

# Généralités

## I.1 Introduction

L'expérience fondamentale sur les plasmas fut réalisée en 1813 par H. Davy qui découvrit la décharge capacitive à courant fort. Connue sous le nom d'arc électrique. La décharge inductive ne fut réalisée que tardivement par W. Hittorf en 1884 [1].

Depuis la technologie des plasmas n'a cessé d'évoluer au cours des années, passant d'un outil de laboratoire, à une source de plasma utilisée à l'échelle industrielle.

Le plasma ne fut identifié que vers 1928 par Langmuir [8], lors de ses travaux sur l'hydrogène atomique. Le vocable « plasma » ne passa dans le langage courant des physiciens que vers la fin des années 50.

Au début, la physique des plasmas était considérée comme la physique des décharges dans le gaz et décrite par des lois souvent plus qualitatives que quantitatives.

Aujourd'hui, les recherches qui se font dans ce domaine doivent maintenir un équilibre entre plusieurs théories : la théorie atomique et moléculaire, la théorie cinétique, les statistiques, les concepts fondamentaux des décharges dans les gaz, les équations des milieux continus, les propriétés thermodynamiques, de transport et de rayonnement etc.

Pour plus de clarté et pour une raison de terminologie, nous allons définir quelques notions utiles sur les plasmas, sur les plasmas thermiques, sur les plasmas thermiques inductifs, sur les installations à plasmas thermiques inductifs et sur les plasmas thermiques inductifs à basse fréquence.

## I.2 Les plasmas

L'état plasma constitue le quatrième état de la matière après les solides, les liquides et les gaz. Il est à noter, que plus de 99% de l'univers est à l'état plasma. Le plasma est un gaz ionisé.

Dans notre travail nous nous limitons à l'étude du plasma thermique. C'est un plasma en équilibre, connu aussi comme plasma chaud. Les deux plus importantes caractéristiques de ce

plasma sont l'égalité entre la température des particules légères (électrons) et celle des particules lourdes ( $T_e = T_i$ ) d'une part et l'existence d'un équilibre chimique d'autre part [9].

Par contre le plasma non thermique est un plasma en déséquilibre thermique, connu aussi comme plasma froid. Il est caractérisé par un grand écart par rapport à l'équilibre cinétique des particules ( $T_e \gg T_i$ ).

### I.3 Propriétés d'un plasma thermique

L'étude d'un phénomène aussi complexe que le plasma thermique demande dans son principe, en plus de la connaissance de la constitution de la matière, la connaissance des phénomènes élémentaires (tels que les collisions et les réactions entre particules) et des phénomènes collectifs (tels que la distribution des vitesses et par conséquent la température des particules) qui servent à déterminer les propriétés du plasma.

Les plus importantes propriétés d'un plasma thermique sont sa composition et ses propriétés électromagnétiques, thermodynamiques, de transport et de rayonnement. La connaissance de ces propriétés est très utile pour la modélisation d'un tel plasma.

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

La déviation du plasma de l'équilibre thermodynamique local en considérant le plasma à deux températures (une électronique et l'autre celle des particules lourdes) ne sera pas étudiée ici.

### I.4 Les plasmas thermiques inductifs

La technologie des plasmas à évolué pendant ces dernières années en devenant une science interdisciplinaire avancée. Les plasmas thermiques inductifs (plasmas sans électrodes) ont connu une pénétration industrielle tardive en comparaison avec les plasmas thermiques capacitifs ou plasmas d'arcs (plasmas avec électrodes). Ils sont très attractifs pour plusieurs applications industrielles, spécialement dans les procédés de traitement des matériaux.

Leurs avantages tiennent spécialement à l'absence d'électrodes, offrant ainsi [10] :

Une facilité d'opération sur une grande plage de conditions avec les gaz inertes. Oxydants ou réacteurs à pression atmosphérique ou à basse pression.

Un milieu de hautes températures et de très haute pureté.

Un temps de séjour des réactifs relativement important.

Les applications les plus intéressantes des plasmas thermiques inductifs peuvent être rangées en trois groupes [11] :

Outil thermique :

- Elaboration de monocristaux
- Sphéroidisation de poudre de matériaux réfractaire
- Réalisation de dépôt
- Fusion de verres
- Frittage sous plasma

Outil chimique :

- Synthèse de la silice ultrapure
- Synthèse de dioxyde de titane
- Synthèse de poudres ultrafines et ultrapure
- Affinage de métaux
- Réaction en chimie organique

Outil analytique :

- Source d'émission en analyse spectrochimique, avec comme applications :

Suivi du taux de pollution (métaux et métalloïdes) dans les eaux de rejet, les eaux de boisson, les cours d'eaux

- Contrôles métallurgiques

-Contrôle préventive des moteur d'avion, de camion et autres engins par l'analyse de l'huile de lubrification, l'analyse des traces d'impuretés dans les catalyseurs et le contrôle quantitatif des additifs

-Toute les analyse dans les domaines de la pharmacie, de la médecine et de la biologie (aliments, engrais, sol, ...).

On peut penser également que l'utilisation du plasma thermique inductif dans la destruction des déchets toxiques sera un outil très performant dans les années à venir. Elle en est au stade de développement, à l'état actuel.

### I.5 Les installations du plasma thermique inductif

Une installation du plasma thermique inductif est constituée d'une manière générale (fig.I. 1) :

- D'une alimentation électrique;
- D'un applicateur;
- D'un dispositif de distribution de gaz;
- D'un dispositif de contrôle et de régulation.

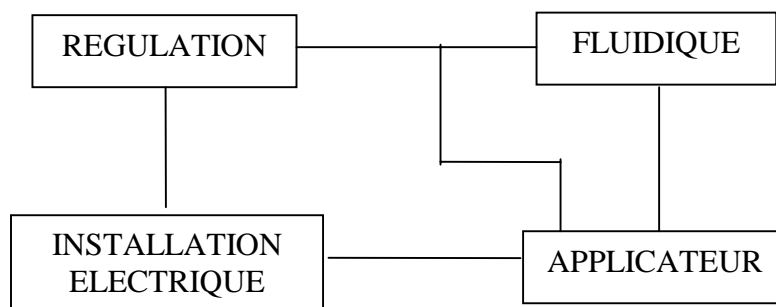


Fig.I.1 Installation de plasma thermique inductif.

L'alimentation électrique est un générateur de fréquence de type tournant (alternateur), ou de type statique (convertisseur).

Le type tournant moins utilisé dans les applications industrielles de plasma inductif opère simplement à basses fréquences, jusqu'à 50 kHz.

Par contre, le type statique est le plus souvent utilisé, il fonctionne à des fréquences allant jusqu'à 50 MHz.

Grâce aux progrès qui ne cessent d'accroître la connaissance sur les semi conducteurs, les générateurs à semi – conducteur (Thyristors ou Transistors) permettent, aujourd'hui, de couvrir une large gamme jusqu'à 500 kHz. Par contre, les seuls générateurs capables de fonctionner à des fréquences relativement élevées sont des générateurs à lampes triodes ou tétrodes.

D'une manière générale, un applicateur de plasma inductif thermique est considéré comme un transformateur, dont le primaire est un inducteur solénoïdal et dont le secondaire est constitué par la spire en court circuit du plasma électriquement conducteur.

Le plasma est contenu dans une enceinte en forme cylindrique ou annulaire, en quartz ou à cage métallique refroidie.

Le transfert d'énergie de l'inducteur vers le plasma dans ces applicateurs se fait par des couplage de natures différentes :

Le premier couplage se fait à travers l'air. Il est très utilisé à hautes fréquences et peu à basses fréquences. Il présente un couplage médiocre. Dans ce type d'applicateur, le plasma est contenu dans une enceinte cylindrique. Il est connu sous le nom de "Torche à Plasma Inductif" (Fig.I. 2) [12].

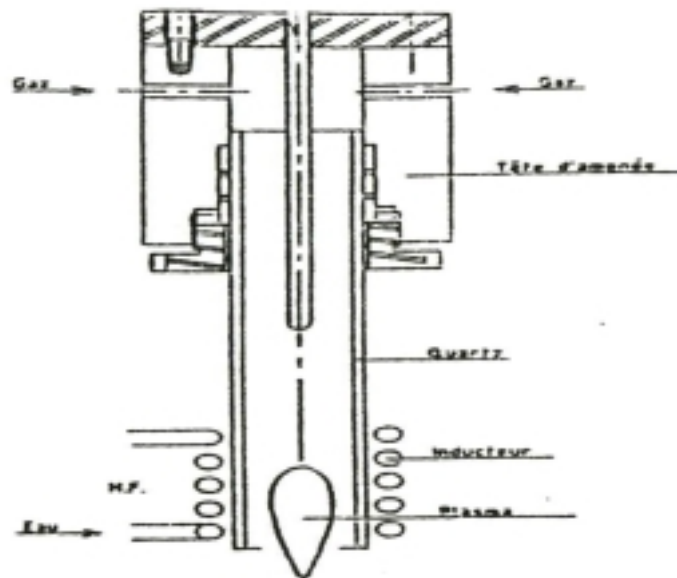


Fig.I.2 Torche à plasma inductif.

Le second couplage se fait à travers un circuit magnétique fermé, assurant un bon couplage. Ce type de couplage a été déjà utilisé, à basses et à moyennes fréquences, pour le chauffage d'anneaux ou de couronnes métalliques, de liquides, acides ou basiques. Dans son principe il peut être transposable, comme on va le voir ci après, à la génération de plasmas inductifs volumineux, de configuration annulaire. Il est alors connu sous le nom de "Transformateur à Plasma Inductif" (Fig. I.3)[5].

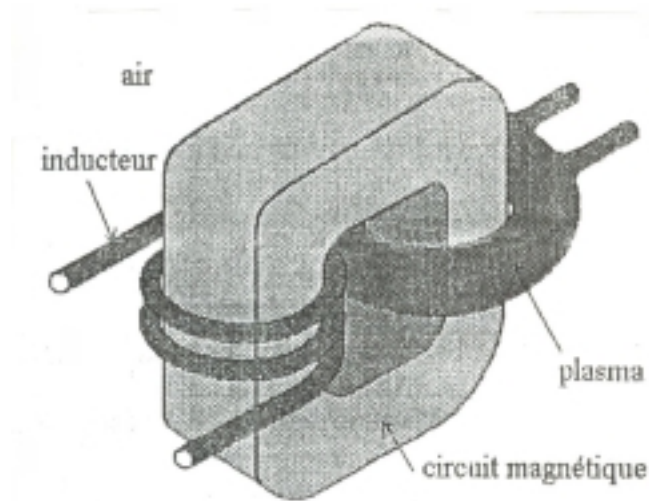


Fig.I.3 Transformateur à plasma inductif

Dans une torche à plasma inductif, pour accroître la puissance, il faut augmenter la fréquence et la tension du générateur. L'installation de torche à plasma par induction utilise une fréquence d'environ 4 MHz et une tension d'environ 7 KV.

En revanche dans un transformateur à plasma inductif on peut créer la même puissance avec des fréquences basse d'environ quelques dizaines de Hz et des tensions assez faibles de quelques centaines de volts. C'est pourquoi nous nous sommes dirigés vers l'étude des plasmas thermiques inductifs à basse fréquence.

## I.6 Plasmas thermiques inductifs à basses fréquences

### I.6.1 Avantage de la basse fréquence

Le développement des plasmas thermiques inductifs a été limité d'une part par la méconnaissance des performances de la technologie par des utilisateurs potentiels et d'autre part par des contraintes techniques et économiques [13].

Actuellement, les générateurs à moyenne fréquences (<500 kHz) ont connu un progrès très important. Ils utilisent des convertisseurs à semi – conducteurs dont le rendement énergétique atteint 90 %. Ils sont peu encombrants et de coût décroissant. Leurs avantages comparés à ceux à lampes triode sont nombreux [14] :

- Un rendement supérieur de 20 %;
- Un prix d'achat diminué de 20 à 30 %;
- Une surface au sol diminué de 30 à 60 %;
- Une consommation d'eau diminuée de 40 à 50 %;
- Une tension moins élevée.

Des installations de fortes puissances (100 à 500 kW) et de moyenne fréquence (50 à 500 kHz) sont déjà mise en opération (citons comme exemple la torche de l'EDF au laboratoire des Renardières à 200kHz).

Tout cela laisse à penser que les progrès faits sur les générateurs de fréquences seront liés aux développements technologiques des plasmas inductifs dans les domaines des fréquences voulues.

Toutefois, pour s'imposer définitivement dans le créneau des basses fréquences (<50 kHz), ces générateurs doivent prouver leur aptitude à répondre aux grandes impédances des nouveaux applicateurs qui utilisent des transformateurs magnétiques. Ces dans ce contexte qu'on va essayer de décrire ces nouveaux applicateurs et leur mode de fonctionnement.

### I.6.2 Différents types d'applicateurs à basse fréquence

Le maintien du plasma demande un minimum de tension de valeur efficace  $U_{ei}$  qui est induite autour de la circonférence du plasma. Cette tension est donnée par le taux de variation du flux magnétique permettant la décharge :

$$U_{ei} = \pi R^2 \mu \omega H_e \quad (1)$$

On sait qu'il y a une limite supérieure pour le nombre d'ampères tours au niveau primaire (liée à la disposition mécanique de l'inducteur), soit  $H_e$  cette limite ( $H_e I = nI$ ).

En maintenant la section constante (pour une raison de coût), pour ramener les hautes fréquences (R.F.) vers les basses fréquences (B.F.) en ayant la même tension  $U_{ei}$ , la seule solution est d'augmenter la perméabilité magnétique  $\mu$  dans toute ou une partie du trajet des lignes de champ. Cette augmentation peut se faire par l'introduction d'un circuit magnétique dans le dispositif (fig. I.4).

Si on garde une structure cylindrique pour l'applicateur, la seule solution est d'ajouter des barreaux magnétiques à l'extérieur de la torche.

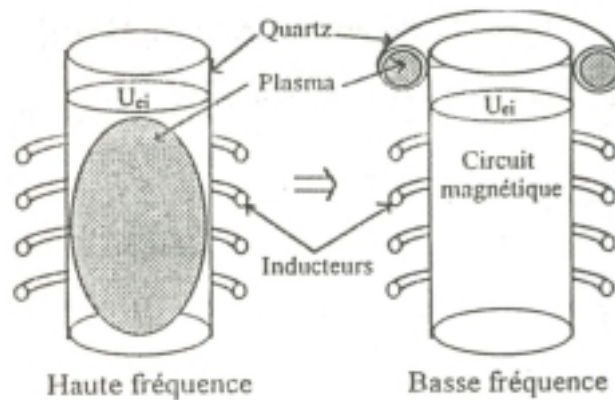


Fig.I.4 Transformation de la haute fréquence à la basse fréquence.

C'est la solution choisie par Charles E. Vogel à la fin des années 60. Il a testé dans le cadre d'une étude faite pour la N.A.S.A un nombre varié de plasmas inductifs cylindriques "Torches à plasma inductif" pour simuler des conditions d'opérations variées des lances rockets à noyau gazeux. Avec ce dispositif, il a réussi à obtenir des plasmas thermiques stables à 9600 Hz.

Dans le même temps, Hans U. Eckert travaillait sur un autre type de plasma connu sous le nom de plasma inductif annulaire "Transformateur à Plasma Inductif" (Fig.1. 3).

Dans ce dispositif, c'est l'enceinte contenant le plasma qui entoure le circuit magnétique. Le champ magnétique se ferme entièrement dans un milieu de perméabilité élevée. Le transformateur à plasma inductif est donc plus efficace au niveau de couplage électromagnétique. Le prototype développé par Eckert a donné des plasmas thermiques stables jusqu'à 400 tors mais au-delà de cette pression le plasma s'éteint.



En 1978, V. M. Gol'dfarb et S. V. Dresvin, partant sur le même principe qu'Eckert, mesurèrent les caractéristiques électriques et énergétiques d'un plasma torique à 8 kHz, opérant dans un milieu d'air et d'argon, à des pressions allant de 0.01 à 32 kPa et à des puissances de 3 à 30 kW [15].

Les travaux d'Eckert et de Dresvin, ne seront repris par d'autres chercheurs que plus tard. C'est au début des années 90, que trois laboratoires se lancent sur les possibilités de développement de ce type de plasma torique :

- Le "Los Alamos National Laboratory" aux Etats-Unis, 1991 [16].
- Le " Institute of Thermal Physics" au Novossibirsk, Russie, 1992 [17].
- Le "Laboratoire de Recherche des Techniques Inductives" en France, 1993 [18].

### **I.6.3 Critère de choix des applicateurs du plasma basse fréquence**

La torche cylindrique à barreaux magnétiques est une enceinte ouverte, comme c'est le cas du plasma haute fréquence. Elle peut être donc utilisée dans toutes les applications nécessitant un temps de séjour relativement court ou dans des applicateurs où on utilise le plasma à l'extérieur de la torche.

Le transformateur à plasma inductif, par contre, produit le plasma dans une enceinte presque fermée. De ce fait il empêche l'enlèvement des produits par le gaz et augmente ainsi le temps de résidence des produits. Il est donc adapté au traitement des déchets industriels (chimiques ou nucléaire). Il peut également être utilisé comme réacteur pour les réactions chimiques nécessitant une température élevée et un temps de traitement important.

Le transformateur à plasma inductif utilisé dans le laboratoire de recherche des techniques inductives « en France » 1993 a été dimensionné pour fonctionner à 10 kHz [18] . L'étude numérique tridimensionnelle a été faite par la méthode des éléments finis en spécifiant les conditions d'opération de ce dispositif.

Pour notre part, nous allons entreprendre cette étude faite à 10 kHz par une autre méthode appelée la méthode des volumes finis et cela pour deux raisons :

La première est de réaliser un code de calcul numérique propre car l'étude faite en éléments finis utilise un logiciel commercial « Flux expert » qui a une durée d'emploi bien

déterminé et à chaque fois, il demande de refaire l'abonnement, tout en essayant de reproduire les résultats trouvés par ce code.

La seconde est d'utiliser ce code pour une autre conception qui fonctionne à la fréquence industrielle 50 Hz, tout en cherchant les conditions de fonctionnement à cette fréquence. Cela va nous permettre de s'en passer des générateurs à des convertisseurs statiques qui demandent de gros moyens de coût, de maintenance et de refroidissement et d'utiliser l'alimentation industrielle moins coûteuse.