

Chapitre 1: Décharge

DECHARGE ELECTRIQUE

I-1- Aperçu bibliographique sur les décharges

I-1-1-Introduction :

Les phénomènes de décharge électrique, étudiés pourtant depuis près de deux siècles, font toujours l'objet de recherche active auprès des scientifiques[7][8]. On pourrait s'étonner de cet état de fait mais on comprendrait vite que cela n'est dû qu'à la très grande complexité du phénomène et des mécanismes qui le constituent. Cependant de grandes avancées ont été faites ces dernières décennies dans l'amélioration des moyens de diagnostic des premiers instants de la décharge et donc dans l'étude des mécanismes d'initiation [9]. Cela a permis d'accroître les connaissances sur le phénomène et d'avancer dans les applications qui ont d'ailleurs connu de bien plus larges expansions [10][11].

I-1-2- Aspect historique :

L'étude scientifique des décharges électriques a commence au XVIII^{ème} 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 a V.V. Petrov de produire le premier arc électriques 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 a une pression de l'ordre de 100 Pa sous 1000 Volt. Par la suite, à la fin du XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème} 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^{ème} 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 [12].

I-1-3- Généralités sur les décharges électriques :

Les plasmas de décharges réalisés au laboratoire et utilisés pour des applications technologiques sont des milieux faiblement ionisés contenant des électrons libres, des ions positifs et éventuellement des ions négatifs. Selon les valeurs de températures et/ou de degré d'ionisation ces plasmas peuvent être classés en deux grandes catégories : les plasmas thermiques et les plasmas non thermiques hors équilibre [13], [14], [15].

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, couronne ou encore les décharges à barrière diélectrique (DBD) [16],[17].

La décharge luminescente est une décharge obtenue le plus souvent à basse pression (moins de 10 mbar), entre deux électrodes planes. Les électrons produits dans ce type de décharge sont fortement énergétiques. Les atomes neutres excités ainsi que les molécules génèrent une luminescence typique (comme dans les tubes fluorescents). Toutefois, les décharges luminescentes ou ce que l'on appelle aussi les décharges *glow*, ne sont pas adaptées pour la synthèse chimique [18]. Notons que des décharges luminescentes à pression atmosphérique ont été développées très récemment

La décharge couronne est une décharge non homogène, générée à pression atmosphérique dans un système d'électrodes fortement dissymétriques (*i.e* système pointe- plan) [19], [20], [21]. En effet, lors de la décharge, l'électrode de faible rayon de courbure soumise à une haute tension est le siège d'un fort champ électrique, qui constitue le facteur clé dans l'ionisation des espèces neutres présentes dans le gaz [22].

La décharge à barrière diélectrique, ou ce qu'on appelle aussi la décharge silencieuse, combine le large volume d'excitation de la décharge *glow* avec les caractéristiques haute pression de la couronne. Dans ce type de décharges, un diélectrique couvre l'une des électrodes. la surface entière de l'électrode devient effective pour les réactions chimiques [23]. La DBD est initiée en chaque point du gap. Les charges ainsi cumulées sur le diélectrique forment un champ électrique qui

s'oppose au champ appliqué et permet d'interrompre le courant pendant quelques nanosecondes. La durée du pulse de courant dépend de la pression, des propriétés du gaz ainsi que de la nature du matériau diélectrique.

Tableau I: Paramètres caractéristiques des décharges dans les gaz [24]

	Décharge Glow	Décharge Couronne	DBD ou décharge silencieuse
Pression	< 10mbar à 1	1bar	1bar
Champ électrique	10V/cm	0.5-10kV/cm, variable	0.1-100kV/cm, variable
Champ électrique réduit	50Td	2-200Td, variable	1-500Td

Les mécanismes à l'origine de l'initiation et du maintien des décharges électriques sont multiples. Ils dépendent des techniques utilisées pour l'initiation et des conditions ambiantes de pression et de composition des gaz plasmagènes [25]. Ces mécanismes sont revus dans les paragraphes qui suivent dans le cas de deux types de décharges. Les décharges continues basse pression qui furent les systèmes les plus étudiés du point de vue académique et les décharges à pression atmosphérique dans les systèmes couronne que nous allons plus particulièrement utiliser dans le cadre de ce travail.

I-2- Régimes de décharge dans un gaz :

Un gaz soumis à une décharge de laboratoire, peut se trouver dans différents régimes de fonctionnement. Afin d'identifier ces régimes, nous considérons une décharge de type continu : nous connectons à une source de tension continue, deux électrodes (anode et cathode) séparées par le gaz (à basse pression et confiné) qui sera ionisé.

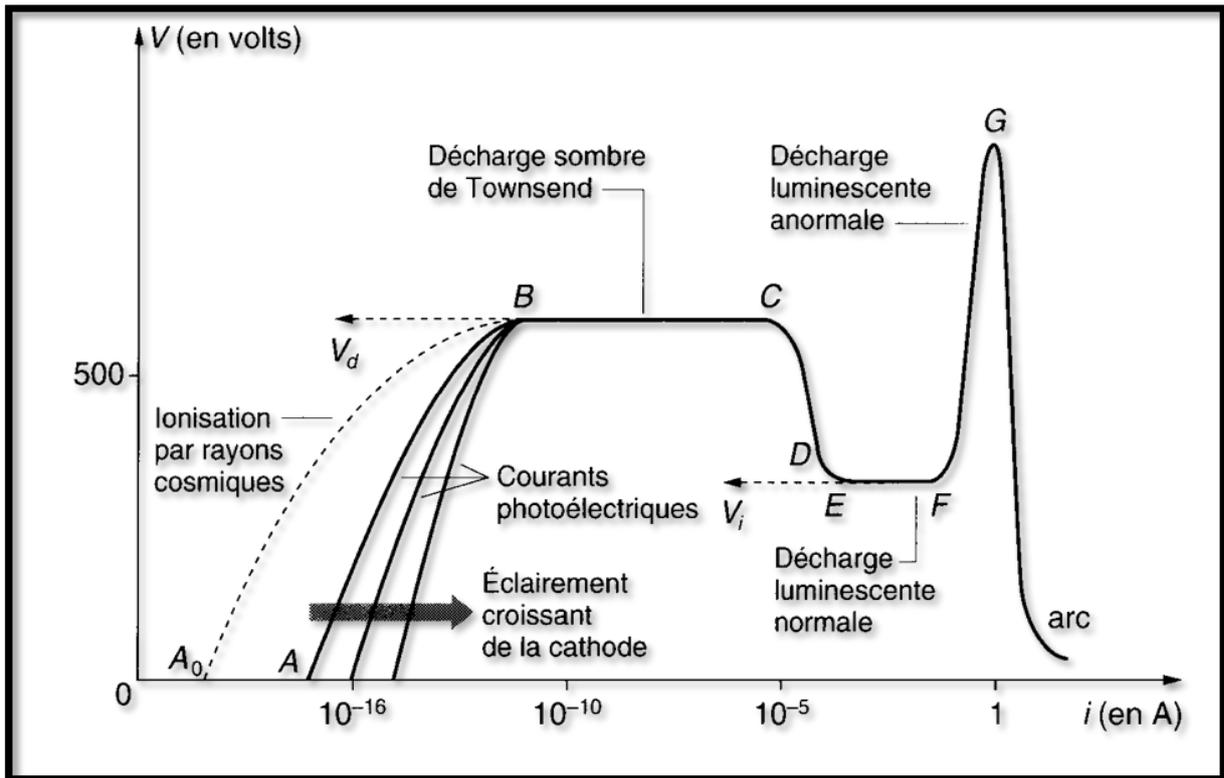
Les décharges obtenues dans le dispositif de Townsend peuvent être analysées en examinant la courbe caractéristique $V(I)$ qui lui est associée . Quatre régimes [26], [27] de décharges peuvent être obtenus dans ce type de systèmes (Figure II) :

Le premier régime : correspond aux décharges non autonomes. La décharge ne peut exister qu'en présence d'un moyen extérieur, souvent une source lumineuse, assurant la production d'électrons primaires à la cathode par effet photoélectrique.

Le second régime : correspond à ce que l'on appelle les *décharges de Townsend*. Il est caractérisé par une croissance quasi-verticale du courant pour une valeur de tension appelée tension disruptive. Cette croissance correspond au passage d'un régime où la multiplication des électrons est principalement gouvernée par l'ionisation par impact d'électrons sur les molécules du gaz à un régime où l'essentiel de la multiplication est assurée par l'augmentation du flux d'électrons extraits par bombardement ionique de la cathode. Dans le régime de Townsend, la charge d'espace générée par le plasma est faible et le champ électrique reste égal au champ Laplacien.

Le troisième régime : correspond aux *décharges luminescentes*. Dans le cas des basses pressions considérées, ces décharges sont également généralement entretenues par un mécanisme de type Townsend. La grande différence qu'elles présentent avec les décharges dites de Townsend réside dans le fait que c'est le champ de charge d'espace et non pas le champ Laplacien qui gouverne la dynamique des espèces chargées.

Le quatrième régime : correspond au régime d'arc. Celui-ci est caractérisé par une très faible tension de maintien (quelques dizaines de volts), de fortes densités de courant et un échauffement important de la décharge dont la température peut facilement atteindre plusieurs milliers de Kelvin. Le maintien du régime d'arc est également gouverné par des processus élémentaires à la cathode. Ces processus très complexes sont cependant différents de ceux rencontrés dans le cas des décharges luminescentes. On cite souvent des effets comme l'effet thermoionique, l'émission de champ, ..., etc. Le maintien d'un régime d'arc impose également de fortes contraintes sur l'alimentation électrique qui doit pouvoir assurer la circulation de courants forts



Figure(I.1) : Régimes de décharge en courant continu

I-3- Les applications industrielles de la décharge couronne :

Les applications de la décharge couronne actuellement les plus répandues sur un plan industriel sont soit des applications chimiques, soit des applications qualifiées à tort d'électrostatiques.

En ce qui concerne les applications chimiques, celles qui connaissent déjà un grand développement industriel concernent surtout des procédés de fabrication ou de traitement. Elles utilisent, de façon plus ou moins spécifique suivant les cas, les différents types de particules réactives formées par la décharge dans les gaz plasmagènes, à savoir :

- Des espèces chargées, ions à énergie cinétique négligeable de la décharge diffuse ou ions énergétiques des composantes filamentaires de la décharge
- Des espèces réactives non chargées, se présentant sous la forme de fragments moléculaires (atomes et radicaux) ou espèces excitées (principalement par excitation vibrationnelle ou électronique).
- Des photons issus de réactions d'activation du milieu gazeux.

La principale utilisation de la décharge couronne comme procédé de fabrication concerne la synthèse de l'ozone, elle est présentée ci- après. Elle met profit le grand pouvoir de dissociation de la décharge couronne, permettant de fabriquer de l'ozone à partir d'un fort taux de production d'oxygène ou de l'air sec.

Les procédés de traitement par décharge de couronne s'appliquent en premier lieu au traitement superficiel de matière plasmatisée, notamment par oxydation de surface.

Elles sont alors aptes à subir des opérations, telles que impression ou collage, qui nécessitent des qualités de mouillabilité améliorées. Un traitement des matières plasmatisées par fluoration de surface diminue au contraire la mouillabilité, par exemple dans le but d'imperméabilisation. Ce type de traitement a déjà fait l'objet de développements, mais ces traitements ont plutôt été fondés sur l'utilisation de décharges micro- ondes pour des traitements superficiels de pièces présentant des profils très tourmentés. La décharge couronne permet de réaliser des équipements fiables et à cout réduit. Un avantage spécifique réside dans le fonctionnement à pressions faibles.

Les applications dites électrostatiques, utilisent exclusivement les ions de la décharge, tantôt comme source de charges, tantôt comme source de transport de particules pour des procédés :

- De dépôt de charges (photocopie)
- De neutralisation de charges (prévention d'incendies d'explosion)
- D'entraînement de particules (dépoussiérage, peinture, tri de particules).

Par contre, l'utilisation de la décharge couronne à des fins de diagnostic s'ouvre sur un domaine d'application encore peu exploré. L'idée n'est cependant pas nouvelle ; en sont témoins les compteurs Geiger- Muller, qui ont été longtemps utilisés pour la détection de particules ionisantes dans les domaines de radioactivité et de la physique nucléaire et dont le fonctionnement tirait profit du grand pouvoir de multiplication électronique de la décharge qui peut lui faire jouer un rôle d'amplificateur de courant

I-4- Caractéristique du Claquage dans les gaz :

Les Claquages électriques, visibles à l'œil nu par l'étincelle ou la décharge produite correspond au moment où le champ électrique dépasse la valeur seuil nécessaire à l'amorçage de la décharge. Les mécanismes de claquage dans les gaz sont principalement [28], [29].

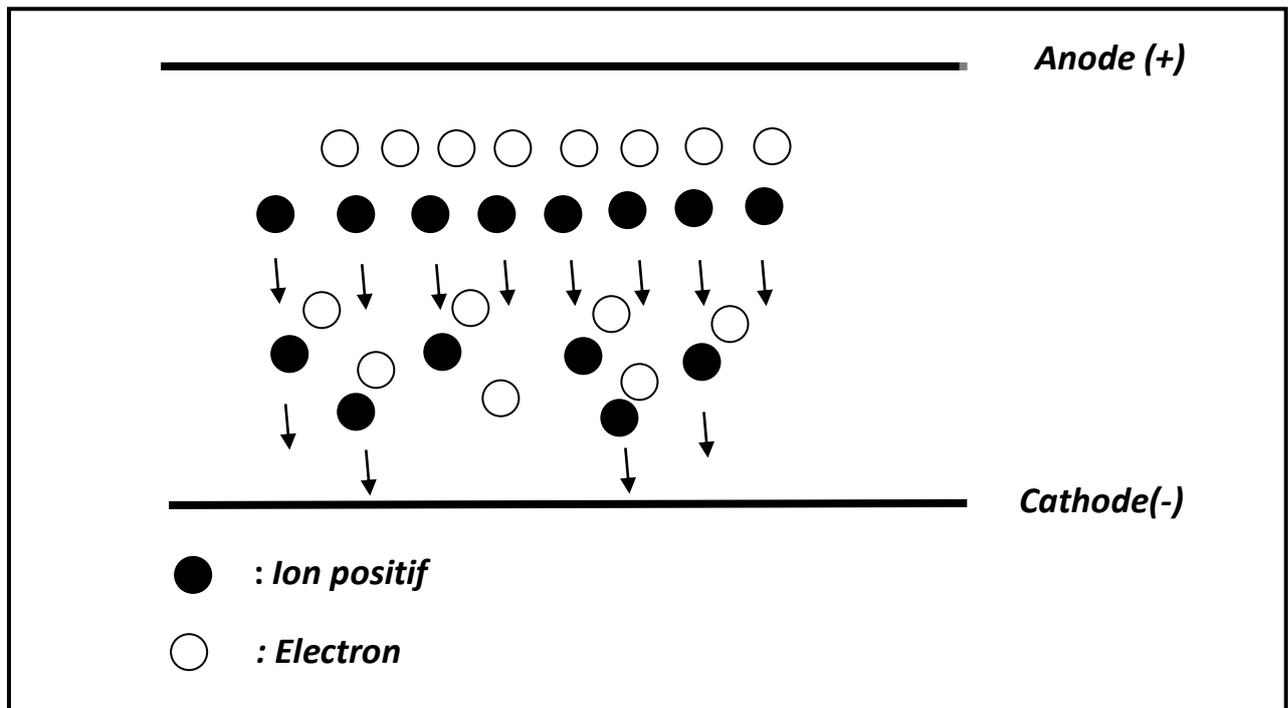
-le mécanisme de l'avalanche.

-le mécanisme du Streamer.

I-4-1- Avalanche électronique (décharge Townsend) :

Si on considère un gaz contenu entre deux électrodes, il peut exister dans ce gaz en l'absence de tout champ électrique appliqué, un certain nombre de charges créées par des mécanismes naturels, tels que rayonnement ultraviolet ou radioactivité, soit par des mécanismes artificiels, par exemple en bombardant ultraviolet pour en extraire des électrons .

-Si un champ électrique est appliqué, les électrons sont suffisamment accélérés par le champ pour produire d'autres électrons par les collisions, qui à leur tour acquièrent par le champ électrique assez d'énergie pour ioniser d'autres atomes, et ainsi de suite, et le nombre d'électrons libres continuera à augmenter comme ils continuent à se déplacer sous l'action du champ électrique. C'est ce phénomène, qui provoque un accroissement exponentiel de la densité de charge électronique lorsqu'on s'éloigne de l'électrode. Le claquage à donc lieu fait du phénomène d'avalanche ceci est montré sur figure (I.2) .



Figure(I.2) : Avalanche électronique

Cette avalanche peut être étudiée quantitativement à partir de la connaissance de coefficient d'ionisation de Townsend. α , représente le nombre d'électrons (ou ions positifs) créés par un électron par élément de longueur le long d'une ligne de force du champ appliqué. Une expression empirique exploitable considère que l'énergie thermique des électrons est acquise

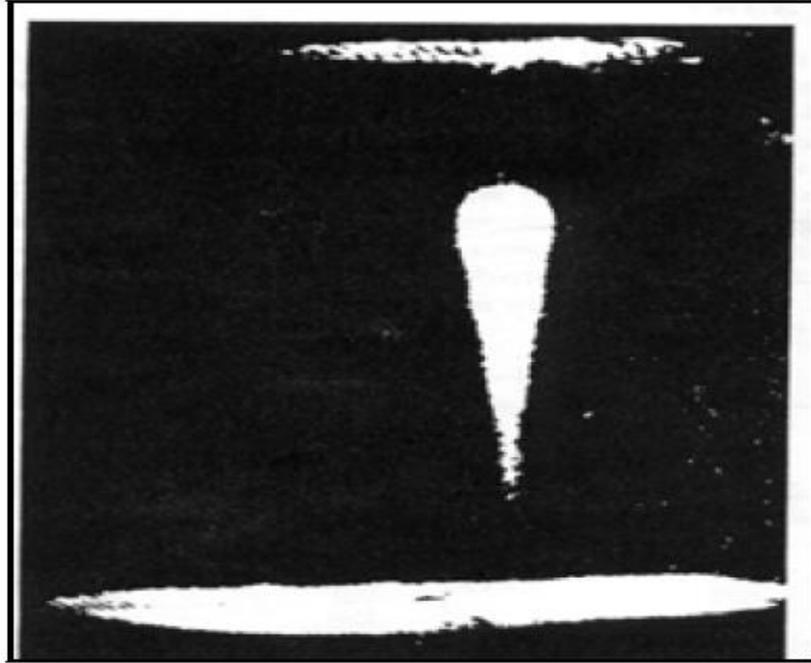
par le travail du champ électrique sur une distance de l'ordre du libre parcours moyen. Or ce dernier est inversement proportionnel à la pression. Donc, en introduisant les constantes A et B déterminées expérimentalement on a :

$$\alpha = AP \exp (-BP/E)$$

I-4-2- Streamer :

La théorie sur les streamers a été développée suite aux travaux de Loeb, Meek et Raether en 1940. Les nombreuses expériences menées par les groupes de Raether [30] sur des décharges planes et de Loeb [24] sur les décharges couronnes ont mis en évidence en l'occurrence, 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. Ces pulses de courant durent en général moins d'une centaine de nano-secondes, ont des intensités de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de milliampères et sont accompagnés d'une émission lumineuse moins intense que celle caractérisant les étincelles. Cette émission dessine un canal ayant un rayon de l'ordre d'une centaine de microns qu'on appellera micro-décharge.

Dans le cas de décharges couronnes fortement asymétriques, ces phénomènes lumineux ont également été observés dans des zones où le champ Laplacien est quasi-nul. La présence de ces pulses indique l'occurrence d'un phénomène permettant d'entretenir une ionisation importante même en absence de champ électrique Laplacien significatif. Cette ionisation ne pouvait donc être entretenue que par un champ de charge d'espace. Le problème qui se posait dès lors concernait la source de la charge d'espace. La réponse à cette question a été encore une fois amenée par les expérimentateurs. Ces derniers ont en effet clairement montré soit par des analyses de courant, des visualisations en chambre de Wilson (cf. Figure I.3) ou à l'aide de diagnostics par caméra streak que la production de ces micro-décharges était toujours précédée par la formation et le développement d'avalanches. Dans le cas d'électrodes fortement asymétriques, ces phénomènes d'avalanche avaient lieu au voisinage de l'électrode à forte courbure où le champ Laplacien est significatif.



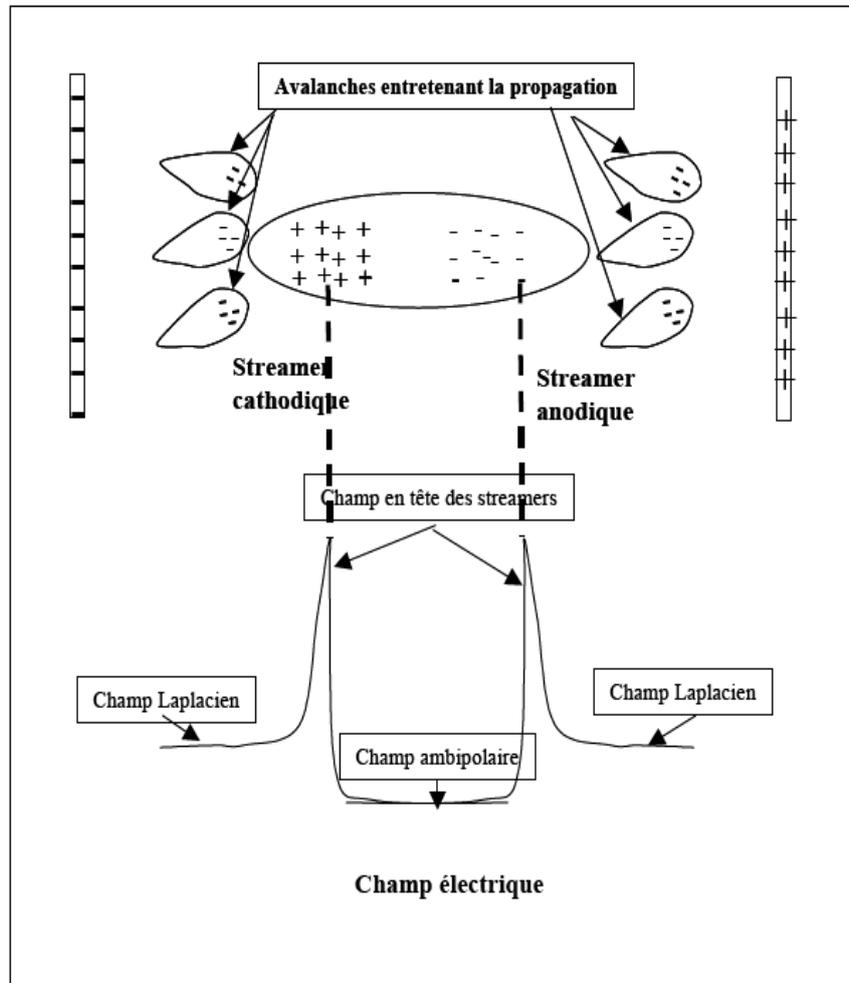
Figure(I.3) : photographie dans une chambre[30]

A partir de ces observations il a été possible de proposer un autre mécanisme de claquage dans les décharges à haute pression. Le scénario stipule que le claquage commence d'abord par la formation d'une avalanche. Celle-ci va se développer jusqu'à ce que son champ de charge d'espace devienne plus important que le champ Laplacien. A partir de cet instant c'est le champ de charge d'espace qui pilote la dynamique de la décharge. On obtient une onde

d'ionisation qui se propage sous l'effet de son propre champ de charge d'espace. C'est cette onde d'ionisation qu'on appelle streamer [31].

Un nombre important de travaux ont ensuite été menés pour bien caractériser la transition avalanche-streamer. Il s'agissait notamment de définir le niveau à partir duquel une avalanche devenait assez importante pour donner lieu à la formation d'un streamer. Des modèles semi-analytiques associés à des mesures de tailles d'avalanche ont montré que ceci avait lieu à partir du moment où l'avalanche contenait entre 10^8 et 10^9 ions [31].

Comme la propagation d'un streamer ne dépend que de son propre champ de charge d'espace, elle peut à priori avoir lieu vers la cathode ou vers l'anode. Cette possibilité permet de distinguer deux types de streamers : les streamers anodiques et les streamers cathodiques.



Figure(I.4) : principe de steamer

I-5- Quelques propriétés des décharges couronnes :

Il est difficile de créer un plasma hors-équilibre stable à pression atmosphérique car le claquage, comme on l'a vu plus haut se fait de manière violente et incontrôlée, et peut conduire très rapidement à des courants très élevés. Un moyen d'entretenir un plasma hors équilibre à pression atmosphérique est de limiter son espace inter électrode (micro décharge), ou de limiter l'extension de la zone de champ électrique élevé, en utilisant une géométrie d'électrode très inhomogène, l'une des deux électrodes étant beaucoup plus fine que l'autre

(décharge couronne) .Ces décharges sont caractérisées par le fait qu'une des deux électrodes est à forte courbure. Plusieurs configurations sont usuellement adoptées. Certaines d'entre elles sont schématisées sur la Figure (I.5) On distingue deux grandes classes de couronnes : les couronnes positives et les couronnes négatives.

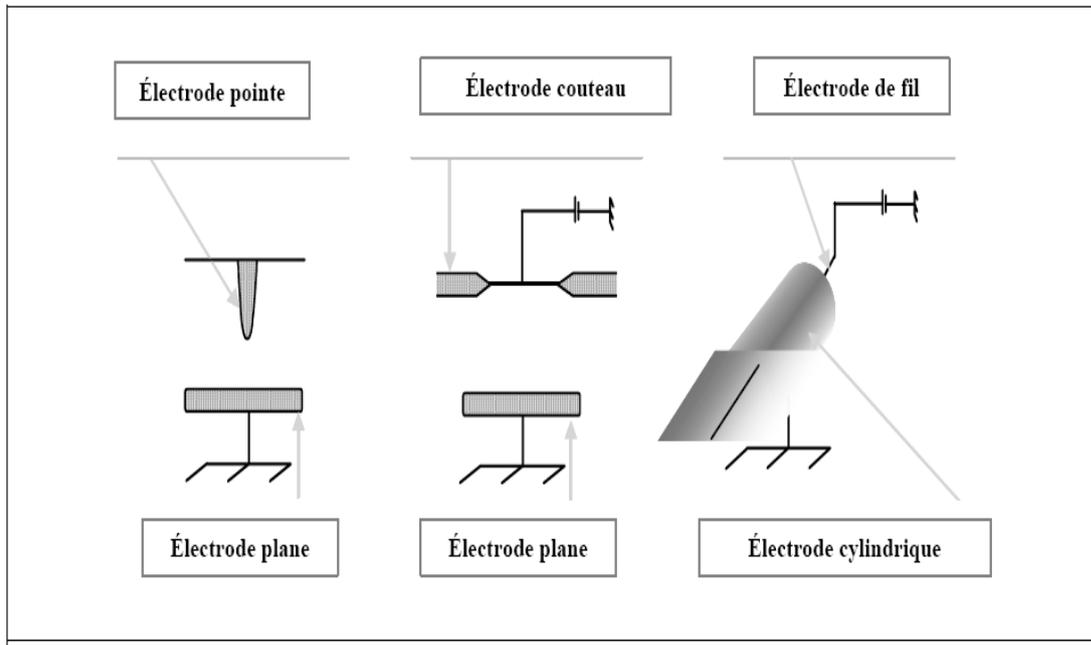


Figure (I.5) :Les différentes configurations dans le cas d'une décharge couronne[32]

I-5-1-Décharges couronnes positives :

Dans ce cas une tension positive est appliquée à l'électrode de forte courbure. On distingue trois types de régimes qui apparaissent dans l'ordre croissant de la tension appliquée. On a tout d'abord un régime '*burst*' ou scintillement à basse tension [36], [38]. Ce régime est caractérisé par de très faibles pulses de courant d'intensité comprise entre 10^{-8} A et quelques centaines de μ A. Ces pulses s'établissent en environ 20 ns et durent environ quelques centaines de nanosecondes. Ils correspondent à des éclats de décharges (*burst* en anglais) qui ont lieu au voisinage immédiat de l'électrode à forte courbure. L'établissement de ces éclats de décharge a lieu par initiation d'une avalanche au voisinage de l'électrode. Les électrons de l'avalanche se dirigent en se développant vers l'anode. On assiste alors éventuellement à une transition avalanche/streamer et à l'établissement d'un champ de charge

d'espace qui s'oppose au champ Laplacien. Il se forme alors une charge d'espace qui s'étend radialement sur l'électrode à forte courbure. L'action du champ de charge d'espace fait en sorte que le champ total devient trop faible pour entretenir la décharge ou permettre l'initiation d'une autre avalanche. On assiste à une déplétion des électrons par attachement avec les molécules du gaz ou absorption à l'anode. Il reste une charge d'espace positive formée par les ions positifs produits lors de la phase de décharge (cf. Figure (I.6)). Ces ions vont dériver loin de l'anode jusqu'à ce que la charge d'espace autour de celle-ci diminue à un niveau où le champ total devient assez important pour ré-initier un nouvel éclat de décharge. La fréquence de ces éclats de décharges est typiquement de l'ordre du temps caractéristique de dérive des ions. De ce fait la fréquence des pulses augmente avec la tension appliquée et peut atteindre des valeurs de l'ordre de quelques kHz. Cette fréquence dépend également de l'intensité de la source extérieure d'ionisation qui permet d'initier les avalanches. On utilise cette propriété dans les compteurs Geiger où l'intensité du rayonnement radioactif est déterminée à partir de la fréquence des éclats de décharges qu'il génère dans un système couronne.

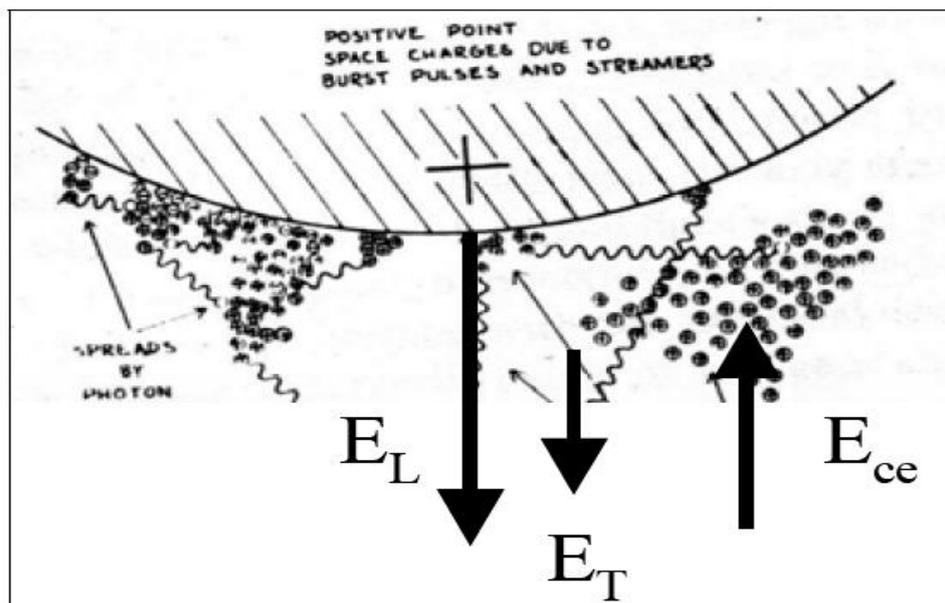


Figure (I.6) : schéma d'un éclat de décharge (Burst) montrant la charge d'espace positive se construit au voisinage de la cathode et comment la photo-ionisation permet l'étalement radial de la charge d'espace[31].

Lorsque l'on continue à augmenter la tension, les avalanches initiées près de l'anode

donnent naissance à des streamers de plus en plus vigoureux. Deux cas de figures peuvent avoir lieu selon le pouvoir attachant du gaz. Dans un gaz où l'attachement est faible, les avalanches initiées au voisinage de l'anode se développent de manière assez importante pour acquérir une charge d'espace permettant d'induire une onde d'ionisation cathodique. Si la tension reste à un niveau raisonnable, ces ondes d'ionisation vont se propager vers la cathode et s'éteindre dans l'espace inter-électrode avant d'atteindre la cathode. La propagation de ces streamers est assurée par les processus de photo-ionisation dans le gaz. Ceux-ci peuvent conduire à une ramification du streamer initial qui acquiert une structure tridimensionnelle. Les courants associés à ces streamers, souvent appelés primaires dans le sens où ils n'induisent pas de claquage par passage à l'arc [34], sont de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de milliampères. La succession des phases d'initiation, de propagation-ramification et d'extinction des micro-décharges de streamers constitue le cycle élémentaire d'une décharge couronne. Si maintenant le gaz présente un pouvoir d'attachement important, les avalanches près de l'anode vont donner à la formation d'un nuage d'ions négatifs qui va induire un champ de charge d'espace au voisinage de la décharge (cf. Figure (I.6)). Dans cette zone relativement limitée et comprise entre le nuage d'ions négatifs et l'anode règne un champ fort qui peut donner lieu, si le gaz est suffisamment attachant à un claquage de type Townsend où le nuage d'électron négatif joue le rôle de *cathode*. Les électrons formés par photo-ionisation dans l'espace compris entre le nuage d'ions négatifs et l'anode vont être accélérés vers l'anode en induisant une forte ionisation dans cette espace. Les ions positifs produits par l'ionisation sont accélérés vers les ions négatifs où ils subissent une neutralisation mutuelle.

La perte d'ions négatifs va être compensée par des réactions d'attachement induites par une fraction des photoélectrons (cf. Figure (I.6)). Le régime de décharge ainsi obtenu est stable, stationnaire et auto-entretenu.

Si on continue à augmenter la tension, les streamer, générés sont de plus en plus importants et finissent par atteindre la cathode (cf. Figure.7). On déclenche comme décrit précédemment une onde d'ionisation qui se propage de la cathode vers l'anode afin d'équilibrer le potentiel entre les deux électrodes. Il se forme alors une structure filamentaire ayant des caractéristiques similaire à la décharge continue. Un échauffement important se produit dans cette structure filamentaire qui finit par transiter vers un régime d'étincelle, *i.e.*, arc transitoire chaud. C'est le claquage [35]

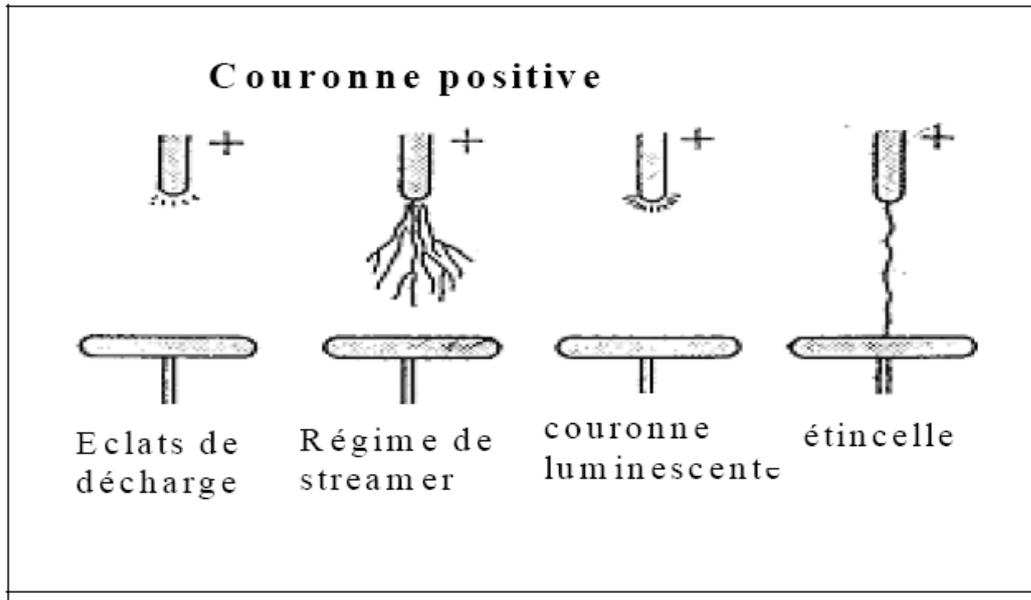
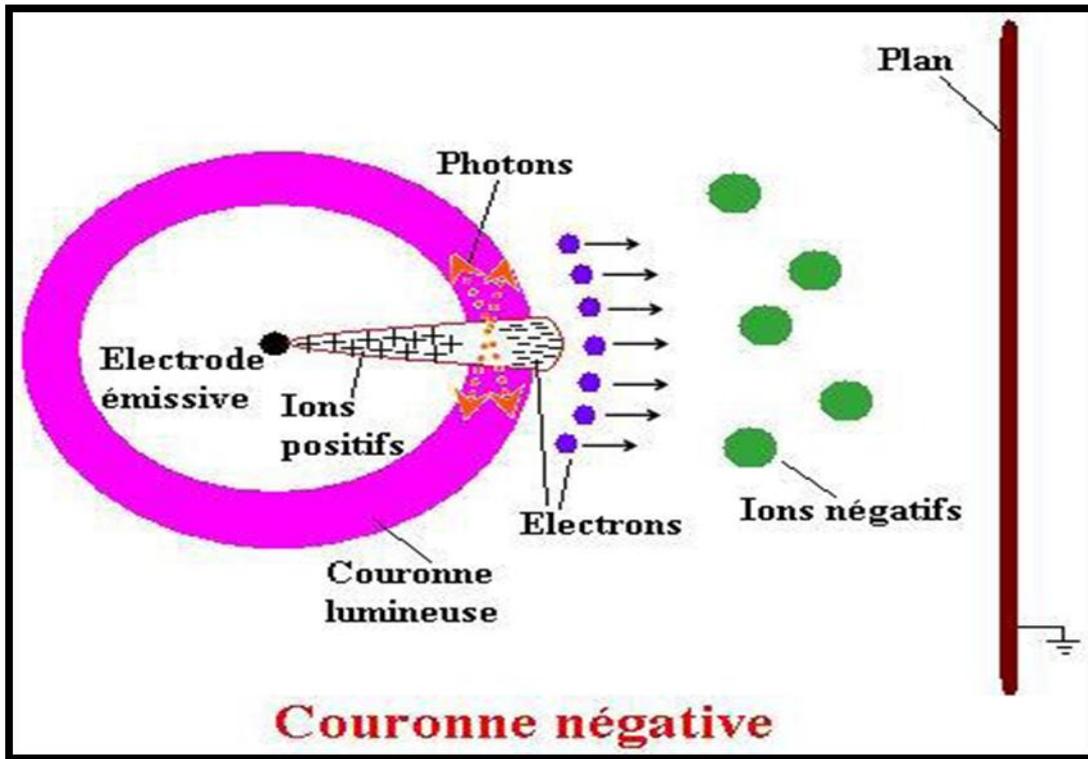


Figure (I.7) : Différents régimes de décharges couronnes en fonction de la tension. Cette dernière augmente quand on va de gauche à droite [36].

I-5-2 -Décharge couronne négative :

Dans le cas d'une décharge sur une cathode, du fait de la grande différence de rayon de courbure entre les électrodes des précipitateurs (classiquement des fils et des plaques), le champ électrique est fortement inhomogène (Figure I.8), l'avalanche électronique se développe dans ce cas jusqu'à une distance telle que l'intensité du champ électrique n'est plus suffisante pour assurer la multiplication électronique. Ces mécanismes sont à l'origine de la formation d'une charge d'espace ionique dans l'espace inter-électrodes. En dehors de cette région d'ionisation, les électrons libres s'attachent rapidement aux molécules neutres pour former des ions négatifs ; à partir d'une certaine distance de l'électrode ionisante, tout se passe comme si l'électrode à faible rayon de courbure émettait des ions de la même polarité qu'elle [36][37]. Les phénomènes d'ionisation qui ont lieu dans la couronne lumineuse et qui génèrent les électrons libres, donnent aussi naissance à une forte densité d'ions positifs. Sous l'action du champ électrique, ces ions se déplacent vers le fil et en raison de leur

mobilité bien plus petite que celle des électrons, une charge d'espace ionique se forme dans cette zone (Figure(I.8)).



Figure(I.8) : Représentation schématique d'une décharge couronne négative

I-6- conclusion :

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique a été effectuée généralisée décharge électrique dans les gaz. Dans le chapitre suivant, nous nous sommes proposés d'étudier l'influence, que ces transferts d'énergie, pouvait avoir sur la formation des inhomogénéités des neutres (densité, température), et sur les mouvements dans le gaz qui en résultait.