

## I.1 Introduction

Théoriquement, les gaz constituent des isolants électriques parfaits. Cela tient au fait qu'ils ne contiennent pas de particules chargées libres, mais seulement des atomes ou molécules neutres. En pratique, un gaz contient toujours un certain nombre de charges électriques libres dues à l'action de certains agents ionisants extérieurs permanents, tels que les radiations cosmiques, la radioactivité de la terre ou de celle de substances présentes dans l'atmosphère. L'application d'un champ électrique suffisamment intense à un gaz le rend plus ou moins conducteur et les phénomènes complexes qui s'y produisent portent alors le nom de décharges dans les gaz. Il en existe plusieurs types et parmi elle, La décharge couronne. [3]

Le terme décharge couronne désigne, en général, l'ensemble des phénomènes évoluant dans un milieu gazeux situé entre deux électrodes, dans l'une d'elles, de faible rayon de courbure, est active. Ce milieu est soumis à des champs électriques intenses mais non disruptifs.

L'objet de ce premier chapitre est d'effectuer une brève synthèse bibliographique sur les décharges électriques à la pression atmosphérique. Nous commençons dans un premier temps par un aspect historique de la décharge électrique. Ensuite, nous donnerons quelques définitions usuelles, nous rappellerons les différents types de la décharge électrique où nous allons nous intéresser à la décharge couronne à la pression atmosphérique. Ensuite, nous allons présenter la caractéristique courant-tension et pour terminer nous allons citer quelques avantages et inconvénients de l'effet couronne.

## I.2 Aspect historique

L'étude scientifique des décharges électriques a commencé au XVIII<sup>ème</sup> siècle par l'observation expérimentale d'étincelles produites par des générateurs électrostatiques et des éclairs d'orages. Ensuite l'invention de piles suffisamment puissantes a permis à V.V. Petrov de produire le premier arc électrique en 1803 dans l'air. Humphrey Davy en fit ensuite l'étude. Mais ce fut Michael Faraday qui, entre 1831 et 1835, découvrit et commença l'étude des décharges luminescentes en utilisant des tubes contenant des gaz à une pression de l'ordre de 100 Pa sous 1000 Volt. Par la suite, à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle et au début du XX<sup>ème</sup> siècle, la physique des décharges électriques dans les gaz a permis à la physique atomique de faire ses premiers progrès avec les travaux de William Crookes et de Thomson, avec en particulier la mise en évidence du rôle fondamental des électrons dans la décharge et la mesure du rapport  $e/m$ . Vers 1900, un élève de Thomson, Townsend, réalisa la première modélisation d'une décharge, correspondant au cas de la décharge luminescente en champ uniforme. Langmuir travailla aussi sur ces décharges et introduisit le concept du plasma. Au cours du XX<sup>ème</sup> siècle on passa à l'exploration des décharges électriques en

---

fonction de la fréquence, tandis que la modélisation progressait en raison du développement d'applications de plus en plus nombreuses des décharges. [4]

### I.3 Définitions

#### I. 3.1 Plasma

Le terme « plasma » a été proposé par Langmuir en 1929 afin de décrire un gaz ionisé. Par ordre croissant sur l'échelle des températures, les plasmas représentent le quatrième état de la matière après les états solide, liquide et gazeux. Plus précisément, un plasma est un gaz partiellement ou totalement ionisé, constitué d'un ensemble globalement électriquement neutre, comprenant des électrons, d'ions positifs et négatifs, d'atomes et de molécules.

A titre d'exemples, nous pouvons citer, d'une part, les plasmas dits naturels comme les flammes, la couronne solaire, les nébuleuses, les éclairs et les aurores, et, d'autre part, les plasmas de laboratoire dits industriels créés dans un réacteur et entretenus par une source d'énergie électrique.

Les plasmas créés en laboratoire sont donc définis comme d'excellentes sources d'ions positifs, de photons et de neutres réactifs. Plusieurs sources existent pour la production de ces plasmas tel que les sources DC (à potentiel continu), les sources RF (à fréquence radio avec couplage capacitif ou inductif) et les sources micro-ondes ( $\mu O$ ). Ces plasmas sont répartis, suivant leurs températures et leurs densités d'espèces chargées, dans une gamme allant de la température ambiante à faible pression, jusqu'à des températures pouvant atteindre plusieurs millions de degrés à des pressions plus élevées. Chaque type de décharge a un intérêt spécifique. La figure (I.1) représente un schéma de quatre états de la matière.

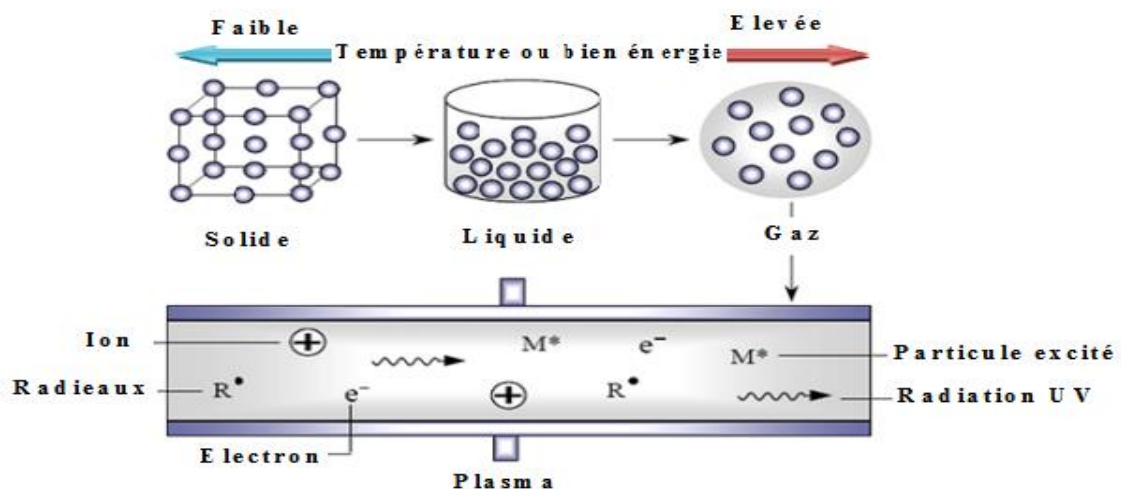


Figure I.1 : Représentation schématique des quatre états de la matière. [5]

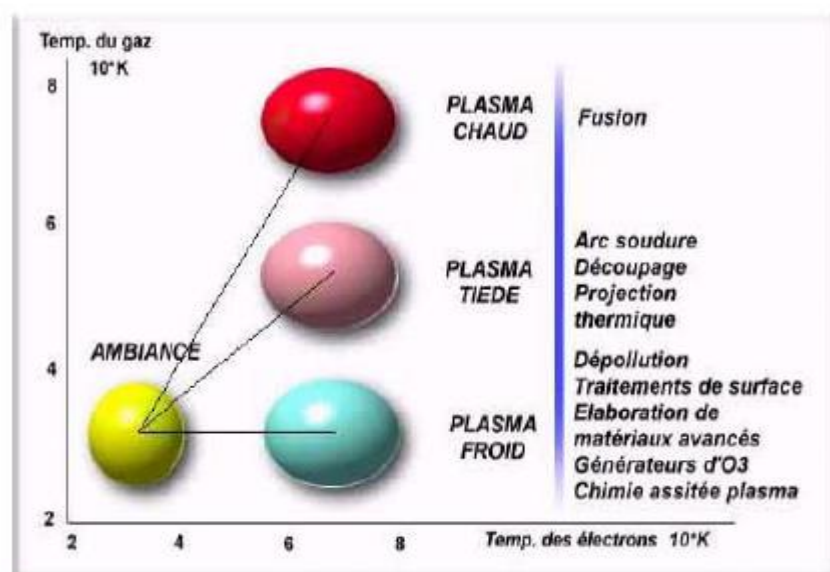
Selon la valeur de température ces plasmas peuvent être classés en deux grandes catégories : les plasmas chauds et les plasmas froids.

- **Plasmas chauds** : Ces plasmas sont complètement ionisés et se rencontrent dans les étoiles où se créent des réactions de fusion nucléaire. Ces plasmas représentent 99% de l'univers. Dans ce cas la température des espèces chargées est supérieure à 10 millions de degrés et le plasma est en équilibre thermodynamique total (ET).
- **Plasmas froids** : sont caractérisés par des températures ne dépassant pas quelques dizaines de milliers de degrés. [1]

Les plasmas froids nécessitent actuellement, l'emploi de technologies de vide contraignantes pour des procédés industriels et présentent les avantages suivants :

- ✓ Obtention de propriétés de surfaces très spécifiques conduisant à des applications performantes.
- ✓ Modification chimique de surface réalisée sans affecter les propriétés intrinsèques du matériau traité et sans modifier son aspect de surface.
- ✓ Choix judicieux des gaz de traitement permettant de conduire, avec une faible quantité de matière première, à une chimie de surface très spécifique sans employer de produits chimiques dangereux, toxiques ou polluants. [5]

Les applications des plasmas sont nombreuses (figure I.2). Elles sont liées généralement à l'effet de la température.



**Figure I.2:** Domaines d'application des plasmas.

Parmi les plasmas froids, on distingue :

- **Plasmas thermiques (en l'ETL : équilibre thermodynamique local)** : Le gaz est fortement ionisé, les températures des particules lourdes (neutres et ions) et les particules légères (électrons) sont voisines ( $T_e \approx T_i$ ). Elles peuvent atteindre plusieurs dizaines de milliers de degrés (entre 3000 et 10000 K). Les ions sont aussi énergétiques (réactifs et chauds) pour influencer le comportement du plasma. On dit que le plasma est proche de l'équilibre thermodynamique local (ETL). Il s'agit des plasmas de torche ou des plasmas d'arc. Ces plasmas sont ainsi loin d'être froids, mais sont dénommés ainsi en raison de leur énergie très inférieure à celle des plasmas chauds.
- **Plasmas hors ETL** : Ces plasmas se caractérisent par un faible taux d'ionisation. Seuls les électrons sont portés à haute température (haute énergie cinétique) et les autres particules (ions, neutres, radicaux fragments de molécules) restent à température ambiante (hors équilibre thermodynamique). Dans ce type de plasmas, seulement les électrons ont acquis plus d'énergie pour effectuer des réactions chimiques et les ions sont considérés comme froids. Ces plasmas froids sont utilisés dans l'industrie, par exemple pour fabriquer des micros ou nano instruments, en microélectronique, pour l'éclairage basse consommation, la stérilisation ainsi que la dépollution de l'eau et de l'air.

Le tableau (I.1) résume les principales caractéristiques des plasmas à ETL et hors ETL

	<b>Plasmas à ETL</b>	<b>Plasmas hors ETL</b>
<b>Propriétés</b>	$-T_e \approx T_i$ -Densité électroniques plus élevée : $(n_e = 10^{21} - 10^{26} m^{-3})$ -Plasmas très collisionnels.	$-T_e \gg T_i$ -Densité électroniques plus basse : $(n_e < 10^{19} m^{-3})$ -Plasmas peu collisionnels.
<b>Exemples</b>	Plasma d'arc (cœur) $T_e \approx T_i \approx 1000K$	Décharge lumineusescentes $T_e \approx 10000 - 100000K$ $T_i \approx 300 - 1000K$

**Tableau I.1** : Principales caractéristiques des plasmas à ETL et hors ETL. [1]

Selon les techniques utilisées pour les générer, la pression appliquée et la géométrie des électrodes, les plasmas hors équilibre se présentent sous différentes formes telles que la décharge luminescente, à barrière diélectrique (DBD) ou encore les décharges couronne.

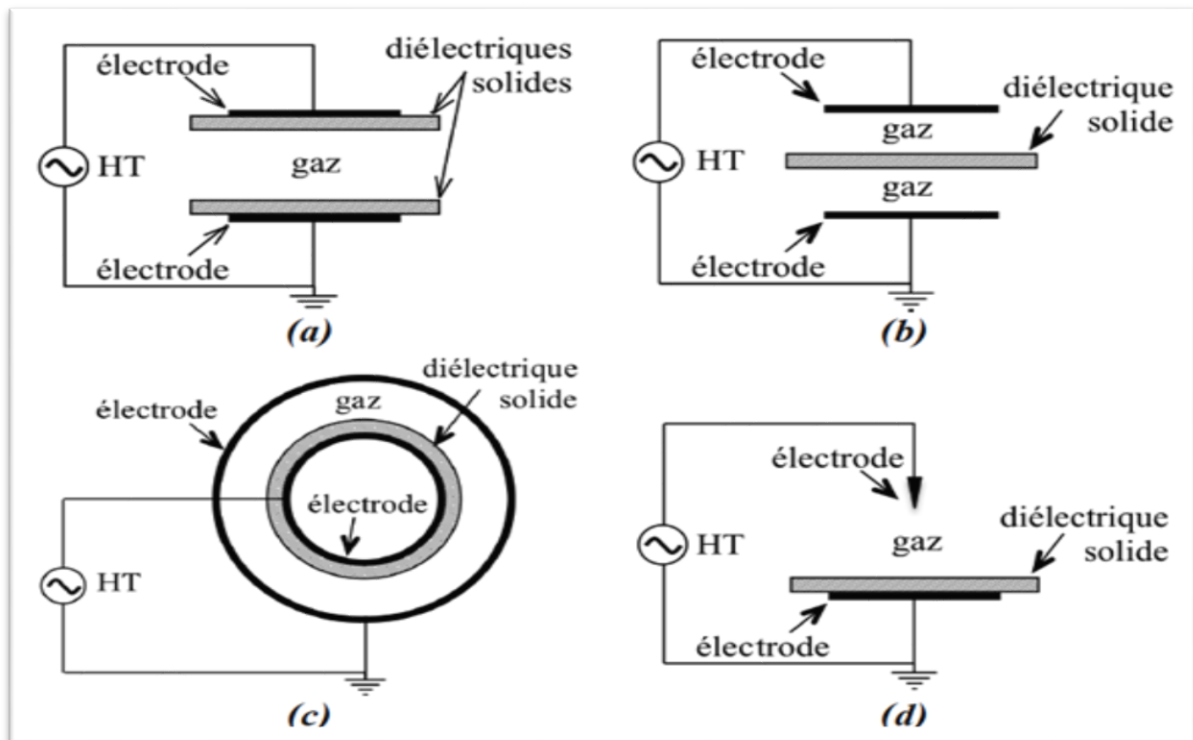
### **I.3.2 Décharge luminescente**

Les décharges luminescentes ou les décharge « glow » sont le plus souvent générées à basse pression entre deux électrodes planes avec des tensions d'alimentation d'une centaine de volts. Ces décharges peuvent aussi être obtenues à pression atmosphérique avec d'autres géométries de réacteur. Les tensions d'alimentation sont alors beaucoup plus importantes. Le régime de décharge luminescente, notamment utilisé dans les tubes d'éclairage (tubes néon, tubes fluorescent). [6]

### **I.3.3 Décharge à barrière diélectrique (DBD)**

Il faut remonter à 1857 pour trouver les premiers travaux sur les Décharges contrôlées par Barrières Diélectriques (DBD) pour la synthèse de l'ozone dans l'entreprise Siemens. Une DBD est une source de plasma froid hors d'équilibre caractérisée par la présence d'au moins un diélectrique entre les deux électrodes métalliques (Figure I.3). La présence du diélectrique permet de limiter l'énergie qui passe dans chaque canal de décharge et ainsi d'éviter le passage à l'arc ; en contrepartie, cela impose l'utilisation d'une excitation électrique alternative. [7]

On appelle décharge à barrière diélectrique (DBD), toute configuration de décharge pour laquelle, l'une ou les deux électrodes sont recouvertes d'un diélectrique. Celui-ci peut être constitué de verre, de céramique, d'alumine ou d'une matière polymère de type PVC par exemple. De manière générale, dans ce type de décharge, l'une des deux électrodes est reliée à la terre, l'autre est reliée à l'alimentation électrique. En configuration diélectrique simple, c'est l'électrode reliée à la terre qui supporte le diélectrique.



**Figure I.3** : Différentes configurations de Décharges à Barrières Diélectriques (DBD). [8]

### I.3.4 Décharge couronne

Les premières publications sur l'effet de couronne datent de 1911 avec les travaux effectués par F.W. PEEK, qui a établi par des essais expérimentaux une loi empirique expérimentale du champ seuil d'apparition de l'effet couronne. [2]

Les décharges couronnes font parties des plasmas froids non thermiques à la pression atmosphérique caractérisés par leur état hors équilibre thermodynamique et chimique. La température du gaz est dans ce cas très proche de la température ambiante alors que celle des électrons est suffisante pour permettre un taux élevé de collisions inélastiques. La majeure partie de l'énergie injectée est alors convertie en réactivité chimique et non pas en énergie thermique.

La décharge couronne est liée à l'apparition de l'avalanche électronique qui se développe dans un intervalle gazeux séparant deux électrodes asymétriques soumises à un champ électrique à des pressions de quelques torrs à quelques atmosphères, [3] il existe deux types de la décharge couronne :

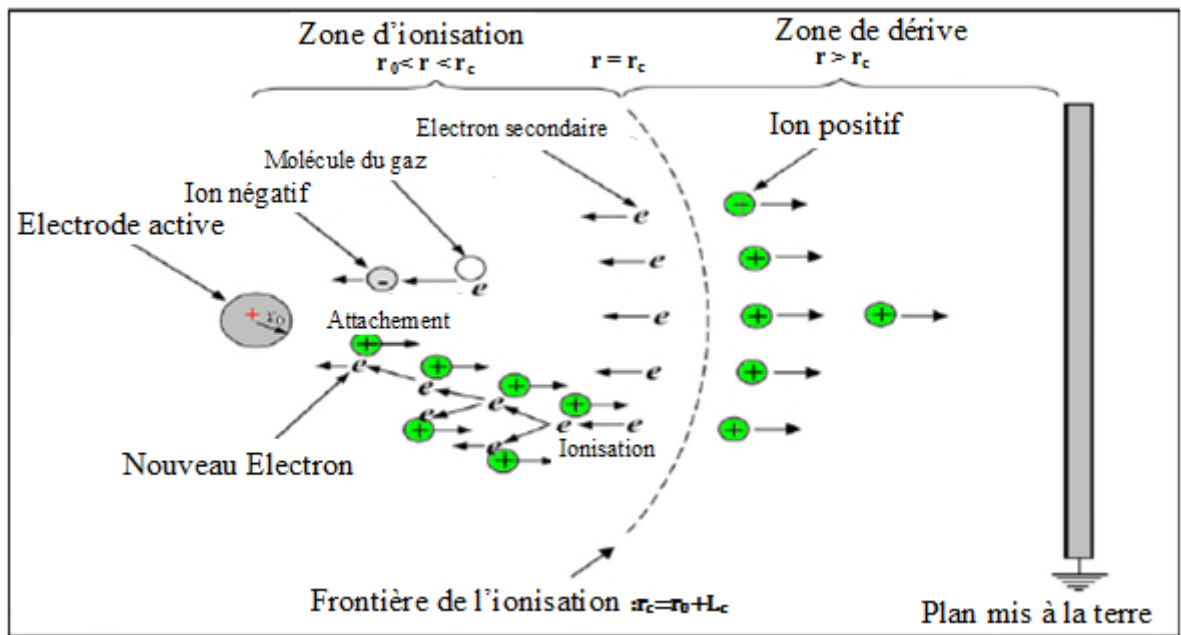
#### I.3.4.1 Décharge couronne positive :

L'électrode stressée est ici l'anode et trois régimes de décharges apparaissent selon la tension appliquée. Le régime burst, observé aux basses tensions, correspond à une succession de décharges scintillantes caractérisées par de faibles impulsions de courant. Une avalanche se déclenche près

de l'anode et se développe en direction de la cathode. Les électrons sont évacués rapidement et laissent derrière eux une charge positive qui s'accroît avec le temps. Eventuellement, l'avalanche se transforme en streamer et le champ électrique devient alors trop faible pour entretenir la décharge. Les électrons sont alors absorbés à l'anode ou s'attachent aux particules neutres et les ions positifs dérivent en direction de la cathode jusqu'à ce que la charge d'espace diminue suffisamment pour qu'un nouveau pulse puisse s'initier. Le régime burst correspond donc à des avalanches ou des streamers se succédant à une fréquence déterminée par le temps d'évacuation des ions et pouvant atteindre quelques KHz. Lorsque la tension appliquée augmente, l'avalanche initiale donne naissance à des streamers beaucoup plus énergétiques et le comportement observé diffère selon l'efficacité des processus d'attachement. Dans un gaz fortement électronégatif, les électrons formés par les avalanches vont s'attacher aux molécules neutres et former ainsi un nuage d'ions négatifs à proximité de l'anode. Le nuage se développe et le champ de charge devient éventuellement suffisamment intense pour écranter le champ électrostatique. L'écran d'ions négatifs a alors un rôle de cathode et il s'ensuit un claquage de Townsend. L'apport d'électron est assuré par des processus photo ioniques entre le nuage et l'anode et les pertes d'ions négatifs dues à la dérive des ions positifs dans le nuage sont compensées par les processus d'attachement. La décharge obtenue est ainsi stable et auto-entretenu. Lorsque le gaz n'est pas ou est peu électronégatif, les avalanches initiées près de l'anode se développent et acquièrent une charge d'espace suffisamment importante pour déclencher une onde d'ionisation cathodique. Les streamers se propagent alors en direction de la cathode et s'éteignent avant de l'atteindre, permettant ainsi à un nouveau cycle de s'initier.

Le troisième régime observé pour les décharges couronnes positives se produit pour les hautes tensions. Les streamers produits à proximité de l'anode sont alors suffisamment énergétiques pour traverser l'espace inter-électrodes et atteindre la cathode. Il s'ensuit l'apparition d'une étincelle, voire d'un arc, par le phénomène d'onde de retour ou return stroke. [9] [10]

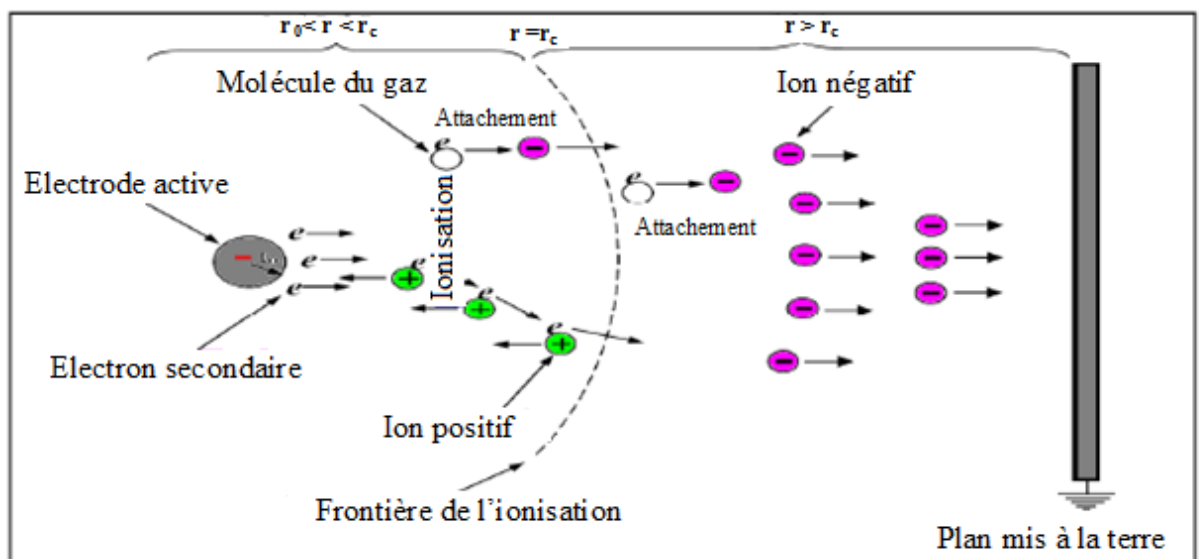
Une représentation schématique de la décharge couronne positive est montrée sur la figure (I.4)



**Figure I.4 :** Représentation schématique de la décharge couronne positive. [11]

### I.3.4.2 Décharge couronne négative

Dans le cas où la petite électrode portée un potentiel négatif (le fil), il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de fil figure (I.5). Les décharges couronnes négatives se développent à partir d'une avalanche électronique s'initiant à proximité de l'électrode stressée. En raison de l'intensité du champ électrique, les ions positifs ainsi créés dérivent rapidement en direction de la cathode et provoquent une forte extraction d'électrons par émission secondaire.



**Figure I.4 :** Représentation schématique de la décharge couronne négative. [11]



Trois régimes de décharges peuvent alors être observés selon la tension appliquée.

Le premier régime est observé aux basses tensions et correspond à un régime de pulses appelés pulses de Trichel. Les électrons, extraits par bombardement ionique à la cathode et multipliés par le mécanisme d'avalanche électronique, dérivent vers les régimes à faible champ électrique. Une partie d'entre eux s'attachent alors aux molécules neutres pour former des ions négatifs qui s'accumulent jusqu'à former une charge d'espace suffisamment importante pour écranter le champ électrostatique. L'ionisation ne peut alors plus avoir lieu, les populations d'électrons et d'ions diminuent et un nouveau pulse peut alors s'initier. La fréquence de ces pulses est déterminée par le temps caractéristique de dérive des ions positifs est comprise entre quelques KHz pour les basses tensions et quelques MHz à haute tension. Avec l'augmentation de la tension appliquée, l'ionisation est amplifiée et la durée entre deux pulses se réduit. Lorsqu'une certaine fréquence de pulse est atteinte, la décharge transite alors vers un régime de décharge lumineuse stationnaire entretenue par un mécanisme de Townsend. Si l'espace inter-électrodes est suffisamment grand, des streamers peuvent apparaître et une augmentation de la tension amène à la création d'étincelles ou passage à l'arc, comme dans le cas des décharges couronnes positives. [9]

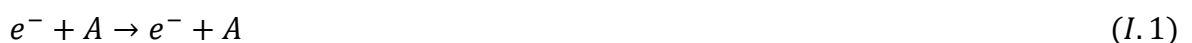
#### I.4 Phénomène de collision

Lorsque deux particules initialement séparées par une distance  $d$  s'approchent l'une de l'autre, elles commencent à interagir et si, après cette interaction, quelques changements mesurables se produisent, on dit qu'une collision a eu lieu. C'est de ces collisions que se déroule la formation des espèces réactives de plasma.

Il existe en réalité plusieurs types de collision :

##### I.4.1 Collisions élastiques

Lors de ces collisions, l'énergie cinétique et la quantité de mouvement sont conservées. Les particules lourdes échangent très facilement leur énergie par collision élastique alors que, lors de la collision d'un électron et d'une particule lourde, la fraction d'énergie est très faible. Un électron devra donc subir des milliers de collisions élastiques pour perdre son énergie.



A : L'atome neutre

##### I.4.2 Collisions inélastiques

Ce sont des collisions où une partie de l'énergie cinétique  $E_{cin}$  est transformée en énergie interne (c'est-à-dire  $\Delta E_{cin} < 0$ ). Il convient cependant que  $\Delta E_{cin}$  doit être au moins égal à l'énergie

interne de l'atome ou de la molécule. Les électrons cèdent une partie de leur énergie cinétique et engendrent des processus d'excitation, de dissociation, d'ionisation et d'attachement. Les collisions inélastiques sont donc la source d'un nombre important de réaction physico-chimique qui vont alors modifier les propriétés macroscopiques de gaz.



$A^{*}$  : L'atome excité

### I.4.3 Collisions avec transfert de charge

Où l'ion  $A^{+}$  énergétique devient neutre A rapide, et le neutre B, initialement à la température du gaz, devient  $B^{+}$  :



#### I.4.3.1 Ionisation

L'ionisation du gaz est due au processus d'interaction électron molécule. La collision entre un électron et une molécule donne un électron diffusé, un électron éjecté et un ion positif. Ces deux électrons sont accélérés par le champ électrique et donnent un nouveau processus. [5]



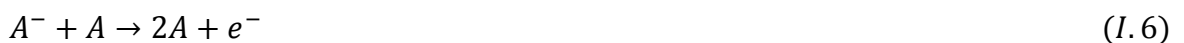
#### I.4.3.2 Attachement

L'électron peut être saisi par une molécule pour donner un ion négatif. Ce processus se produit surtout lorsque le gaz est électronégatif.



#### I.4.3.3 Détachement électronique

La collision d'un ion négatif avec un neutre donne deux neutres A et un électron émis.



#### I.4.3.4 Conversion ionique

L'impact d'ion sur une molécule conduit à la dissociation de cette molécule et l'apparition d'un nouveau type d'ion. Sur le tableau suivant, nous avons regroupé un ensemble de réactions induites par impact électronique dans une collision inélastique.

Processus	Réaction
Ionisation par impact électronique	$e^- + A \rightarrow 2e^- + A$
Ionisation dissociative	$e^- + AB \rightarrow 2e^- + A + B^+$
Excitation par impact électronique	$e^- + A \rightarrow e^- + A^*$
Recombinaison radiative	$e^- + A^+ \rightarrow A^* + h\nu$
Recombinaison à trois corps	$e^- + A^+ + B \rightarrow B + A^*$
Attachement à trois corps	$e^- + A + B \rightarrow A + B^-$
Détachement par impact électronique	$e^- + A^- \rightarrow 2e^- + A$
Dissociation par impact électronique	$e^- + AB \rightarrow e^- + A + B$

**Tableau I.2 :** Ensemble de réactions induites par impact électronique. [5]

Où A et B sont des espèces chimiques (particules neutres, atomes, molécules...).

### I.5 Paramètres physiques des plasmas

Tous les plasmas n'ont pas les mêmes caractéristiques et peuvent être ainsi classifiés en fonction de certains paramètres précis. Ces paramètres sont essentiellement :

- **Densité électronique :** C'est le nombre d'électrons libres par unités de volume ( $cm^{-3}$ ) [4]
- **Taux d'ionisation, de dissociation, d'excitation:** Le degré d'ionisation du plasma est directement donné par le rapport  $\tau_i$  qui est le taux d'ionisation défini par :

$\tau_i = \frac{n_i}{n_i + n_r + n_0}$ : C'est le rapport de la densité des ions à la densité totale (densité des neutres + densité des radicaux + densité des ions). Le taux de dissociation  $\tau_d$  est défini comme le rapport de la densité des fragments (radicaux) à la somme de la densité des radicaux et la densité des neutres  $\tau_d = n_r / (n_r + n_0)$ .

Enfin, le taux d'excitation est défini comme le rapport de la densité des particules excitées à la somme de la densité des particules excitées et la densité des neutres  $\tau^* = n^* / (n^* + n_0)$ .

Dans nos plasmas réactifs qui sont des milieux faiblement ionisés ou partiellement ionisés dans certains cas, le taux d'ionisation ainsi que les taux de dissociation et d'excitation restent naturellement très inférieurs à 1, généralement de l'ordre de  $10^{-5}$  à  $10^{-4}$ . [12]

- **Température électronique :** qui correspond à la température absolue en Kelvin ( $^{\circ}K$ ) des électrons. On utilise aussi parfois l'énergie électronique  $kT_e$  (en électron-volteV) avec  $k$  la constante de Boltzman, sachant que  $1 kT_e \approx 1,4 \times 10^4 \text{ }^{\circ}K$  [4]
- **Libre parcours moyen ( $\lambda$ ) :** Le libre parcours moyen  $\lambda$  correspond à la distance moyenne parcourue par une particule (électron, ion ou neutre) entre deux collisions. Ce paramètre dépend de la vitesse des particules ainsi que de la probabilité de collisions. Il peut généralement être décrit par l'équation :

$$\lambda = \frac{1}{\pi(r_1+r_2)^2 \cdot N_i} = \frac{1}{N_i \cdot \sigma} \quad (I.7)$$

Où :

- ✓  $r_1$  et  $r_2$  sont les rayons de particules en collision
- ✓  $N_i$ : La densité des particules par unité de volume
- ✓  $\sigma$ : La section efficace.

À basse pression, la densité du gaz est plus faible, en conséquence le libre parcours moyen sera plus grand. Cela permet aux espèces chargées d'avoir suffisamment de temps pour être accéléré par le champ électrique, entre les collisions, ce qui facilite le transfert d'une plus grand d'énergie lors de la collision.

#### ➤ **Longueur de Debye :**

Lorsqu'une charge est immergée dans un plasma ou un autre conducteur, elle sera entourée par de charges de signe opposé (une séparation significative des charges peut avoir lieu) qui tendent à écranter son champ coulombien (ou potentiel). La distance caractéristique pour laquelle le phénomène a lieu est la longueur de Debye  $\lambda_D$ , il en résulte que la neutralité du plasma n'existe qu'à une échelle d'observation supérieure à  $\lambda_D$ . Le paramètre  $\lambda_D$  peut varier de quelques microns (plasmas denses) à plusieurs dizaines de mètres (plasmas spatiaux). La longueur de Debye est définie comme : [1]

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \cdot k_B \cdot T_e}{n_e \cdot e^2}} \quad (I.8)$$

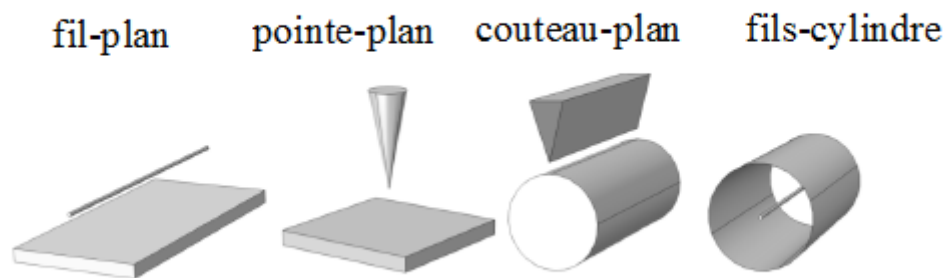
Où :

$\varepsilon_0$ : La permittivité du vide ( $8,85 \times 10^{-12} F/m$ )

$e$ : La charge électronique ( $1,60 \times 10^{-19} C$ )

## I.6 Classification des décharges électriques selon la géométrie des électrodes

Le comportement des décharges électriques dépendent fortement de la géométrie des électrodes, qui peuvent être classées en quatre types : pointe-plan, fil-plan, couteau-plan et fil-cylindre (Figure I.6), qui induisent des comportements électriques et des applications différentes. La configuration des électrodes définit la distribution des lignes de champ. La distance inter-électrodes est habituellement inférieure au centimètre. [4]



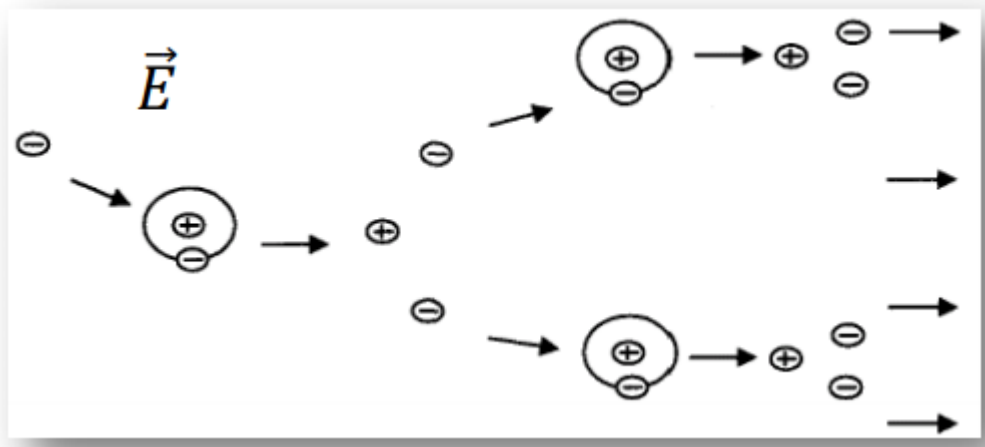
**Figure I.6:** Configuration d'électrodes pour la génération de décharges couronnes. [13]

## I.7 Description d'une décharge électrique

### I.7.1 Décharge de Townsend

#### I.7.1.1 Phénoménologie de la décharge

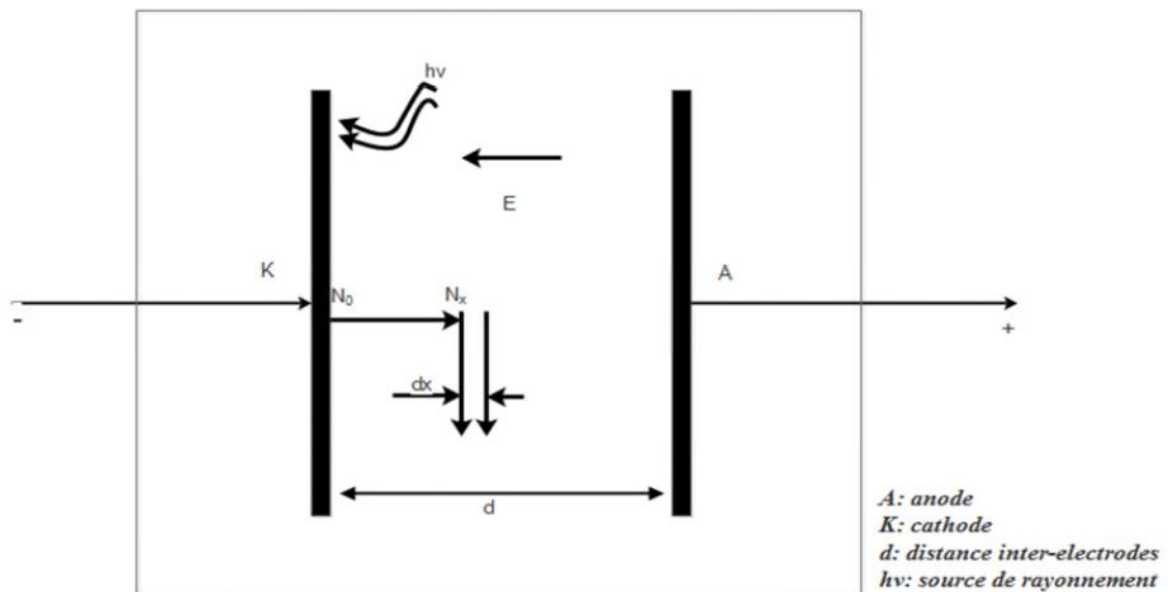
Pour qu'une véritable décharge puisse se produire, il faut qu'une succession d'avalanches puisse avoir lieu. Le phénomène de l'avalanche électronique représente dans la figure (I.7)



**Figure I.7 :** Processus de multiplication électronique initié par un électron germe. [4]

Pour Townsend, la cause de ce phénomène est le bombardement de la cathode décrit comme suit :

Au niveau de la cathode, les ions positifs formés au cours des collisions ionisantes bombardent la cathode et peuvent en extraire des électrons. La figure (I.8) représente la décharge de Townsend à courant continu.



**Figure I.8:** Décharge de Townsend à courant continu. [3]

Le mécanisme de la décharge de Townsend a suscité l'intérêt de plusieurs auteurs qui l'ont bien détaillé dans leurs travaux. Ce mécanisme se développe selon le mécanisme suivant :

Un électron « germe » accéléré par le champ électrique seuil appliqué, acquiert une énergie suffisante à ioniser par collisions une particule neutre du gaz. Les nouveaux électrons créés vont participer à leur tour au mécanisme d'ionisation des molécules neutres produisant ainsi une

multiplication ou avalanche électronique. Townsend a introduit un coefficient multiplicateur  $\alpha$  qui permet d'exprimer l'accroissement d'électrons  $dN_x$  le long d'un parcours élémentaire  $d_x$  de l'avalanche tel que :

$$dN_x = N \cdot \alpha \cdot d_x \quad (I.9)$$

Ce coefficient, appelé généralement le premier coefficient de Townsend, dépend de la nature du gaz, du champ local  $E$  et de la pression du gaz. Dans le cas d'un champ homogène,  $\alpha$  est constant dans tout l'intervalle. Ainsi :

$$N_x = N_0 e^{\alpha d} \quad (I.10)$$

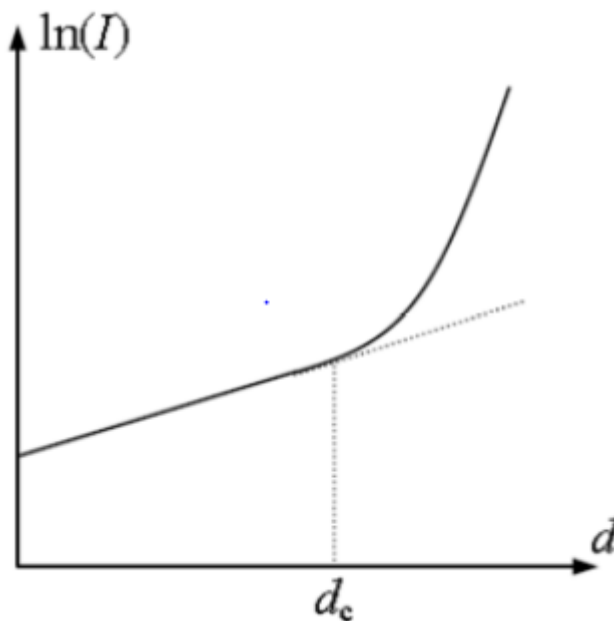
Où :

- $N_0$ : Le taux de production d'électrons primaires par seconde
- $N_x$  : Le nombre d'électrons produits par avalanche.

Si  $d$  est la distance inter-électrode, le courant mesuré est donné par :

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (I.11)$$

Si dans un dispositif tel que celui de la figure (I.9), on fait varier  $d$  en laissant le rapport  $E/p$  constant, l'étude expérimentale effectuée par Townsend montre, qu'au-delà d'une certaine valeur de  $d$ , le courant se met à croître plus vite que prévu par la relation (I.11).



**Figure I.9:** Courant de décharge en fonction de la distance inter-électrodes. [3]

Le nouveau mécanisme d'ionisation responsable de cette augmentation du courant est l'émission secondaire due aux ions positifs, principalement celle résultante du bombardement de la cathode. En effet, sous l'effet du champ électrique, les ions positifs formés lors de la première avalanche sont accélérés et peuvent acquérir une énergie cinétique suffisante pour arracher des électrons supplémentaires de la surface de la cathode.

On caractérise alors cette émission par une grandeur macroscopique,  $\gamma$ , dite deuxième coefficient de Townsend. Il est défini comme étant le rapport du nombre d'électrons émis par la cathode au nombre d'ions positifs qui y sont collectés et dépend de la nature du gaz inter-électrodes et particulièrement du matériau constituant la cathode. Les  $N_0$  électrons issus de la cathode créent, sur la distance  $d$ ,  $N_0(e^{\alpha d} - 1)$  paires d'ions-électrons. Ces ions positifs vont libérer  $\gamma N_0(e^{\alpha d} - 1)$  nouveaux électrons initiaux. Donc pour  $N_0$  électrons primaires à la cathode, le nombre d'électrons parvenant à l'anode devient :

$$N_d = \frac{N_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (I.12)$$

D'où le courant collecté à l'anode :

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (I.13)$$

### I.7.1.2 Critère de claquage de Townsend

Dans l'équation précédente (I.11),  $I_0$  représente le courant généré par radiation ultraviolet de la cathode. En l'absence de ces radiations, ce courant s'annule provoquant l'annulation du courant de l'anode ( $I = 0$ ). Cela signifie que si la source de lumière  $UV$  est supprimée le courant de la décharge s'annulerait et la décharge est alors non autonome. D'après Townsend, la condition nécessaire pour que la décharge soit autoentretenu est que le dénominateur dans l'équation (I.13) devient nul. Ce critère, pour laquelle le courant  $I$  croît vers l'infini, se traduit alors par l'existence d'une distance critique  $d_c$  tel que :

$$1 - \gamma(e^{\alpha d_c} - 1) = 0 \quad (I.14)$$

Comme  $e^{\alpha d_c} \gg 1$ , le critère devient :

$$e^{\alpha d_c} = \frac{1}{\gamma} \quad (I.15)$$

En réalité le courant  $I$  ne devient pas infini, car il est limité par le circuit extérieur. Cela signifie que lorsque la condition précédente est vérifiée, un électron primaire émis par la cathode donne  $e^{\alpha d_c} - 1$  ions qui produisent à leur tour, par bombardement,  $\gamma \cdot (e^{\alpha d_c} - 1)$  électrons secondaires,



c'est-à-dire un nouvel électron. La décharge est alors auto entretenue, en ce sens qu'elle se maintient même si l'on supprime la source du courant primaire  $I_0$ . Il y a lieu de noter que dans les régions à faible champ, l'attachement électronique ne peut plus être négligé. Ce phénomène est caractérisé par le coefficient d'attachement  $\eta$  qui s'oppose au processus  $\alpha$ . Il est prépondérant dans les gaz comportant des atomes à électronégativité accentuée tel que le SF6 ou à un degré moindre l'oxygène. Ces atomes peuvent capter un électron. En présence de l'attachement, on définit un coefficient effectif d'ionisation  $\alpha$  qui s'écrit sous la forme suivante :

$$\alpha = \alpha - \eta \quad (I.16)$$

En champ électrique inter électrodes non uniforme, comme c'est le cas dans les systèmes fil-plan, pointe-plan, sphère-plan, etc. Son intensité et, par conséquent, le coefficient effectif d'ionisation  $\alpha$  varient le long du trajet de l'avalanche. Le critère de claquage de Townsend à faibles pressions prend alors la forme suivante :

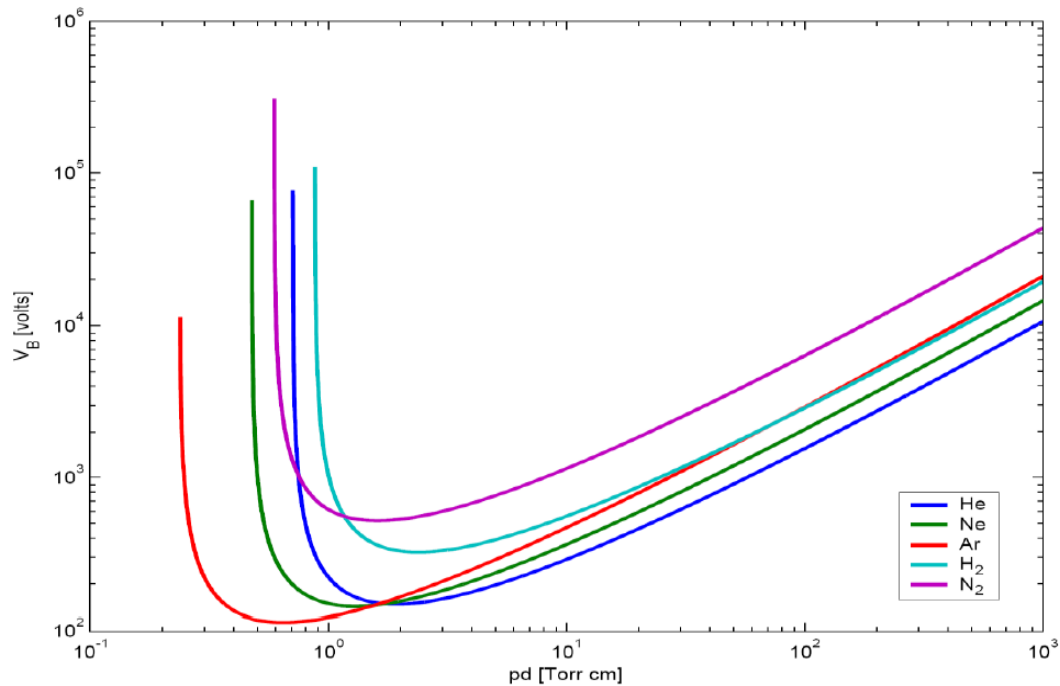
$$(e^{\int_0^d \alpha \cdot dx} - 1) = \frac{1}{\gamma} \quad (I.17)$$

### I.7.2 Loi de Paschen

Paschen a établi une loi empirique de comportement des gaz, connue sous le nom de loi de Paschen. Cette dernière énonce que la tension disruptive d'un gaz qui représente la tension à partir de laquelle une décharge est observée, entre deux électrodes parallèles dépend de la valeur du produit de la pression du gaz avec la distance inter-électrodes la relation s'écrit :

$$V_s = f(p \cdot d) \quad (I.18)$$

La figure (I.10) représente la courbe de Paschen pour différents gaz



**Figure I.10:** Courbe de Paschen pour différents gaz. [14]

Ces courbes montrent que  $V_s$  a un minimum unique, pour une valeur :  $pd = (pd)_{min}$ . Si l'on augmente le produit ( $pd$ ), un électron accéléré par le champ électrique aura une probabilité plus grande de rencontrer une molécule du gaz, mais l'énergie moyenne acquise entre deux collisions étant plus faible, la probabilité d'obtenir une collision ionisante diminue, à moins d'augmenter la tension. Si ( $pd$ ) est inférieur à  $(pd)_{min}$ , la tension d'amorçage croît également par diminution du nombre de collisions. [14]

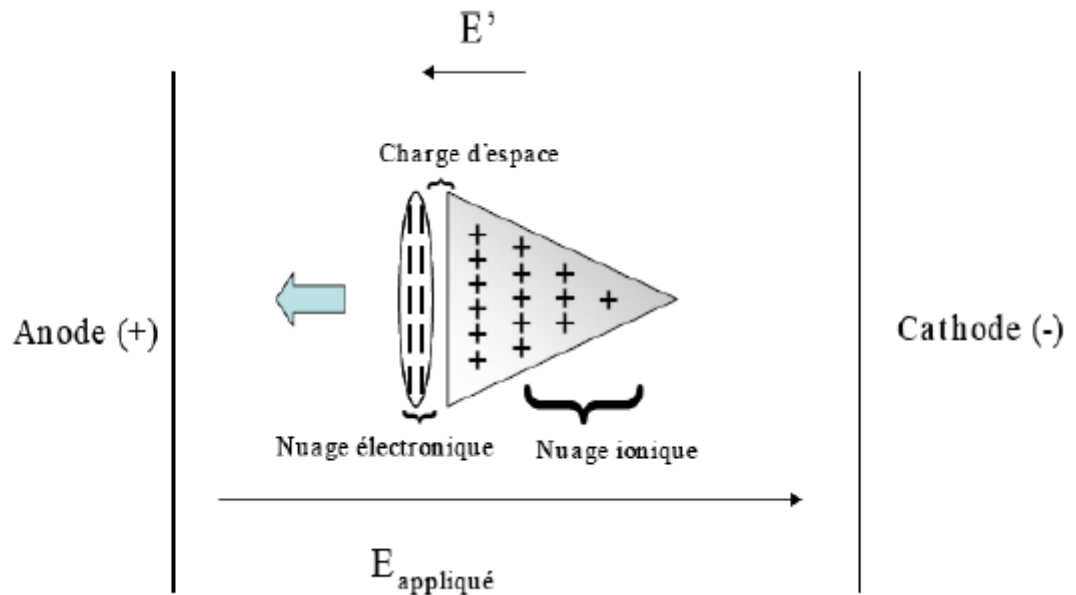
### I.7.3 Théorie de streamer

La théorie sur les streamers a été développée suite aux travaux de Loeb, Meek et Raether en 1940. Les nombreuses expériences menées par le groupe de Raether sur les décharges planes et de Loeb sur les décharges couronnes ont mis en évidence, avant la phase de claquage (formation d'une étincelle), de pulses de courant ayant des durées largement inférieures au temps caractéristique de dérive des électrons et des ions. Le mécanisme de type streamer est dominant pour des produits pression.distance supérieurs à 100 Torr.cm d'après le critère de Raether qui est variable selon la nature du gaz et des électrodes. C'est un processus inhomogène qui engendre l'apparition de filaments. Ce mécanisme présente plusieurs étapes de formation :

#### ➤ 1ère étape : Avalanche primaire

Un champ électrique est appliqué entre deux électrodes, un électron primaire présent dans le gaz près de la cathode va être accéléré par le champ électrique et créer une avalanche électronique

primaire. Les électrons plus légers vont migrer jusqu'à l'anode, les ions plus lourds vont alors créer une charge d'espace derrière ce front de charges négatives en raison de la présence d'un nuage ionique se déplaçant plus lentement. La charge d'espace crée un champ électrique  $E'$  opposé au champ appliqué. Cette première étape est schématisée sur la Figure I.11.



**Figure I.9 :** Mécanisme de type streamer avalanche primaire : création d'une charge d'espace. [15]

Le champ de charge d'espace  $E'$  doit être suffisamment élevé par rapport au champ géométrique  $E$  pour induire une distorsion du champ. Cette distorsion augmente le champ en tête d'avalanche et permet d'augmenter la vitesse de propagation vers l'anode. Il est communément admis que le streamer se développe quand le nombre d'électrons dans la tête d'avalanche dépasse  $10^8 \text{ cm}^{-3}$ .

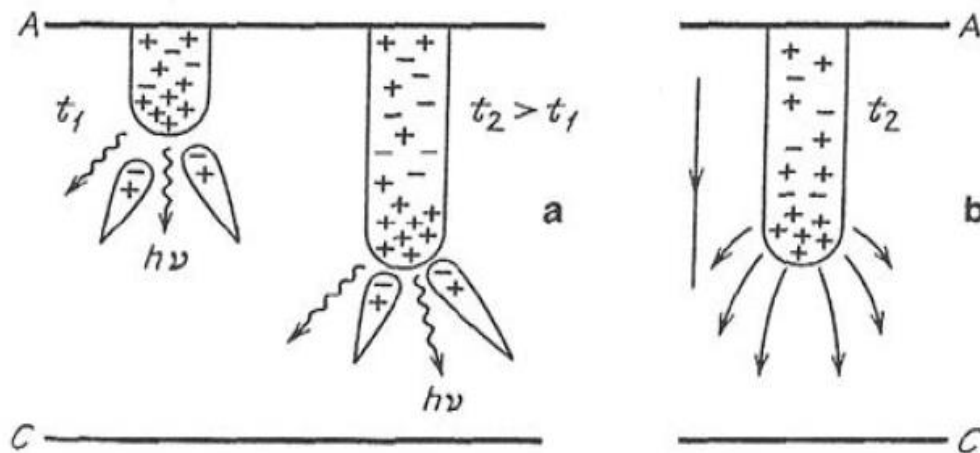
### ➤ 2ème étape : Création d'avalanches secondaires

Au processus d'ionisation par collisions électrons-ions s'ajoute un processus de photo-ionisation qui engendre des avalanches secondaires. Lors de cette étape, il est possible de distinguer deux types de streamer : le streamer négatif et le streamer positif.

#### • Streamer positif :

La génération d'un streamer positif est présentée sur la Figure (I.12). Les atomes excités par l'avalanche primaire produisent des photons dans la direction de l'avalanche primaire c'est-à-dire vers la cathode. Les électrons produits par ces photons initient des avalanches secondaires dans cette même direction. Ces avalanches secondaires se mêlent aux ions générés par la première avalanche et forment un plasma quasi-neutre. Ces électrons peuvent aussi exciter de nouveaux

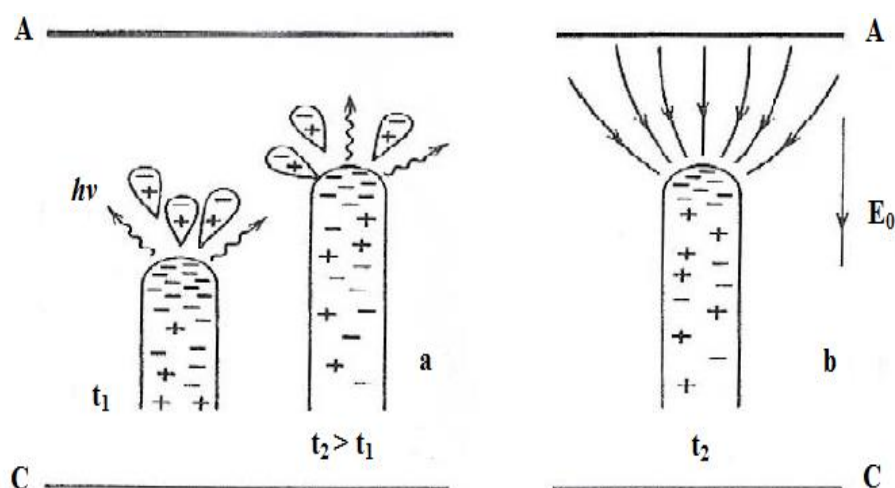
atomes qui émettent des photons. L'avalanche secondaire d'ions va renforcer la charge positive près de la cathode et faire évoluer le canal de plasma. Le streamer peut ainsi croître.



**Figure I.12 :** Avalanches secondaires créées par photo-ionisation dans le cas d'un streamer positif. [15]

- **Streamer négatif :**

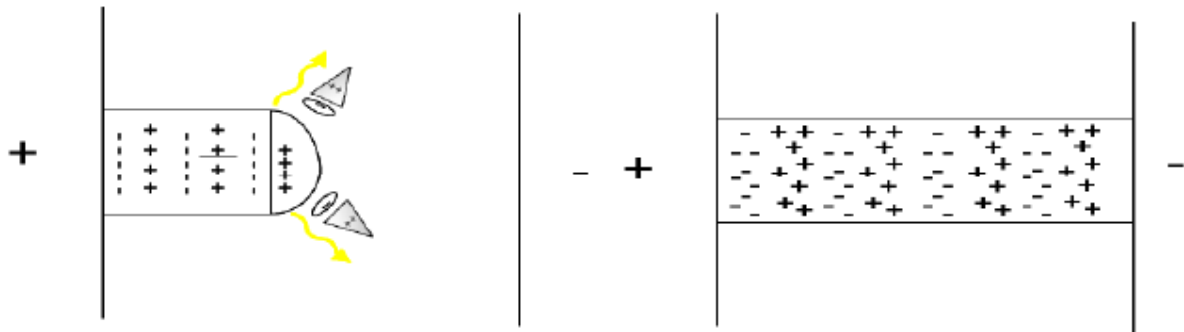
Le streamer est appelé négatif lorsque le début de l'avalanche primaire est proche de la cathode, ainsi le streamer se dirige principalement en direction de l'anode comme présenté sur le schéma de la Figure (I.13). Les caractéristiques de propagation sont différentes de celles présentées dans le cas du streamer positif, car dans ce cas la dérive des électrons a lieu dans la même direction que celle du streamer. Dans ce cas, la photo-ionisation et les avalanches secondaires se dirigent vers l'anode c'est-à-dire vers la tête du streamer chargée négativement.



**Figure I.13 :** Avalanches secondaires créées par photo-ionisation dans le cas d'un streamer négatif. [15]

➤ **3ème étape : Propagation du streamer et passage à l'arc dans le cas d'un streamer positif :**

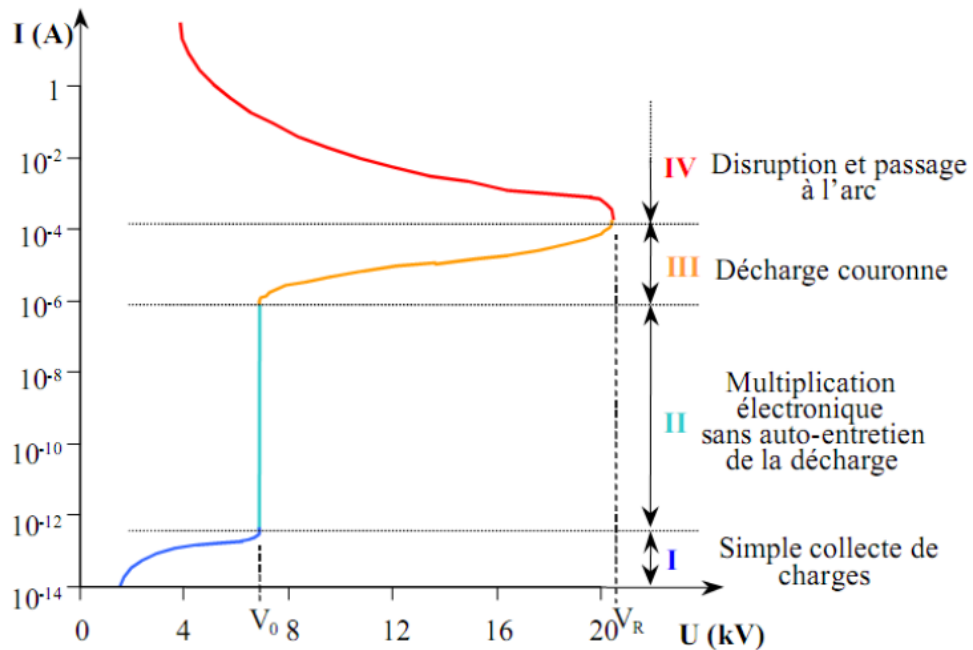
En migrant le front négatif va être relié à l'anode créant le streamer, les avalanches secondaires fusionnant avec le canal principal vont développer le streamer. Ce dernier au bout d'un certain temps va relier l'anode et la cathode si le courant n'est pas limité, cela engendrera le passage à l'arc comme on peut l'observer sur la Figure (I.14). Dans ce cas, la température du gaz va rapidement croître du fait des collisions électrons-neutres et le plasma ainsi obtenu sera très proche de l'équilibre thermodynamique, avec une température du gaz pouvant atteindre plusieurs milliers de kelvin.



**Figure I.14 :** Création du streamer et développement jusqu'à la transition à l'arc.

### I.8 Caractéristique courant/tension de la décharge couronne

L'application d'une tension entre deux électrodes permet d'obtenir la caractéristique courant/tension de même en augmentant progressivement cette tension il apparaît alors les différents régimes de décharge sont les montrées dans la figure (I.15).



**Figure I.15 :** Caractéristique courant/tension des décharges à pression atmosphériques. [4]

- **Zone I :** Dans cette zone, le courant et la tension sont très faibles (moins de quelques 10V). Le champ électrique résultant est donc insuffisant pour déclencher une avalanche électronique. En pratique, le courant provient de la collection aux électrodes de charges créées par l'ionisation du gaz par des agents extérieurs (radioactivité naturelle et/ou rayonnement cosmique). Ce courant n'existera pas en l'absence de ces agents, c'est pour cette raison qu'on l'appelle « décharge non autonome ».
- **Zone II :** Ce régime est caractérisé par une valeur seuil de tension  $U_0$  et une forte croissance du courant. Dans ce cas, le champ est suffisamment intense pour que le processus de multiplication (avalanche électronique) des électrons démarre. Cependant le critère d'auto-entretien n'est pas encore atteint, c'est à dire que les électrons ne se renouvellent pas à la fin de chaque avalanche.
- **Zone III :** C'est un régime stable de fonctionnement avec l'installation du critère d'auto-entretien. La charge d'espace apparaît et crée un champ local antagoniste au champ appliqué. Ceci tend, dans un premier temps, à diminuer le courant lorsqu'on augmente la tension appliquée. Cette zone représente le régime de décharge lumineuse dont le courant varie de  $10^{-4}$  A à  $10^{-1}$  A. [4]

- **Zone IV** : L'émission thermoélectronique devient notable et le courant devient de plus en plus fort avec une chute importante de la tension : c'est le régime d'arc.

### I.9 Facteurs influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne, on distingue trois facteurs essentiels :

- Facteurs géométriques (**Rayon de courbure, Distance inter-électrodes**)
- Facteurs physiques (**Température, Humidité, Pression**)
- Facteurs électriques. [16]

### I.10 Inconvénients de l'effet couronne

- La transition à l'arc.
- Les pertes couronne.
- Interférence avec les ondes radio.
- Bruit et vibration des conducteurs

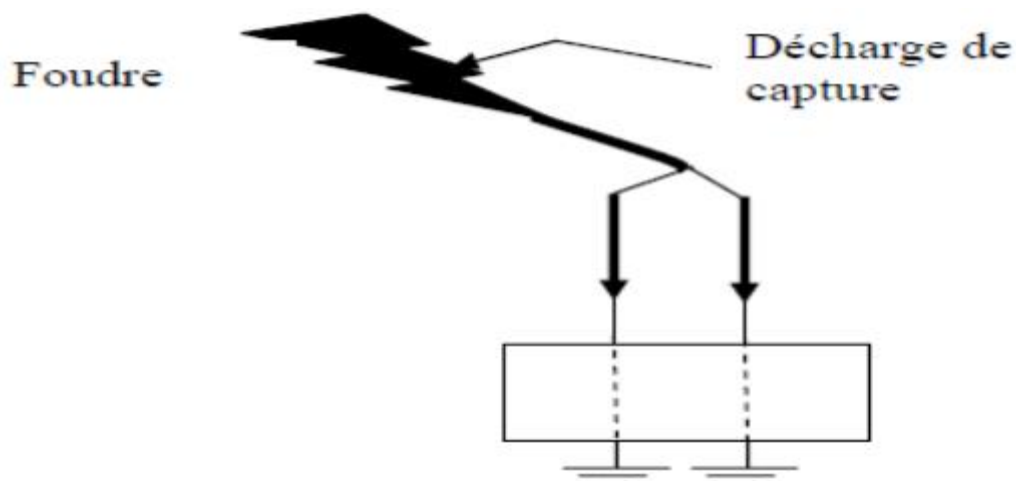
### I.11 Avantages de l'effet couronne

Quand le champ superficiel dépasse le seuil critique, les charges créées par effet couronne éliminent par neutralisation une partie des charges du conducteur. Ceci provoque la diminution du champ superficiel et du potentiel du conducteur. On dit que l'effet couronne est un régulateur de tension. Donc la décharge couronne amortit les surtensions sur les lignes surtout les surtensions dues à la foudre. Lorsque l'effet couronne se produit autour du conducteur dans l'air environnant celui-ci acquiert une grande conductivité et le diamètre du conducteur tend à augmenter, ce qui paradoxalement réduit le champ électrique. Des calculs récents effectués sur des modèles simulés d'une ligne de 220 kV soumise à une onde de choc  $1,2/50\mu s$  simulant une surtension atmosphérique, l'atténuation de la surtension atteint 60% quand on s'éloigne de 7 km du point d'impact de cette surtension. [17]

### I.12 Domaine d'application de la décharge couronne

#### I.12.1 Paratonnerre

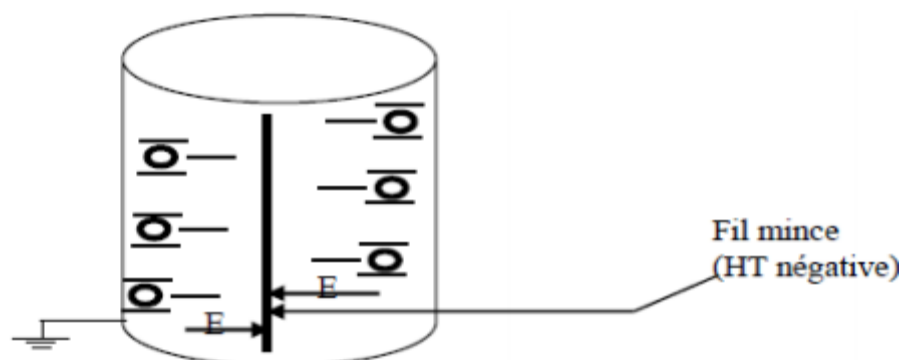
L'effet couronne augmente la conductivité de l'air autour de la pointe, le canal de la foudre qui opte pour le chemin le moins résistant est capté par le paratonnerre, la figure (I.16) représente la décharge couronne pour le paratonnerre



**Figure I.16 :** Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre. [17]

### I.12.2 Filtre électrostatique

Le fil central produit par effet couronne des charges électriques négatives. Les grains de poussière qui se chargent négativement sont attirés et captés par le cylindre joue le rôle d'un filtre de poussières, lequel une fois saturé sera remplacé par un nouveau filtre figure (I.17).



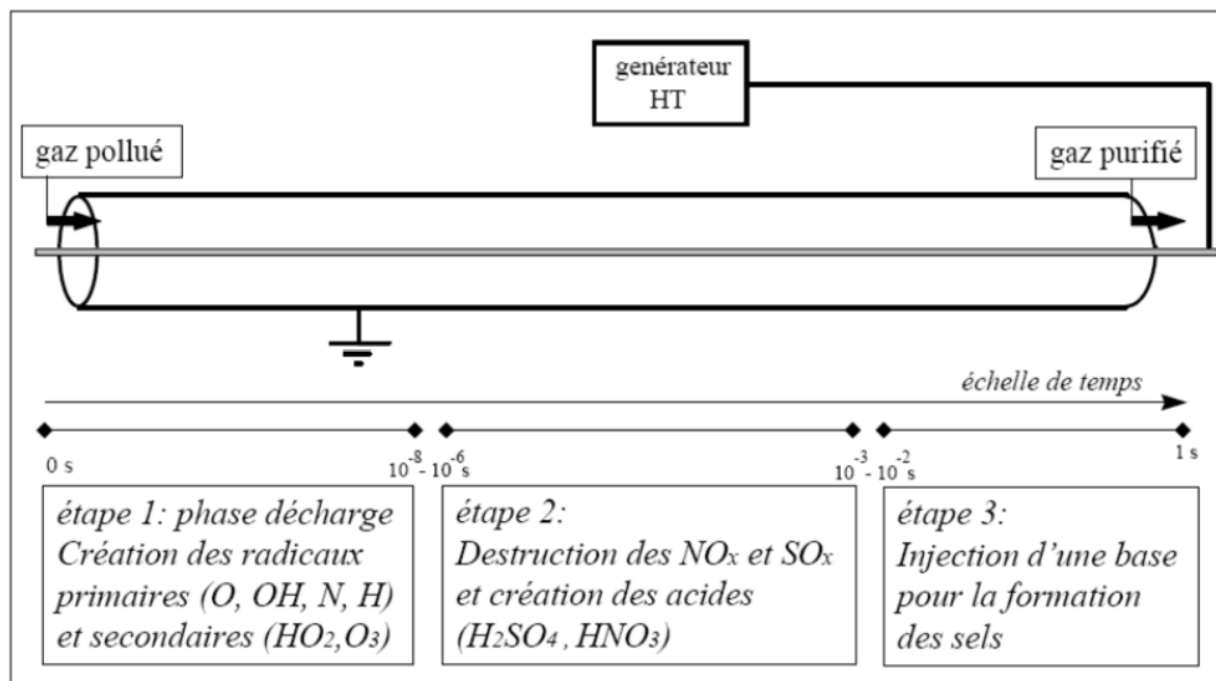
**Figure I.17 :** Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique. [2]

### I.12.3 Dépollution par la décharge couronne

Le traitement de gaz avec les décharges couronne se fait par des réacteurs. L'utilisation des réacteurs plasmas froids hors équilibre générés par des décharges électriques de type couronne nous permet de traiter les gaz à pression atmosphérique. Le traitement s'effectue soit en détruisant les espèces toxiques, soit en les transformant en espèces moins nocives et/ou plus facilement traitables par d'autres techniques de dépollution. Les espèces toxiques traitées peuvent être des oxydes d'azote et de soufre ou des composés organiques volatiles. Des recherches sont également en cours pour estimer le potentiel de traitement des surfaces par des dispositifs hybrides couplant



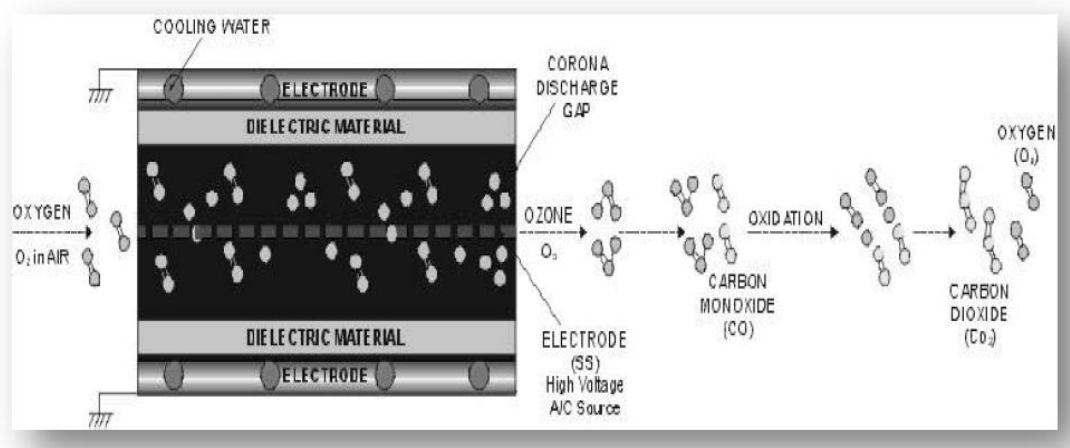
les décharges couronne avec des catalyseurs. Dans certains cas, le réacteur corona peut également servir de précipitation électrostatique et piéger les poussières ou les particules lourdes. Le traitement d'un gaz d'échappement par réacteur corona s'effectue en trois principales étapes comme il est indiqué sur la figure (I.18).



**Figure I.18:** Représentation schématique des principales étapes de la destruction des oxydes toxiques par décharge couronne. [18]

#### I.12.4 Générateurs d'ozone

Une autre solution pour traiter les effluents gazeux est d'utiliser l'ozone ( $O_3$ ) : au lieu de créer un milieu fortement réactif, une espèce possédant un fort pouvoir oxydant est introduite dans le gaz à traiter. Cette espèce est l'ozone. L'ozone est également utilisé dans le traitement de l'eau mais aussi dans de nombreux domaines comme l'industrie agro-alimentaire en tant que désinfectant ou conservateur. La figure (I.19) représente le générateur d'ozone.



**Figure I.19:** Générateur d'ozone fil / cylindre avec barrières diélectriques. [4]

### I.12.5 Les précipitateurs électrostatiques

Les précipitateurs électrostatiques (ESP) sont des installations qui enlèvent de fines particules en suspension dans le gaz, en les chargeant puis en les séparant du gaz à l'aide d'un champ électrique. Ils sont généralement utilisés pour les traitements des fumées industrielles constituées par des suspensions à forte concentration de poussières (de quelques centaines de milligrammes à plusieurs dizaines de grammes par mètre cube de gaz).

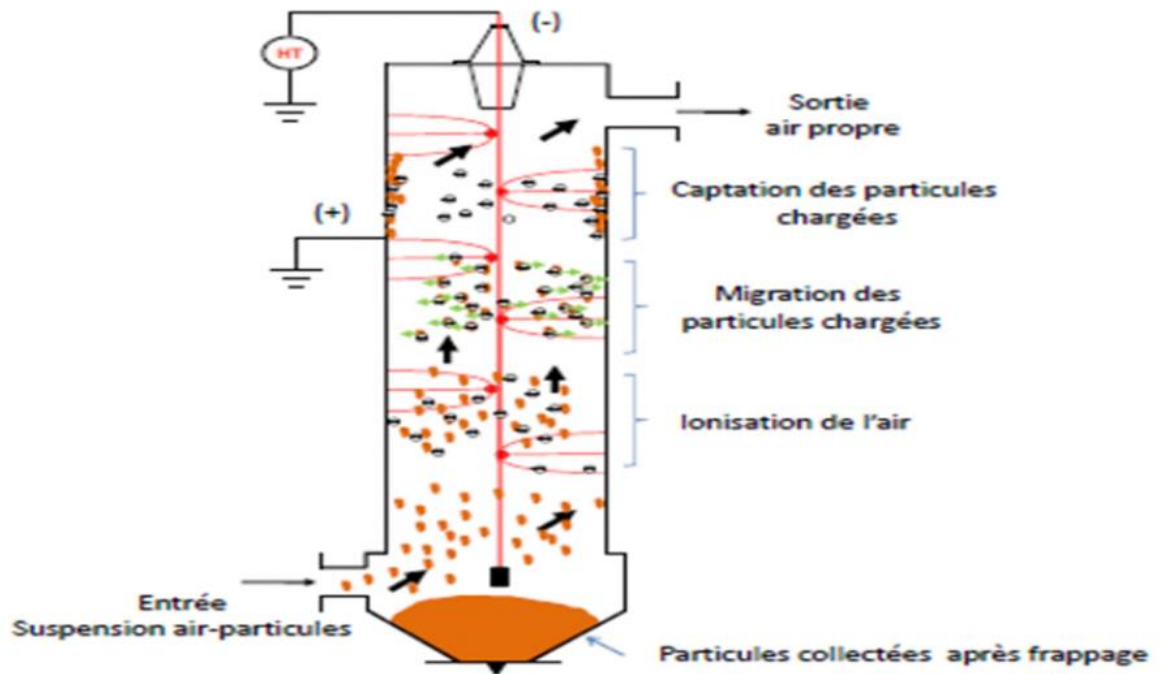
La précipitation électrostatique présente un intérêt substantiel. Parmi les différents domaines d'application des précipitateurs électrostatiques, on peut citer : les cimenteries, les centrales thermiques et les installations de combustion. Actuellement ce dispositif est utilisé pour améliorer la visibilité dans un tunnel.

#### I.12.5.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un électrofiltre peut être décomposé en trois phases : l'ionisation de l'air par effet couronne et la charge des particules par interaction avec les ions créés, la précipitation des espèces chargées par action d'un champ électrique et le nettoyage des surfaces de collecte. Le filtre électrostatique est un dispositif dans lequel les forces électrostatiques piègent les particules contenues dans un gaz. Il est constitué d'un ensemble d'électrodes actives et d'électrodes de collecte et peut être de géométrie plane ou cylindrique. La décharge générée au sein de ce dispositif, souvent maintenue à un fort potentiel négatif, produit des ions, par attachement des électrons libres aux molécules du gaz. Lors de collisions de ces ions avec des particules, ces dernières se chargent. [19]

Afin d'expliquer le principe de fonctionnement d'un électrofiltre, prenons l'exemple d'un précipitateur électrostatique industriel de géométrie cylindrique. Il est constitué d'un cylindre

métallique disposé verticalement (l'électrode de collecte) et d'un fil suspendu le long de l'axe central du cylindre (l'électrode active, figure I.20). L'électrode active est reliée à la haute tension continue tandis que l'électrode de collecte est reliée à la masse.



**Figure I.20 :** Principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique. [20]

Lorsqu'on applique une tension au-delà d'un seuil (tension d'allumage de la décharge), une décharge couronne apparaît autour du fil. Elle apparaît soit sous la forme de points lumineux (tension négative) répartis le long du fil et appelés « spots », ou sous la forme d'une « gaine lumineuse » (tension positive). Les phénomènes lumineux représentent localement les régions ionisées du gaz à partir desquelles des ions de même polarité que l'électrode active sont émis vers l'électrode de collecte. Ces ions traversent l'espace inter-électrodes sous l'action d'un champ électrique continu, en direction de l'électrode de collecte. Lorsqu'on introduit des gaz pollués par la partie basse de l'électro filtre, ils traversent l'espace inter électrodes en montant. Les particules qu'ils contiennent captent au passage des ions et se chargent fortement ; elles sont alors soumises à la force de Coulomb qui les dirigent vers la surface interne de l'électro filtre où elles se déposent.

Les gaz sortent donc dépollués par la partie haute de l'électro filtre tandis que les particules piégées s'accumulent sur sa surface interne en formant une couche de poussière. Par un procédé mécanique qui consiste à frapper les parois de l'électro filtre à l'aide d'un marteau, on fait tomber les poussières dans le fond de l'électro filtre où un dispositif prévu à cet effet permet de les évacuer.

[11]

**I.13 Conclusion**

Dans ce chapitre introductif, nous avons présenté un aperçu général sur les décharges électriques. Nous avons d'abord entamé des définitions des décharges électriques où nous avons rappelé les différents paramètres physiques qui interviennent au sein des décharges électriques. Nous avons également donné la description d'une décharge électrique (Townsend, Paschen, Théorie de streamer). Nous avons terminé ce chapitre par quelques inconvénients et avantages de l'effet couronne et leur domaine d'application.

Pour modéliser la décharge électrique, nous présenterons, dans le chapitre suivant le modèle utilisé généralement pour résoudre l'équations de continuité et l'équations de transfert de quantité de mouvement, déduit par l'équations de Boltzmann et couplées à l'équations de Poisson.