

# Chapitre I

## Les plasmas : définitions générales

### I-1 Introduction

Le plasma est un gaz partiellement ou totalement ionisé, suffisamment dense pour être quasi-neutre. Ce type de milieu constitue le quatrième état de la matière après l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. Un plasma est constitué de particules neutres (atomes, molécules, radicaux libres), d'ions positifs ou négatifs (particules ayant respectivement perdu ou capté des électrons) et d'électrons. Il existe aussi dans un plasma des atomes ou molécules dits « excités » (les électrons ne sont pas arrachés, mais portés dans des états d'énergie potentielle élevée en restant liés au noyau) qui peuvent se désexciter en émettant de la lumière. Cela permet à ce gaz d'être émetteur de lumière visible ou invisible (rayons X, ultraviolet [UV], infrarouge [IR], etc.).

Il existe de nombreux types de plasmas naturels (étoiles, vent solaire, foudre, ionosphère..) et artificiels (les plasmas de laboratoire : décharges dans un gaz, arcs électriques, plasma produit par laser, par onde de choc, plasmas de fusion thermonucléaire).

### I-2 Grandeurs caractéristiques

#### I-2-1 Le degré d'ionisation d'un plasma :

Le degré d'ionisation d'un plasma est un paramètre fondamental :

$$\alpha_i = \frac{n_e}{n_e + n_N}$$

où  $n_e$  et  $n_N$  sont respectivement les densités électronique et de neutres.

Les plasmas de décharge électrique qui nous intéressent ont des degrés d'ionisation typiquement inférieurs à  $10^{-3}$ . Ce sont les plasmas froids, par opposition aux plasmas chauds, beaucoup plus énergétiques et complètement ionisés que sont par exemple les plasmas de fusion. On distingue généralement deux catégories de plasmas froids :

- les plasmas dits à l'équilibre thermodynamique, ou thermiques, pour lesquels

$T_e \sim T_i \sim T$  (avec  $T_e$  température électronique,  $T_i$  température ionique et  $T$  température du gaz), Ces plasmas sont générés par exemple par les arcs électriques.

- les plasmas dits hors équilibre thermodynamique pour lesquels  $T_e > T_i \sim T$ . Ces plasmas ont l'avantage de pouvoir exister à faible température de gaz, ce qui les rend très attrayants pour les applications. Dans les décharges hors équilibre la fonction de distribution électronique est en général non Maxwellienne. C'est dans cette catégorie de plasmas froids hors équilibre que l'on cherche à développer des actionneurs pour le contrôle d'écoulement. En effet ils sont beaucoup moins consommateurs d'énergie que les plasmas thermiques, et beaucoup plus facilement « maniables » en raison de la relativement faible température de gaz dans ces plasmas.

### I-2-2 Longueur de Debye

On a vu qu'un plasma est un par définition un milieu dans lequel les densités d'électrons et d'ions sont suffisamment grandes pour que les forces électrique associées à ces charges maintiennent une neutralité macroscopique du milieu. Plus précisément un milieu plasma peut supporter une non-neutralité mais uniquement sur des dimensions dont l'ordre de grandeur est fixé par la longueur de Debye. On comprend intuitivement que la longueur de Debye est d'autant plus faible que la densité de plasma est grande, et croît avec la température des particules chargées.

La longueur de Debye électronique est donnée par :

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e q_e^2}}$$

$\epsilon_0 = 8,84.10^{-12} F.m^{-1}$  Avec  $k_B = 1,385.10^{-23} J.K^{-1}$ ,  $T_e =$  température des électrons

$q_e = -1,609.10^{-19} c$  . En dessous de cette longueur, on peut observer des écarts à la neutralité.

### I-2-3 Fréquence du plasma.

Le comportement collectif des plasmas se manifeste lorsqu'on écarte le plasma de l'équilibre pour lequel les densités des particules chargées sont spatialement homogènes. Le milieu retourne alors à l'équilibre en oscillant à la fréquence plasma électronique.

La pulsation plasma électronique s'écrit, si l'on ne considère pas les collisions, avec  $(n_e)$  densité électronique et  $(m_e)$  masse de l'électron:

$$\omega_e = \sqrt{\frac{n_e q_e^2}{\epsilon_0 m_e}}$$

### I-2-4 Les différents types de plasma:

Le terme plasma recouvre un vaste domaine que l'on peut en première approximation distinguer plusieurs types:

- Les "plasmas chauds" (étoiles, plasma de fusion...). La température des ions et des électrons est supérieure à 10 millions de degrés. Le gaz est complètement ionisé. (Equilibre thermodynamique)
- Les "plasmas thermiques" (arc électrique). Les électrons, les ions et les neutres ont une température unique voisine de 5000 à 50000 degrés. Le gaz reste partialement ionisé. (Equilibre thermique)
- Les "plasmas froids hors d'équilibre" dans ces plasmas les électrons ont une température supérieure à celle des ions ou des neutres. Les particules lourdes neutres ou ioniques ont même température de l'ordre de 300 à 1500 K. Le gaz est faiblement ionisé avec un taux d'ionisation compris entre  $10^{-6}$  et  $10^{-2}$ .

## I-3 Décharges électriques dans les gaz

### I-3-1 Définition général

On sait que les gaz sont généralement des bons isolants néanmoins, sous certaines conditions, il est possible de les faire traverser par un courant de particules chargées, on dit alors que le gaz est le siège d'une décharge. On entend alors par décharge électrique l'ensemble des phénomènes qui accompagnent le passage d'un courant électrique dans un milieu gazeux. Les premières études sur les décharges effectuées par le physicien Britannique Michael Faraday. Le mot « plasma » apparaît lui même dans les années 1920, sous la plume de l'Américain I Langmuir, qui étudie la décharge dans les gaz. Le gaz que nous désirons ioniser, est injecté dans une enceinte confinée sous vide partiel ou à pression atmosphérique. Le plasma est ensuite généré par l'action d'une décharge électrique dans le gaz, qui a pour rôle de transférer de l'énergie à ce gaz pour l'exciter et l'ioniser. En effet, du fait de leur faible masse, les électrons libres récupèrent l'essentiel de cette énergie et provoquent, par collisions avec les particules lourdes du gaz, leur excitation et ionisation et donc l'entretien du plasma .

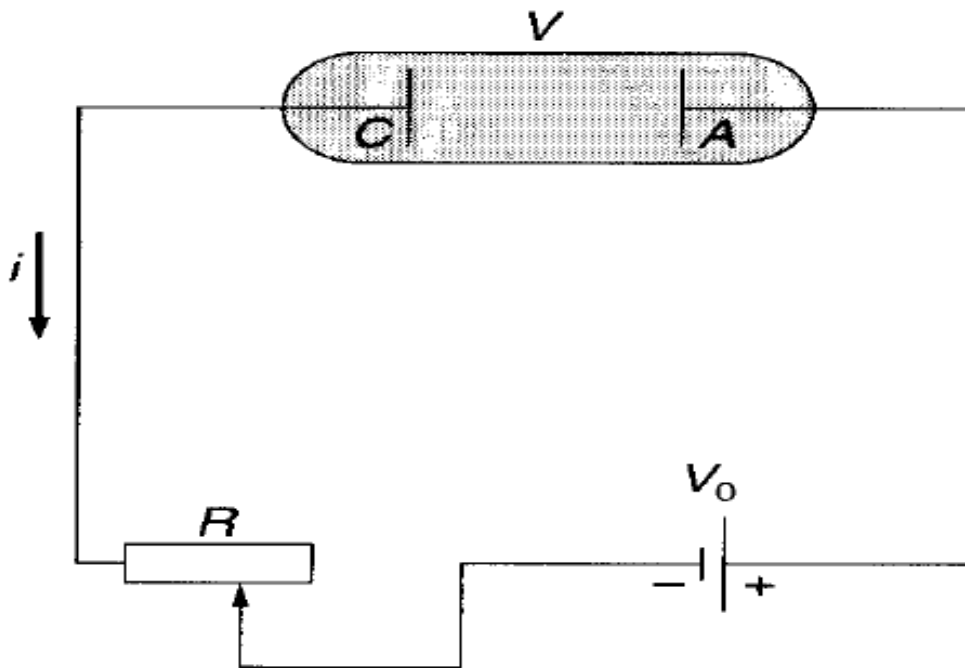


Figure 1.1 : Circuit d'alimentation d'un tube à décharge en courant continu.

On distingue plusieurs types de décharges électriques :

### I-3-2 Décharge non autonome

Aux courants très faibles, la décharge ne se produit que s'il existe une source extérieure produisant des charges électriques dans le gaz. Si la cathode est dans l'obscurité, l'agent de ionisation extérieur est constitué par les rayons cosmiques (Figure I.2, Branche A.B). Si la cathode est éclairée par la lumière contenant des rayons ultraviolets, les courants obtenus sont plus intenses (Figure I.2, partie A'.B) et croissent avec l'éclairement de la cathode ils sont dus à l'émission photoélectrique de la cathode. Dans les deux cas, si l'on supprime l'action de l'agent extérieur (arrêt de l'éclairement), on constate que le courant disparaît, la décharge ne s'entretient pas par elle-même ou dit quelle est non autonome [1].

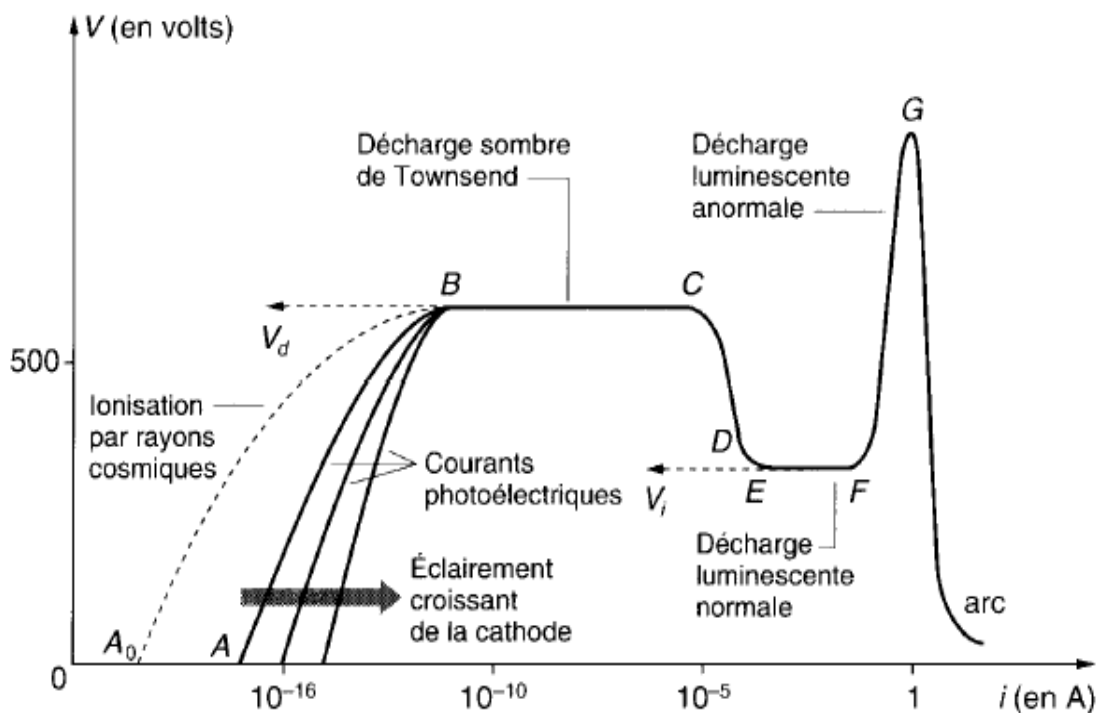


Figure I.2: Régimes de décharge en courant continu.

### I-3-3 Décharge Autonome (Zone de collection avec multiplication)

Lorsqu'on continue à faire croître la tension, un nouveau phénomène apparaît. Les électrons accélérés dans le champ inter électrodes acquièrent une énergie suffisante pour ioniser les atomes ou les molécules du gaz. Ils créent ainsi de nouveaux électrons qui sont aussi accélérés et peuvent ioniser d'autres atomes ou molécules. C'est une avalanche qui entraîne une augmentation extrêmement rapide de courant (partie c de la figure 1.2).

Il peut atteindre la valeur de 1 A si la pression est suffisante, le courant électrique n'est plus conditionné par existence d'un agent ionisant extérieure et n'est limité que par les résistances internes de la source, on pense ainsi en régime de la décharge de Townsend (partie D de la figure 1.2), qui est une décharge autonome ou autonome.

### I-3-4 Décharge de Townsend

Comme on peut le voir sur la figure 2, cette décharge est caractérisée par une résistance interne dynamique  $\frac{dV}{dI} = 0$ . Quelque soit la force électromotrice de la source la différence de potentiel aux bornes de la décharge est fixe et constant. Elle est appelée tension d'amorçage statistique  $V_s$ . la courbe de la figure 1.2 ne peut être décrite que si on fait varier le courant.

### I-3-5 Décharge lumineuse

Lorsque le courant de la décharge augmente la tension commence à décroître, cette partie constitue une zone de transition entre la décharge de Townsend et la décharge lumineuse [2]., dans cette zone on a  $\frac{dV}{dI} < 0$ . La décharge lumineuse est dite normale lorsque  $\frac{dV}{dI} = 0$ , et anormale lorsque  $\frac{dV}{dI} > 0$ . la décharge lumineuse normale se caractérise par l'apparition de plusieurs zones lumineuses diffusées et par une différence de potentiel constante entre les électrodes.

En repérant la position par un axe OX dirigé de la cathode vers l'anode, on observe successivement :

- L'espace sombre cathodique (dit de Crookes).
- La lueur négative : c'est une zone d'ionisation intense où sont produites les espèces de l'émission secondaire.
- L'espace sombre de Faraday.
- La colonne positive, repérée par sa forte luminosité : c'est la zone de loin la plus étendue. Elle est constituée d'un plasma neutre d'électrons et d'ions positives dans laquelle le champ électrique reste constant.

### **I-3-6 Décharge à haute pression (décharge d'arc)**

L'augmentation de courant de la décharge s'accompagne d'une augmentation d'une part de la densité du courant  $j$  et d'autre part de la gaine cathodique, les ions perdent leurs énergies par collision ils en fournissent d'avantage à la cathode dont la température s'élève localement. L'émission thermoionique de la cathode s'effectue à partir d'une région très localisée appelée spot cathodique. Lorsque cette émission devienne stable la partie de la courbe  $V = f(I)$  devient décroissante. On est donc en régime d'arc. La différence essentielle entre la décharge d'arc et la décharge luminescente se situe au niveau de l'émission cathodique l'apparition de l'arc est conditionnée par celle des phénomènes thermiques. Lorsque l'émission de courant devient très intense, la température s'élève localement, et contrairement au cas de la décharge luminescente (ou la totalité de la cathode est émissive), l'émission s'effectue ici à partir du spot cathodique.

## **I-4 Etude de l'arc électrique**

### **I-4-1 Historique de l'arc**

En 1774 un physicien britannique constate l'action chimique d'une décharge électrique dans l'air entre un fil de fer et la liqueur (solution de suc de tournesol dans l'eau) la partie supérieure commença à apparaître rouge et au bout de deux mn elle le fut parfaitement, mais l'état de connaissances de l'époque ne permettait pas encore d'établir les relations entre l'arc dans l'air et la production d'acide d'azote puis d'acide nitrique. Néanmoins l'expérimentation fondamentale sur l'arc électrique fut réalisée par Davy en 1813, il chercha à obtenir une étincelle entre deux petits cônes de charbon placés aux extrémités de deux conducteurs métalliques, en approchant

les charbon très près l'un de l'autre, il parvient à créer cette étincelle extraordinairement brillante et a la faire grandir en éloignant les charbons l'un de l'autre. Il constata que leurs pointes étaient portées à l'incandescence et que le courant continuait à passer dans l'air. Les charbons étant disposés horizontalement la forme que prenait systématiquement cette étincelle stable et resplendissante lumière amena DAVY à lui donner le nom d'arc électrique.

Les expériences menées dans l'air n'avaient qu'une durée très courtes en raison de la combustion rapide des charbons. Pour rendre ce phénomène permanent DAVY eut l'idée de placer les deux pointes de charbon dans le mauvais vide fourni par les machines pneumatiques c'est ainsi qu'il construisit l'appareil dite l'œuf électrique de DAVY.

#### **I-4-2 Définition de la colonne positive.**

C'est la partie inter-électrodes, cette zone de la décharge est la plus étendue spatialement, stationnaire. C'est l'archétype du plasma neutre faiblement ionisé, dans lequel le champ électrique est faible et relativement homogène, on en déduit que les charges positives et les charge négatives se neutralisent à l'échelle macroscopique:  $n_e = n_i = n$  ; elle sont animées de vitesse d'agitation thermique grande devant leurs vitesse (diffusion de concentration ou entraînement par le champ). Les propriétés de la colonne d'arc différent peut de celles de la colonne luminescente tant que la densité de courant n'est pas très élevée et que la pression ne dépasse pas  $0.1 \text{ atm}$  (arc à basse pression).

#### **I-4-3 Caractéristiques de l'arc**

L'arc électrique est une décharge électrique caractérisée par :

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



### I-3-4 Classification

On distingue deux types d'arc, en premier on a les arcs thermoïoniques, où l'émission cathodique est d'origine thermique ; les électrodes doivent être en matériaux réfractaires : carbone, tungstène, Tantale, Molybdène, etc. Parmi les arcs thermoïoniques, qui sont les plus courants, on distingue les arcs autonomes et les arcs non autonomes selon que la haute température de la cathode est maintenue par l'impact des ions accéléré par des moyens extérieurs de chauffage. Ensuite, les arcs à émission du champ, où les électrons sont extraits de la cathode sous l'effet d'un champ très élevé, qui peut être due, soit à une charge d'espace positive au voisinage immédiat de la cathode, soit à l'existence à la surface de celle-ci, d'une couche électriquement isolante, qui se chargera d'ions et sera ainsi portée à un potentiel positif très élevé. Ce genre d'émission électronique doit prévaloir dans le cas des arcs dits métalliques, où le matériau de la cathode n'est pas réfractaire : interrupteurs divers en Cuivre, Argent, or et redresseurs à cathode liquide de mercure. En fin, l'on peut faire fonctionner les arcs à basse pression ( $10^{-2} \text{ mmgh}$ ) ou chute pression, la ligne de démarcation étant située entre 0,1 et 1atm. La distance entre électrode peut varier de quelques microns à quelques mètres ; enfin la tension qui leur est appliquée est continue ou alternative.

### I-4-5 Génération de l'arc

L'arc est généré par l'émission thermoélectronique à la surface de la cathode. Ces électrons sont fortement accélérés dans la zone de la chute de tension cathodique, sous l'effet d'un champ électrique très intense qui règne dans cette zone, ils acquièrent alors une énergie cinétique importante qui leur permet de dissocier les molécules si le gaz plasmagène est poly atomique, puis d'ioniser les atomes neutres par collision. Les ions positifs qui se forment sont accélérés dans la direction opposée et viennent frapper la cathode, ils lui cèdent alors leurs énergies, ce qui permet d'entretenir l'émission thermoélectronique.

### I-4-6 Domaine d'application des arcs électriques

Le plasma d'une décharge se comporte comme un conducteur de l'électricité sous l'effet des courants parcourant la vaine gazeuse et des forces électromagnétiques qui en découlent, ce qui va provoquer une forte évaluation de la

température. La température du plasma utilisé dans l'industrie varie entre 6000 et 20000K ; la luminosité du jet de plasma est donc très intense et il faut s'en protéger. Le plasma est plus sensible aux effets de paroi, il a tendance à se contracter s'il rencontre une paroi froide. Les parois des générateurs de plasma qui doivent être refroidie pour avoir une durée de vie suffisante renforcent donc l'effet de striction des forces électromagnétiques. Les plasmas peuvent donc permettre d'améliorer les performances de certains processus thermique de fabrication, mais surtout rendent possible des applications délicates ou impossibles à réaliser avec d'autres méthodes telles que :

- application nécessitant de très hautes températures comme par exemple, la fusion de matériaux très réfractaires, métallurgie
- Réaction très endothermique.
- Réaction présentant de l'excitation trop lente aux températures usuelles.
- Réaction résultante de l'excitation des molécules et atomes, ce qui peut conduire à de nouveaux produits.
- métallurgie : découpage , soudure, production de nouveaux matériaux
- dans l'environnement ; destruction des déchets, stérilisation et dépollution.
- Production des nanotubes de carbone.