé

Dans ce travail, nous nous proposons d'étudier la distribution de l'énergie thermique dans les plasmas d'arc dans le but de déterminer les profils de la température. Le modèle mathématique utilisé repose sur les équations de conservation de la masse et de l'énergie. La résolution numérique de ce système d'équations est réalisée à l'aide d'une procédure de Runge-Kutta d'ordre quatre. Les données requises à cette modélisation sont les conductivités thermique et électrique ainsi que la puissance radiative libérée du plasma.

Les résultats obtenus montrent que le rayonnement émis par le plasma représente un terme non négligeable dans le bilan énergétique, son effet se fait ressentir beaucoup sur le profil de la température. Et que la présence de l'hydrogène influence également sur le profil de la température d'un plasma de méthane pur.

**Mots-clés:** Plasma thermique, Arc électrique, Profil de la température, Pertes radiatives, Méthode Runge-Kutta d'ordre quatre.

---

## Abstract

In this work, we propose to study the distribution of thermal energy in arc plasmas in order to determine the temperature profiles. The mathematical model used is based on the conservation equations of mass and energy. The numerical resolution of this system of equations is carried out using a Runge-Kutta of order four procedure. The data required for this modeling are the thermal and electrical conductivities as well as the radiative power released from the plasma.

The results obtained show that the radiation emitted by the plasma represents a non-negligible term in the energy balance, its effect is felt a lot on the temperature profile. And that the presence of hydrogen also influences on the temperature profile of a pure methane plasma.

**Keywords:** Thermal plasma, Electric arc, Temperature profile, Radiative losses, Runge-Kutta method of order four.

---

## ملخص

في هذا العمل نقترح دراسة توزيع الطاقة الحرارية في البلازما القوسية من أجل تحديد ملامح درجة الحرارة. النموذج الرياضي المستخدم يعتمد على معادلات انحفاظ الكتلة و الطاقة. الحل العددي لهذه المنظومة من المعادلات يتم باستخدام إجراء رونج-كوتا من الرتبة الرابعة. البيانات المطلوبة لهذه النمذجة هي الموصلية الحرارية والكهربائية وكذلك الطاقة الإشعاعية المنبعثة من البلازما.

تبين النتائج المتحصل عليها أن الإشعاع المنبعث من البلازما يمثل عنصراً لا يمكن إهماله في توازن الطاقة، تأثيره يكون محسوس بشكل كبير على درجة الحرارة. وأن وجود الهيدروجين يؤثر أيضاً على درجة حرارة بلازما الميثان النقي.

**الكلمات المفتاحية:** البلازما الحرارية، القوس الكهربائي، درجة الحرارة، الخسائر الإشعاعية، طريقة رونج-كوتا من الرتبة الرابعة.