

## Chapitre I

### Etude bibliographique sur les décharges électriques dans les gaz

#### **I.1. Introduction:**

La physique des plasmas existe depuis 1920 mais le terme plasma a été introduit en 1928 par le physicien américain I. Langmuir. Elle est née de l'étude des décharges dans le gaz. Dans la nature, le plasma constitue le quatrième état de la matière et fait suite dans l'ordre croissant des températures, aux états solide, liquide et gazeux. La phase plasma correspond à l'équilibre thermodynamique, à l'ionisation totale d'un gaz par collisions entre les particules neutres. Cette situation ne peut être atteinte, dans ces conditions qu'à très haute température (supérieure à 50000 K) afin que l'énergie d'agitation thermique soit du même ordre de grandeur que le seuil d'ionisation des neutres.

L'appellation plasma devrait être réservée aux gaz complètement ionisés et globalement neutres. Cela conduit à une grande diversité de situations physiques, puisqu'un grand nombre de plasma de laboratoire sont hors équilibre thermodynamique, l'ionisation résultant des collisions entre électrons et neutres [les électrons accélérés par un champ électrique extérieur, ont alors une température élevée par rapport à celle des neutres].

Cette dernière se fait par le transfert de l'énergie cinétique des électrons aux molécules neutres du gaz, et dans ce cadre il existe deux types de collisions entre ces éléments :

- les collisions élastiques, sont responsables de la conduction et de la diffusion de la chaleur. Elles conduisent essentiellement à un changement de trajectoire des particules et des transferts d'énergie cinétique, sans modification des énergies internes.
- les collisions inélastiques, sont responsables de changements au niveau de l'énergie interne des molécules, de la nature des particules (ionisation, dissociation, attachement électronique, etc.), en fonction de l'énergie cinétique des électrons. Ces collisions participent à la réactivité chimique des plasmas.

Parmi les décharges électriques, on trouve les décharges couronne qui se développent entre deux électrodes dissymétriques (par exemple, pointe-plan) dans un milieu gazeux à champ non uniforme. Tout au long de sa propagation, la décharge électrique laisse derrière elle une traînée de plasma (canal ionisé), constituée d'espèces neutres excitées ou non et d'espèces chargées (électrons ou ions).

Plusieurs études ont été menées sur ce type de décharge, pour expliquer les différents mécanismes mis en jeu lors de la formation, du développement et de la propagation de cette décharge. Au début du siècle, Townsend [1] donna une théorie pour l'obtention d'une décharge auto-entretenu. Cette théorie trouve sa limite à haute pression. Par la suite, à partir des années 1940, Loeb [2], Meek [3] et Raether [4], proposent un nouveau modèle de propagation de l'avalanche électronique.

## **I.2. Classification des plasmas:**

Devant cette difficulté de classification, on caractérise les plasmas à partir de leur degré d'ionisation, leur densité et leur température électronique.

La physique des plasmas tient une place très importante dans l'étude des milieux naturels (astrophysique) et des gaz ionisés produits en laboratoire.

Dans l'industrie on distingue trois familles de plasmas:

- ❖ Les plasmas chauds: correspondent à des températures supérieures à  $10^6$  K (l'objectif étend de produire de l'énergie électrique à partir de la fusion contrôlée)
- ❖ Les plasmas thermiques: caractérisés par des températures de fonctionnement supérieures à 3000 K (utilisation des décharges d'Arc pour la soudure, la dépollution, ...). Ces plasmas thermiques sont donc généralement à l'équilibre thermodynamique local (ETL).
- ❖ Les plasmas non-thermiques froids : les ions et les neutres restent à des températures inférieures à 1000 K, alors que les électrons sont à des températures élevées (applications au traitement de surface, à l'élaboration de matériaux nouveaux, à la dépollution à la génération d'Ozone, à la chimie assistée par plasma,...).

## **I-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 [5] ces plasmas peuvent être classés en deux grandes catégories : les plasmas thermiques et les plasmas non thermiques hors

équilibre [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

[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 [6,2]. 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) [7,8,9]. 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. Nous .

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[10]. Dans ce type de décharges, un diélectrique couvre l'une des électrodes. la surface entière de l'électrode devient effective pour les réactions chimiques[11,12,13]. 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.

	Décharge GLOW	Décharge couronne	DBD ou décharge silencieuse
pression	<10mbar à 1 atm récemment	1bar	1bar
Champ électrique	10V/cm	0.5-10KV/cm, variable	0.1-100KV/cm,variable
Champ électrique réduit	50Td	2-200Td,variable	1-500 Td

**Tableau I: Paramètres caractéristiques des décharges dans les gaz [14]**

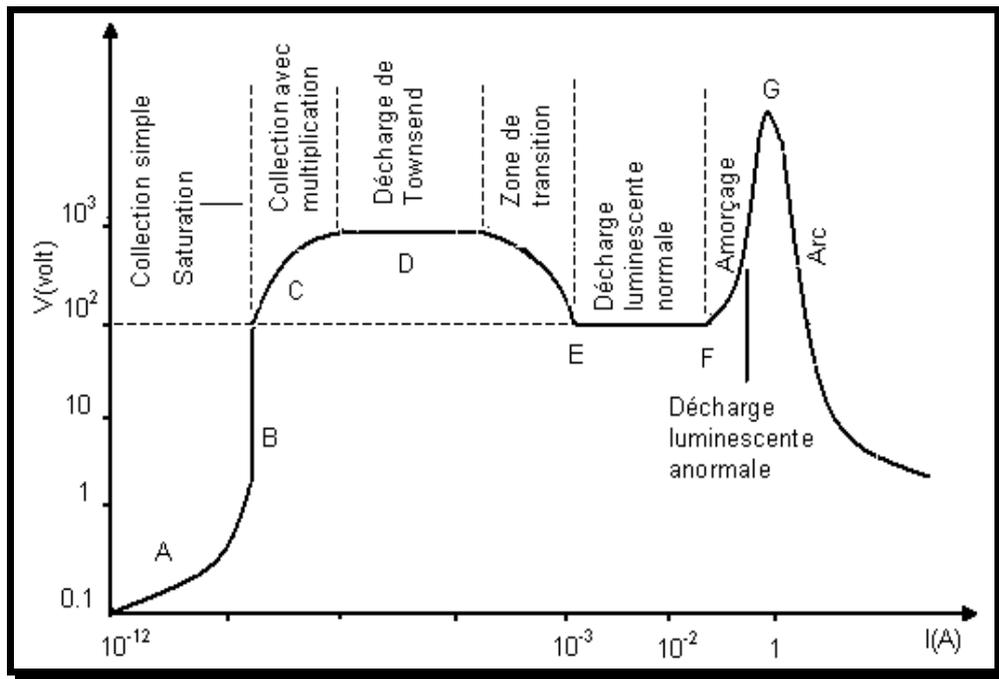
Les mécanismes à l'origine de l'initiation et du maintien des décharges électriques sont multiples. Ils dépendent des techniques utilisées pour l'initiation et des conditions ambiantes de pression et de composition des gaz plasmagènes [15]. Ces mécanismes sont revus dans les paragraphes qui suivent dans 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-4 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 ; .

- ❖ 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 type de régimes de décharges, 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 type de régime qui va nous intéresser dans l'étude des décharges haute pression est le *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 thermoïonique, 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[16]

### **I.5. Les sources de plasmas a la pression atmosphérique:**

Les collisions provoquées par les électrons énergétiques sont la source de toute la chimie du système. Les électrons primaires injectés dans le gaz entrent en collisions inélastiques avec les molécules majoritaires et leur cèdent de l'énergie principalement à travers des processus d'ionisation, de dissociation et d'excitation. Les électrons au fur et à mesure de leur pénétration dans le milieu gazeux déposent leur énergie cinétique via les processus inélastiques. La formation d'un plasma réactif s'arrête quand l'énergie des électrons devient inférieure aux plus bas seuils de collisions inélastiques des molécules du gaz. Dans

ces conditions, le faisceau d'électrons énergétiques a la capacité de générer à la pression atmosphérique un grand volume de plasma réactif plutôt homogène.

L'application des faisceaux d'électrons énergétiques pour l'élimination des effluents toxiques (NOx et SOx) contenus dans les gaz d'échappement a été initiée notamment par la société EBARA au Japon [6], puis s'est développé dans les années 80 en Allemagne et aux Etats-Unis (voir en particulier les travaux de B. Penetrante qui ont permis d'étendre le champ d'application à la destruction des composés volatils organiques (COV) [7]).

L'efficacité ou le rendement énergétique de ces pilotes industriels comparée à celle des décharges électriques n'a pas fait l'unanimité en raison des méthodes de mesure de l'énergie injectée qui diffèrent dans les deux cas. A titre d'exemple, Penetrante soutient une plus grande efficacité des faisceaux d'électrons [8] tandis que Mizuno accorde deux fois plus d'efficacité à une décharge couronne pulsée [9].

Les autres méthodes consistent à créer les électrons énergétiques directement dans le gaz à dépolluer grâce à des décharges électriques. Les types de décharges testées pour la dépollution sont très nombreuses : les arcs électriques, les glidarcs [10], les torches à plasma, les décharges micro-ondes, ou encore les décharges couronne et les décharges à barrières diélectriques, etc.

## **I.6. Décharge atmosphérique:**

La foudre est un ensemble de phénomènes physiques et électriques complexes qui se présente dans la nature sous différentes formes [17, 18,19] :

### **I.6.1. Décharge nuage – sol:**

Parmi toutes les formes de décharges atmosphériques, la décharge nuage - sol est la moins fréquente mais certainement la plus contraignante et la mieux étudiée. Elle représente à peu près le tiers [20, 21,22,18] de la totalité des décharges atmosphériques que connaît le globe terrestre. Ce pourcentage est fonction des conditions météorologiques et physiques (humidité, température, localisation des charges dans le nuage,...), de l'altitude du nuage et enfin de la latitude. Elle se présente sous la forme d'une succession de décharges "nuage - sol - nuage" appelées coups de foudre. Ces derniers sont classés en deux groupes selon deux critères [23, 24,25] :

-la polarité du canal ionisé : les coups de foudre sont dits positifs ou négatifs

-le sens du traceur principal : les coups de foudre sont dits ascendants ou descendants.

On définit ainsi quatre types de foudre comme indiqué à la (figure I.3) où  $v$  est la vitesse de propagation du canal ionisé et  $i$  le courant de foudre.

Dans les régions tempérées, le type le plus fréquent est toutefois le coup de foudre négatif et descendant (80 à 90%). Les effets nuisibles de ces décharges touchent principalement les réseaux de communications et de transports d'énergie, les équipements industriels à base d'électronique et le transport aérien.

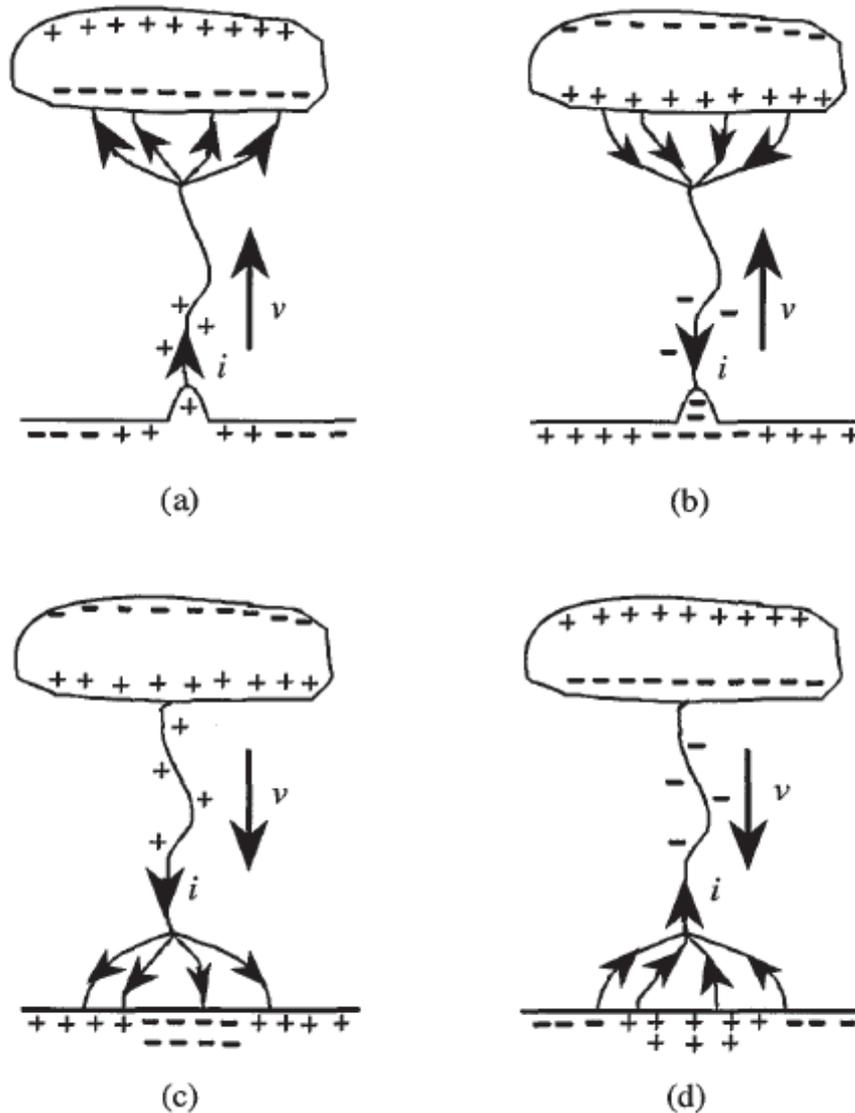


Figure I.3 : classification des coups de foudre [26]

- (a) : foudre ascendante positive (canal ionisé +, courant de foudre -)
- (b) : foudre ascendante négative (canal ionisé -, courant de foudre +)
- (c) : foudre descendante positive (canal ionisé +, courant de foudre +)
- (d) : foudre descendante négative (canal ionisé -, courant de foudre -)

### **1.6.2. Décharges intra – nuages:**

Contrairement aux décharges nuage - sol, la décharge intra - nuage est de loin la plus fréquente mais la moins étudiée [27,28]. Elle se présente sous la forme d'une succession d'arcs

électriques qui se tendent entre une ou plusieurs poches de charges opposées contenues dans un même nuage. En règle générale, ces arcs sont fortement ramifiés et se produisent à l'intérieur du nuage. Mais il arrive parfois qu'ils sortent du nuage pour y revenir en passant par l'extérieur, formant ainsi une espèce de pont très lumineux et visible de la terre. La durée de ces décharges est de l'ordre de plusieurs centaines de millisecondes et leurs effets sont plutôt minimes [29].

### **I.6.3. Décharges entre nuages:**

Comme leur nom l'indique, ces décharges se développent entre deux ou plusieurs nuages orageux différemment chargés se trouvant à une distance telle que l'ionisation de l'air qui les sépare devient possible. Elles se produisent généralement à de très grandes altitudes, et elles sont d'autant plus fréquentes que la densité de l'air est faible. Ces décharges inquiètent surtout les engins aéronautiques et les systèmes de transmissions par satellite [30,31].

### **I.6.4. Foudre en boule:**

Il s'agit là de l'une des formes les plus rares et les plus spectaculaires de la foudre. Une boule de feu, lumineuse de quelques dizaines de centimètres de diamètre, qui se déplace librement et avec une vitesse vertigineuse du ciel vers la terre [32]. La foudre en boule est crainte surtout par les fermiers, en raison des incendies et des dégâts matériels qu'elle peut provoquer.

### **I.6.5. Autres formes:**

D'autres formes de décharges sont observées de temps à autre, comme les décharges nuages – air [33], fréquentes dans les régions arides et en période de beau temps, ou encore les décharges chaudes, une forme très rare qui associe plusieurs types de décharges (les types 2 et 3) et qui se produisent à de très grandes altitudes, si bien qu'il est impossible d'entendre le tonnerre qui les accompagne, ou de les distinguer à l'œil nu.

### **I.7. Décharges électriques a la pression atmosphérique:**

Le plasma froid non thermique est créé à l'aide d'une décharge électrique hors équilibre établie entre deux électrodes par application d'une tension (continue, alternative ou pulsée).

Les électrons énergétiques sont créés lors de leur accélération par le champ électrique au sein même du milieu gazeux contrairement aux procédés à faisceaux d'électrons, où les électrons énergétiques sont injectés dans le milieu à partir d'une source externe. Lorsque l'énergie gagnée par le champ est suffisante, ont lieu les collisions inélastiques qui forment le plasma réactif recherché. Comme à la pression atmosphérique la décharge électrique possède généralement une structure filamentaire (le régime diffus relève plutôt d'une particularité de

la source de tension ou de la composition du gaz ou encore de la nature du diélectrique dans le cas d'une décharge DBD), le plasma est donc spatialement inhomogène (filament lumineux très fins de quelques dizaine de micromètres) tout en étant dans un régime transitoire de courte durée (quelques dizaines de nanosecondes).

Selon que la configuration des électrodes, les décharges électriques à la pression atmosphérique peuvent être de type couronne (lorsque l'électrode portée à la haute tension a une structure incurvée) ou DBD (lorsque une ou les deux électrodes sont recouvertes d'un diélectrique).

### I.7.1. Décharge à barrière diélectrique:

Les décharges à barrières diélectriques, sont caractérisées par la présence d'au moins une couche de matériau isolant en contact avec la décharge (Figure I.6), ce qui nécessite l'emploi d'une alimentation alternative ou pulsée. Dans ce type de décharge, le passage à l'arc électrique est empêché grâce à un isolant placé entre les électrodes. L'accumulation des particules chargées sur la surface du diélectrique, au moment de l'arrivée des filaments de décharge sur le diélectrique, génère un champ électrique qui s'oppose au champ externe dû à la tension appliquée entre les électrodes. Au fur et à mesure que les charges électriques se déposent sur le diélectrique, le champ électrique vu par le gaz diminue, ce qui induit à l'extinction de la décharge avant que les processus de thermalisation du gaz dans le canal de décharge n'aient eu lieu.

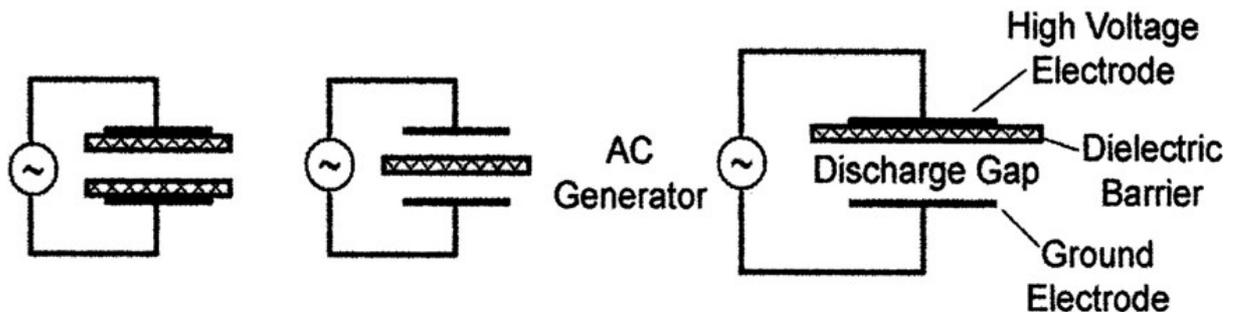


Figure I.6: Configurations existantes de décharges à barrière diélectrique [34].

Dans l'air à pression atmosphérique avec une distance inter-électrodes de quelques millimètres, le plasma est constitué d'une succession de filaments très fins ( $\sim 100 \mu\text{m}$ ) qui traverse l'espace gazeux sur des temps très courts ( $\sim 10\text{ns}$ ).

On utilise généralement une tension alternative avec une fréquence de répétition de quelques kHz pour générer un plasma réactif assez riche en espèces actives. Mais pour une source d'espèces actives encore plus efficace, on peut aussi utiliser des sources pulsées en

particulier mono-polaires (tension uniquement positive par exemple) où l'inversion des charges se produit non pas lorsqu'on passe de l'alternance positive à l'alternance négative comme dans les DBD classiques mais lorsqu'on passe de la partie montante à la partie descendante de l'impulsion de tension [35].

De plus dans le cas des configurations d'électrodes classiques (voir la Figure I.7) ci dessus), la décharge se développe principalement dans le volume gazeux. Il existe d'autres géométries d'électrodes où on peut être en présence d'une DBD de surface lorsque les deux électrodes sont en contact avec la même barrière diélectrique car le plasma se développe le long de la surface isolante. Ce type de géométrie peut être notamment utilisé pour les actionneurs plasmas [36].

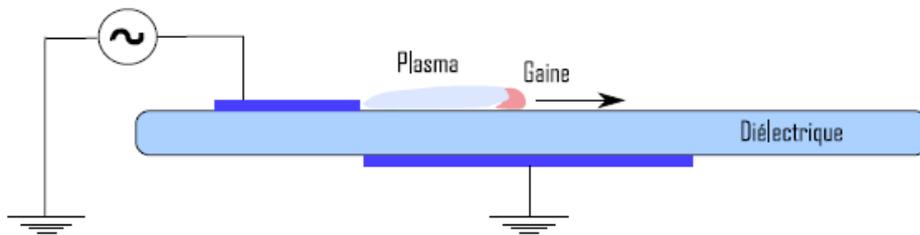


Figure I.7: géométrie de DBD générant de décharge de surface [37].

### **I.7.2. Décharges couronne:**

Les décharges couronne sont caractérisées par une dissymétrie géométrique des électrodes. Les configurations courantes utilisées dans les expériences sont de type pointe-plan, fil-plan et fil-cylindre (Figure I.8). Lors de l'application d'une haute tension au niveau de l'électrode ayant le plus petit rayon de courbure, le champ électrique réduit produit dans l'espace inter-électrodes est fortement inhomogène. Il a une valeur élevée au voisinage de cette électrode puis décroît rapidement au fur et à mesure qu'on s'approche de la cathode plane. A proximité de la pointe anodique, l'amplitude importante du champ électrique réduit permet de générer des électrons avec des énergies suffisantes pour ioniser le gaz. C'est une zone où se développent les avalanches électroniques ce qui permet rapidement l'accumulation d'une charge d'espace à l'origine de la propagation de la décharge. Naturellement dans cette zone proche de la pointe les processus d'ionisation prédominent sur les processus d'attachement

des électrons. En revanche, si on s'éloigne de la pointe, le champ électrique devient plus faible.

L'avantage de la décharge couronne est de pouvoir fonctionner avec tous les types d'alimentation électrique.



Figure I.8: Différentes configurations de décharge couronne.

La difficulté principale rencontrée avec ce type de décharge est la transition à l'arc électrique [38]. Cette transition est accompagnée par une forte augmentation de courant circulant dans la décharge et une hausse de la température de gaz et par conséquent le plasma généré est proche de l'équilibre thermodynamique et la puissance injectée dans le gaz est majoritairement dissipée par effet de Joule.

Dans la majorité des applications utilisant des décharges couronne, on cherche à éviter le passage à l'arc pour ne pas détériorer les électrodes et pour optimiser les processus de formation d'espèces actives en fonction de l'énergie injectée.

La Figure I.9, issue de la référence [39] montre les différentes phases des décharges couronne positive et négative en partant des premières avalanches primaires jusqu'au « spark » (étincelle ou claquage).

Il est important de souligner que les processus de surface jouent un rôle essentiel dans le développement et la propagation d'une décharge couronne négative alors que ce sont les processus ayant lieu dans le gaz qui sont pour l'essentiel à l'origine du développement et la propagation de la décharge positive qui fait l'objet du présent travail.

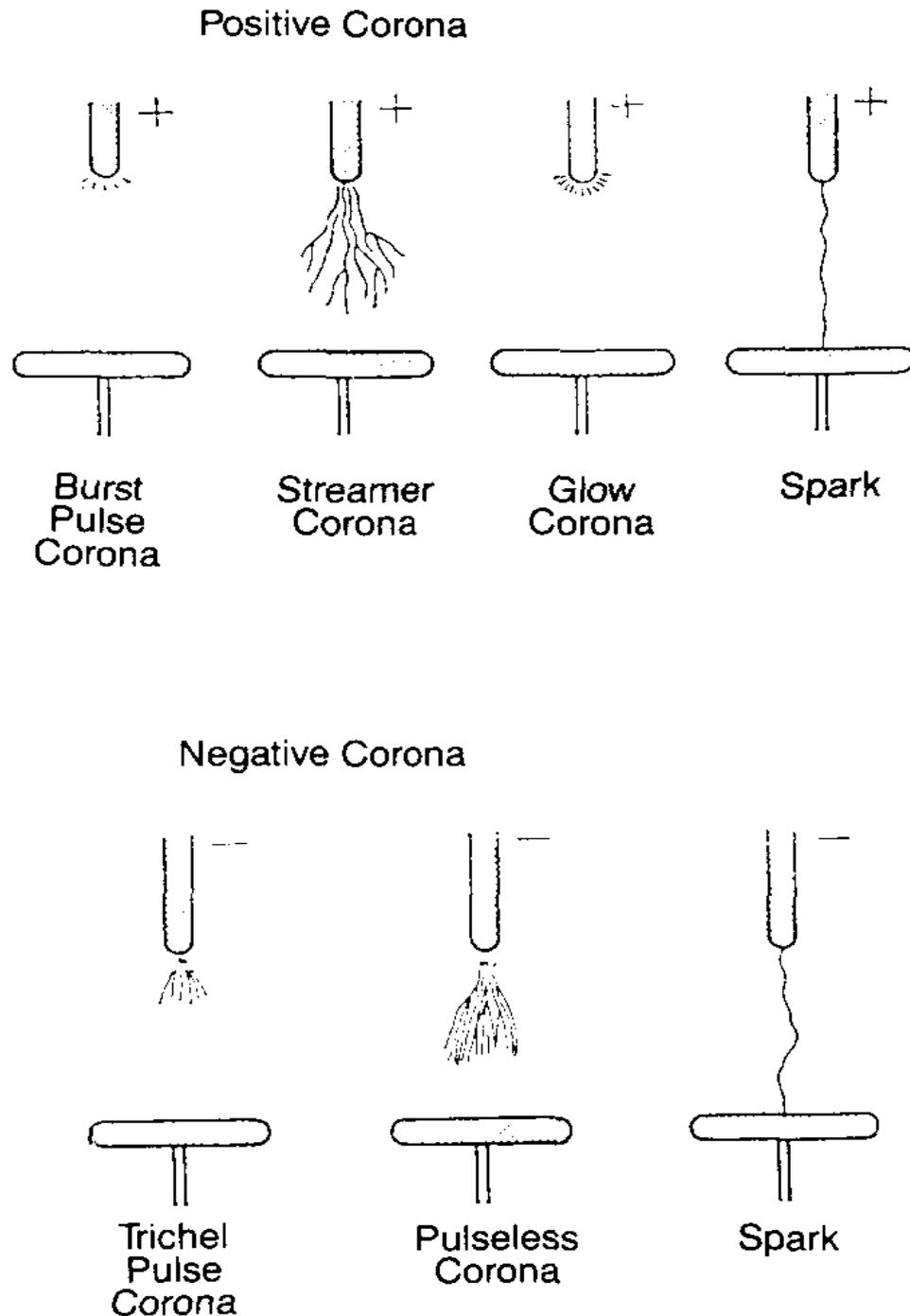


Figure I.9: Schéma de différents types de décharges [40].

## **I.8. MECANISME DE FORMATION DES DECHARGES COURONNE:**

### **I.8.1. Sources des électrons germes:**

La décharge électrique s'établissant dans un espace gazeux soumis à un potentiel, nécessite la présence de charges libres dans le milieu : électrons germes. Ces électrons libres présents dans le milieu gazeux, gagneront de l'énergie sous l'action du champ électrique

externe et en perdent sous l'effet des collisions élastiques et inélastiques avec les particules présentes dans le gaz.

Nous allons maintenant donner quelques indications sur les sources possibles d'électrons germes, nécessaires à l'amorçage de notre décharge.

#### **I.8.1.1. Rayonnement cosmiques ou radioactivité naturelle:**

Sous l'effet de l'irradiation par rayonnements cosmiques ou par les processus de radioactivité naturelle, 7 à 20 électrons par  $\text{cm}^3/\text{sec}$  sont produits dans l'air à la pression atmosphérique [41].

#### **I.8.1.2. Détachement d'électrons des ions négatifs:**

C'est le processus principal de production d'électrons à partir d'ions négatifs. Ces derniers peuvent préexister dans l'espace inter-électrodes, c'est le cas de la présence des impuretés telles que  $\text{O}_2$  et les pourvoyeurs principaux en électrons germes seront les ions négatifs  $\text{O}_2^-$  liés aux impuretés [42], [43].

#### **I.8.1.3. Contribution de la cathode:**

Dans le cas d'une configuration pointe positive-plan négatif, la cathode est généralement des cas, une source d'électrons germes peu efficace, parce qu'elle est d'une part soumise à un champ électrique faible et d'autre part située à une distance importante de la zone de décharge.

### **I.8.2. Le mécanisme de streamer:**

Cette partie décrit les différentes phases constituant un streamer positif dans le cas d'une décharge couronne à pression atmosphérique.

Dans une décharge couronne, la haute tension est appliquée au niveau de l'électrode de faible rayon de courbure et si la polarité de la haute tension est positive, le streamer se propage en direction de la cathode et on parle de streamer positif. Ce dernier est une onde d'ionisation se propageant de l'anode vers la cathode c'est-à-dire dans le sens inverse du mouvement des électrons soumis au champ laplacien.

#### **I.8.2.1. L'avalanche électronique:**

L'amorçage de la décharge commence par une série d'avalanches électroniques au voisinage de la pointe. La condition d'existence d'une décharge est la présence de particules chargées dans le gaz et l'application d'une tension suffisamment élevée entre les électrodes. Ces particules chargées ne sont que des électrons germes présents naturellement dans le gaz et qui vont être accélérés par le champ extérieur appliqué en direction de l'anode. Ils entrent en collision avec les molécules de gaz (pression atmosphérique, la densité est de  $2.4 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ), et perdent de l'énergie suite aux collisions inélastiques (excitation, dissociation et ionisation du gaz). Chaque collision ionisante permet la formation d'un nouvel électron qui est accéléré à son tour et vient impacter les molécules. La répétition de ce processus permet une croissance exponentielle du nombre d'électrons et d'ions positifs. C'est le phénomène de l'avalanche électronique (Figure I.10-a).

Les électrons ayant une masse beaucoup plus faible que les molécules du gaz, ils sont beaucoup plus mobiles que les ions créés dans les avalanches et en raison de cette différence de masse et sous un champ extérieur, les électrons vont dériver beaucoup plus vite que les ions. Les charges positives et négatives vont se séparer en créant un champ induit opposé au champ extérieur (Figure I.10-b). Pour qu'une avalanche électronique soit possible il faut que l'électron puisse acquérir grâce au champ appliqué, une énergie au moins égale à l'énergie d'ionisation du gaz sur la longueur de son libre parcours moyen (distance moyenne sur laquelle un électron ne rencontre pas de molécule).

Lorsque le nombre de paires électrons-ions formé au voisinage de l'anode atteint une taille critique (environ  $10^8$  valeur définie par des critères donnés dans la littérature comme le critère de Raether [4] ou de Meek [3]), le champ induit devient du même ordre de grandeur que le champ appliqué. Dans ces conditions, la zone de séparation de charge va pouvoir se propager vers l'anode (c'est-à-dire dans le sens inverse du sens naturel du déplacement des électrons dans le champ géométrique appliqué), créant ainsi une onde d'ionisation, appelée streamer.

#### **I.8.2.2. Propagation du streamer:**

La tête d'avalanche électronique et le nuage d'ions positifs forment une sorte de dipôle électrique. Les lignes de champ de ce dipôle renforcent localement le champ électrique appliqué au voisinage immédiat de la tête (Figure I.10-c) et devient supérieur au champ électrique externe. Ce champ élevé situé au niveau du front de la décharge permet de nouvelles avalanches électroniques. S'il existe des électrons germes dans cette région du front de la décharge, le streamer peut donc se propager par l'effet de son propre champ de charge d'espace. L'apport de nouveaux électrons germes dans cette zone de champ fort situé sur le front du streamer est dû aux processus de photo-ionisation.

En effet, pendant les avalanches électroniques primaires, les collisions inélastiques engendrent, des processus d'excitation des molécules neutres de leur état fondamental vers des états radiatifs. La désexcitation radiative de ces états vers des niveaux d'énergie inférieure conduit à l'émission de photons énergétiques. Cependant, la photo-ionisation du gaz requiert des photons dont l'énergie correspond au potentiel d'ionisation des molécules entrant dans la composition du milieu gazeux. Si les probabilités de transition sont suffisamment élevées, les électrons germes sont ainsi formés par photo-ionisation. Ces électrons sont ensuite accélérés par le champ de charge d'espace important situé sur le front de la décharge déclenchant ainsi de nouvelles avalanches électroniques. Chaque avalanche laisse dans son sillage une nouvelle population d'ions positifs, qui va renforcer la charge d'espace, et des espèces excitées radiatives susceptibles d'émettre des photons ionisants. Dans l'air sec, le mécanisme de photo-ionisation le plus probable est la photo-ionisation de l'oxygène moléculaire (potentiel d'ionisation : 12.06 eV) par des photons émis par certains états excités de  $N_2$  [44].

Dans le cas de gaz purs, par exemple dans l'azote seul, le mécanisme de photo-ionisation directe n'est pas envisageable pour expliquer la création de nouveaux électrons germes. Il faut alors considérer la présence d'impuretés dont le seuil d'ionisation est inférieur à celui de gaz majoritaire. En général, les gaz de laboratoire, même à un degré de pureté très élevé, contiennent toujours des traces résiduelles de  $O_2$  ou  $H_2O$ .

La Figure I.10, représente un schéma montrant le développement d'un streamer. La tête du streamer émet de la lumière qui aurait suffisamment d'énergie pour ioniser des molécules du gaz situées devant le streamer et produire les électrons nécessaires à la formation et à la propagation de la charge d'espace en direction de la cathode. Entre l'anode et la tête de streamer, un canal ionisé est formé dans le sillage du streamer au cours de la propagation. Ce canal composé d'un plasma réactif (électrons, ions, espèces radicalaires et espèces excitées) est quasi-neutre électriquement. Le champ électrique qui règne dans le canal (de l'ordre de  $4.5 \text{ kV.cm}^{-1}$  dans l'air à pression atmosphérique) est beaucoup plus faible que le champ de la charge d'espace sur le front du streamer.

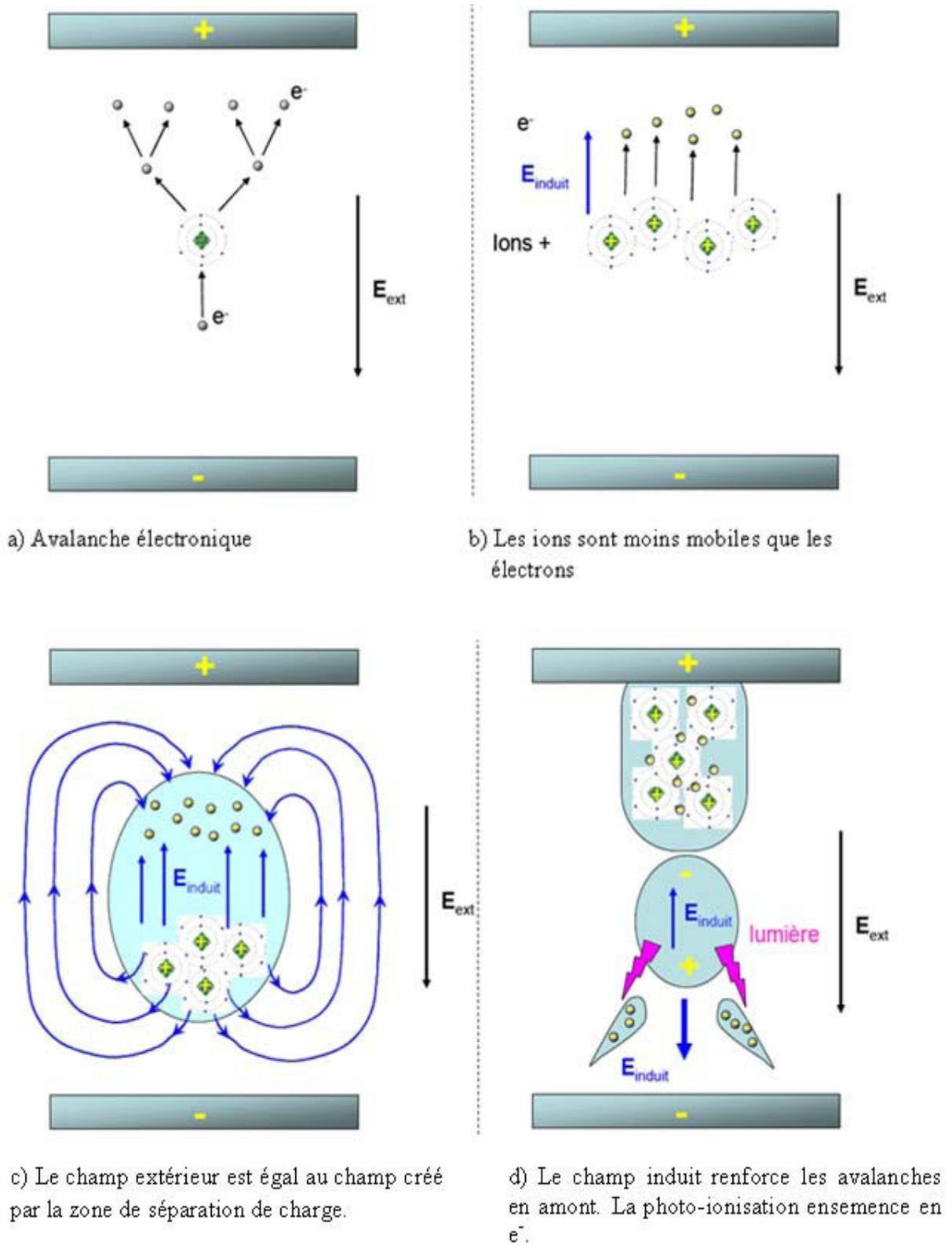


Figure I.10: Schématisation des étapes de formation d'un streamer [45]

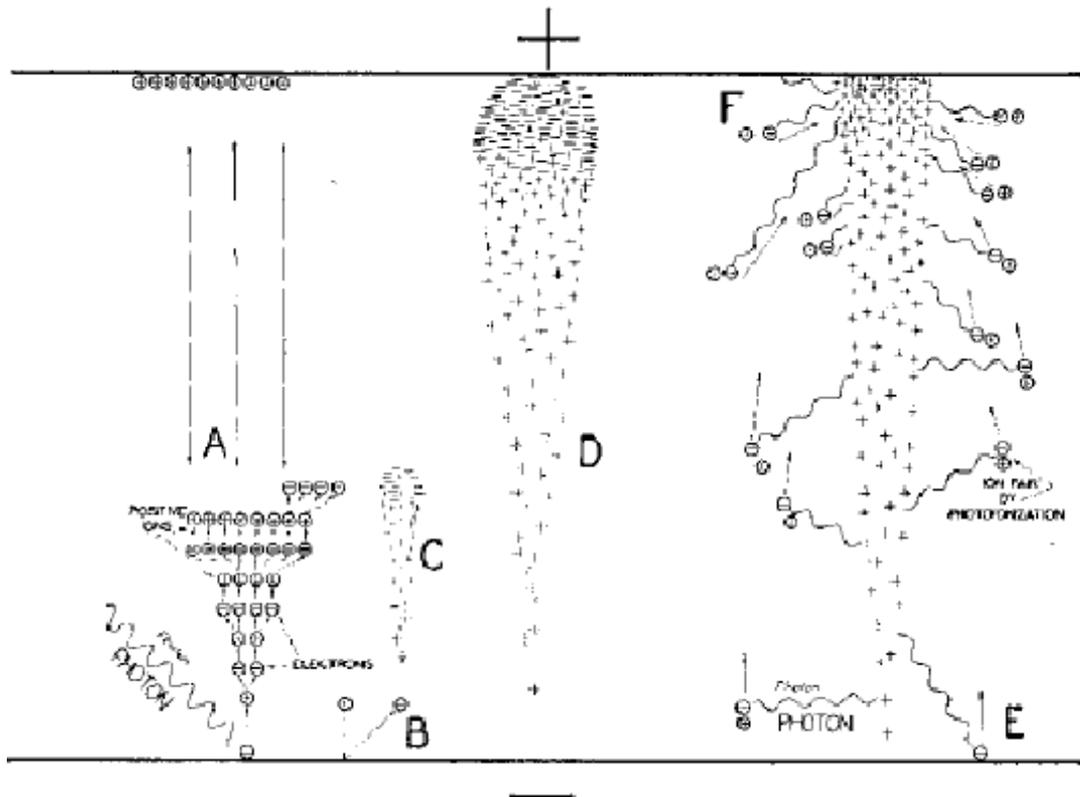
**I.8.2.3. L'arrivée à la cathode:**

Sur la Figure I.11, est représenté le schéma montrant le développement d'un streamer avec les processus ayant lieu devant le streamer et le canal ionisé, tandis que, la Figure I-12,

représenté schématiquement les différents mécanismes de formation et de propagation d'un streamer positif de la pointe vers le plan (phase a, b et c) jusqu'au passage à l'arc.

Lorsque le streamer arrive à proximité de la cathode (phase d), la différence de potentiel entre la charge d'espace et l'électrode est très élevée et la zone est soumise à un champ électrique très intense, qui induit une ionisation importante du milieu. La cathode est alors soumise à un bombardement des différentes espèces créées par avalanche électronique et l'émission secondaire d'électrons sera principalement due à l'effet photoélectrique et au bombardement ionique.

Les électrons extraits de la cathode sont multipliés dans la zone de fort champ et une onde d'ionisation remontant de la cathode vers l'anode le long du canal ionisé, rééquilibrant ainsi le potentiel entre les électrodes. Ces derniers se retrouvent ainsi en jonction par l'intermédiaire du canal ionisé de micro-décharge. Dans la phase (e) et (f), c'est un nouveau canal qui apparaît au niveau de l'anode et qui se propage en direction de la cathode à une vitesse plus lente que le streamer précédent (primary streamer). Cette nouvelle décharge, appelée secondary streamer, [46].



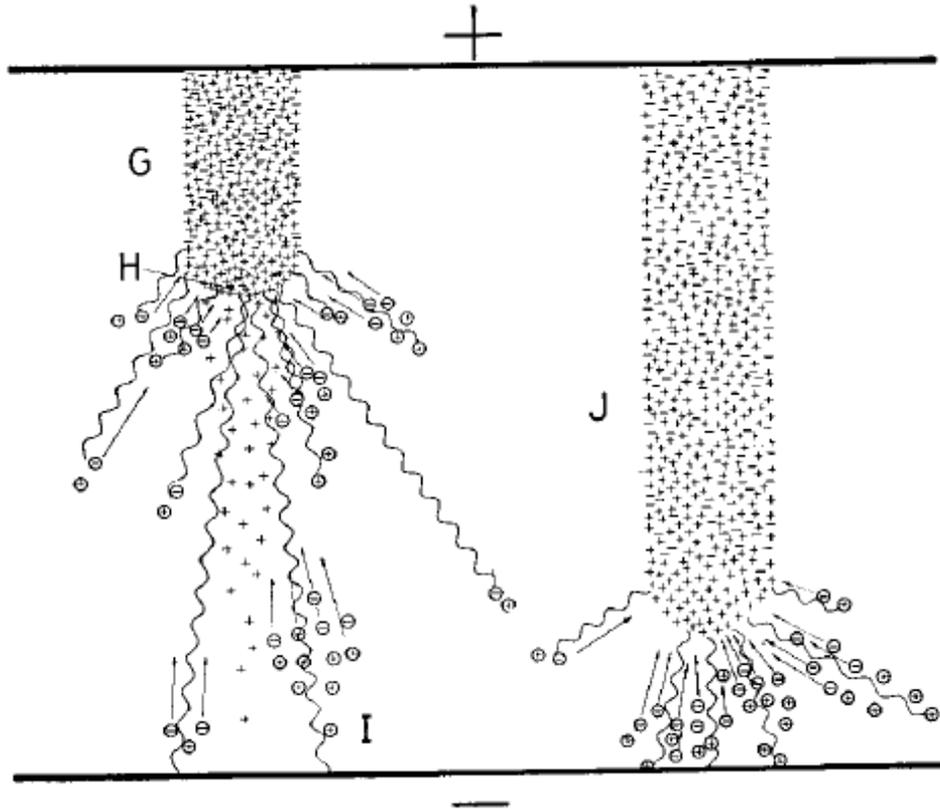


Figure I.11: Schéma montrant le développement d'un streamer avec les processus ayant lieu devant le streamer et le canal ionisé laissé dans son sillage [47].

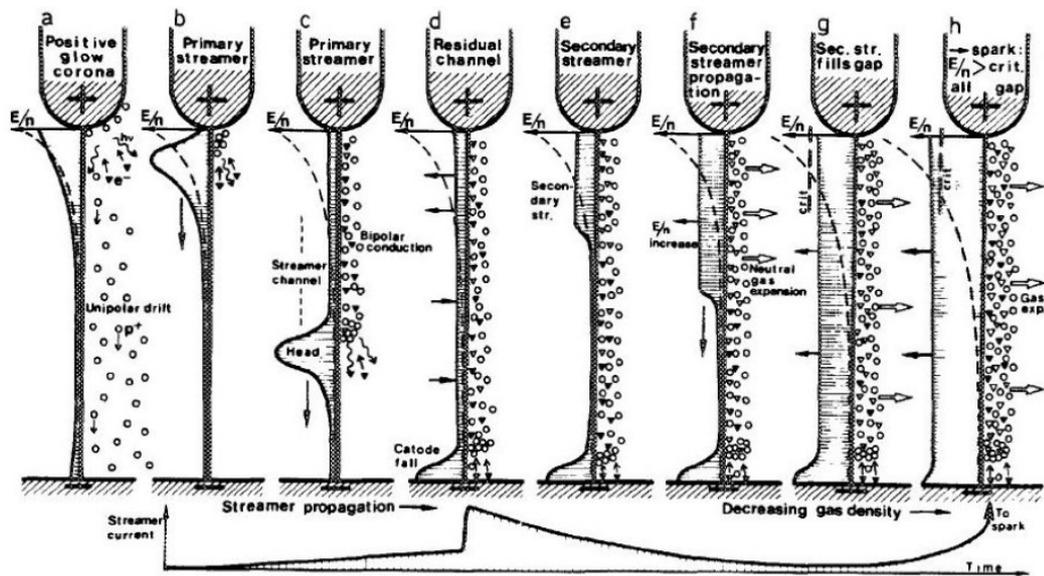


Figure I.12: Illustration des différentes phases de propagation d'un streamer positif [48].

#### **I.8.2.4. Passage à l'arc électrique :**

Le streamer laisse derrière lui un canal conducteur formant un pont entre les deux électrodes lorsqu'il atteint le plan. Le champ réduit  $E/N$  ( $E$  est le champ électrique (en  $V.cm^{-1}$ ) et  $N$  la densité du gaz (en  $cm^{-3}$ )) est faible dans le canal, l'attachement est dominant en comparaison de l'ionisation ce qui provoque une diminution du courant. Si on augmente la tension un peu plus, les électrons résiduels non combinés gagnent de l'énergie et peuvent ioniser les neutres dans le canal de micro-décharge et par conséquent, la densité en électrons et le courant augmentent (Figure I.13). Selon Marode et *al.* ([49], [50]), ce processus conduit à un échauffement progressif des espèces lourdes du gaz et une élévation de la pression ce qui provoque une diminution de la densité des neutres dans le canal ionisé et par conséquent le champ réduit  $E/N$  s'accroît (Figure I.12-g). Si la valeur de  $E/N$  dépasse le champ critique (champ pour lequel les coefficients d'ionisation  $\alpha$  et d'attachement électroniques  $\eta$  sont égaux), une nouvelle phase d'ionisation massive peut se produire, menant à la transition vers l'arc (Figure I.12-h).

Au-delà d'une densité électronique de  $10^{17} cm^{-3}$ , les interactions coulombiennes ne peuvent plus être négligées. Elles conduisent à un échauffement du gaz jusqu'à des températures pouvant atteindre  $10^4 K$ . A cette température l'équilibre thermodynamique local est atteint et le plasma reliant les deux électrodes est un plasma thermique.

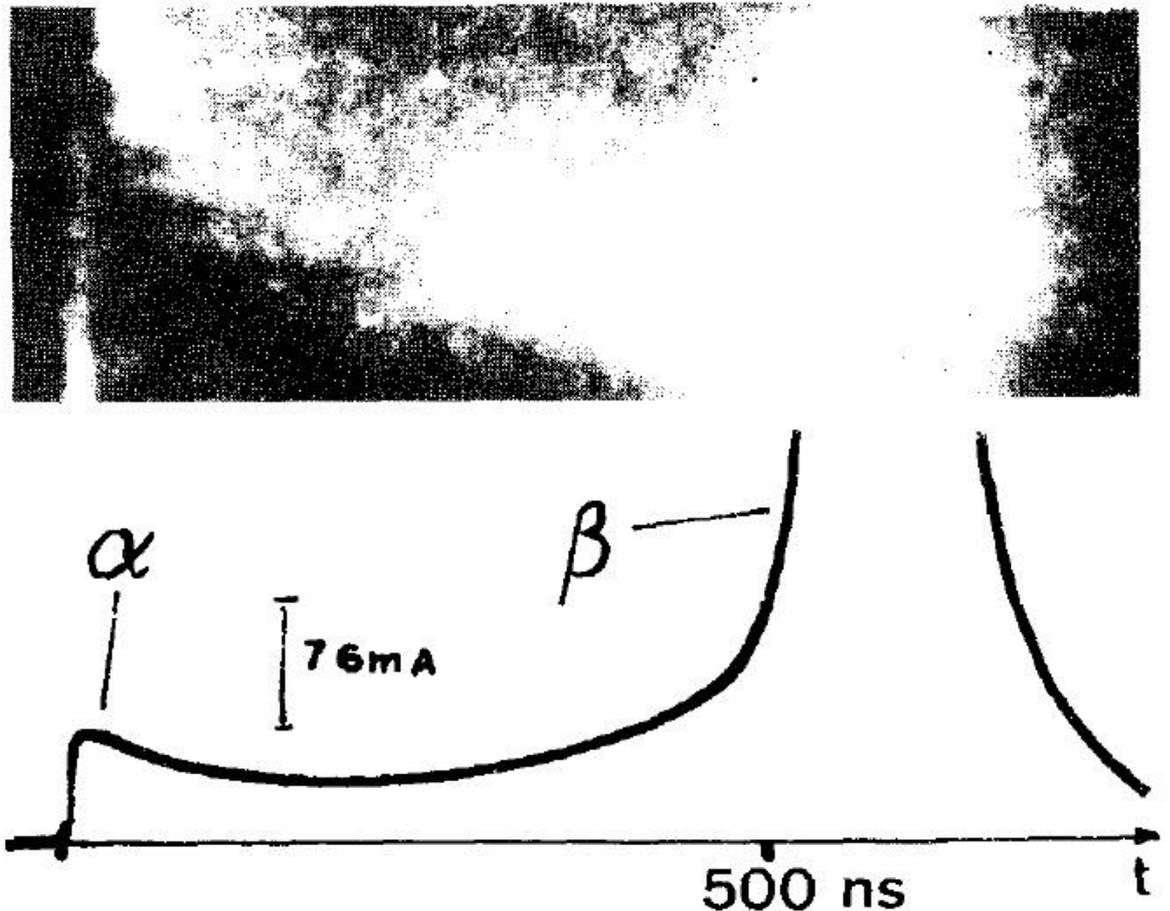


Figure I-13: Développement du primary streamer à l'arc [51], [52].

### I.9. CONCLUSION:

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique sur les plasmas a été effectuée. Nous avons d'abord évoqué les deux catégories classiques des plasmas selon leur degré de déséquilibre thermique et chimique. Ensuite, nous avons décrit plusieurs types de sources capables de générer un plasma thermique en insistant plus particulièrement pour les sources plasmas à la pression atmosphérique (cas des décharges couronne). Dans le chapitre suivant, nous présentons la modélisation mathématique