

CHAPITRE.I

Physique de la décharge

I.1.	Introduction :	3
I.2.	Décharge électrique dans les gaz :	3
I.2.1.	Définition du plasma :	3
I.2.2.	Paramètre physiques des plasmas :	4
I.2.3.	Classification des plasmas :	5
I.2.4.	Chocs Elastiques et Inélastiques :	5
I.2.5.	II.5 Vent Ionique :	6
I.3.	Décharge couronne :	7
I.3.1.	Définition :	7
I.3.2.	Différentes géométries d'électrodes :	7
I.4.	Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne	10
I.5.	Les régimes de la décharge couronne	11
I.6.	Conclusion :	16

I.1. Introduction

A leur état normal de température et de pression, les gaz sont des isolants parfaits. Cependant, si l'on applique un champ électrique suffisamment intense entre deux électrodes mises dans un milieu gazeux, celui-ci devient plus ou moins conducteur et un claquage électrique se produit. Les phénomènes complexes qui se produisent alors portent le nom de décharge électrique dans les gaz [2].

D'habitude une décharge électrique se crée essentiellement par les collisions des électrons avec les molécules du gaz. Il s'en suit la génération de nouveaux électrons et ions dans les avalanches de Townsend qui se développe jusqu'à l'établissement d'un état de maintenance. La décharge alors devient indépendante des sources extérieures qui produisent les charges électriques libres dans le gaz. L'efficacité des électrons comme producteurs de nouveaux ions, dépend de leur énergie et donc de leur libre parcours dans le champ électrique. Et comme les électrons dans une décharge ne sont pas mono-énergétiques on doit déduire leur fonction de distribution des énergies pour une étude quantitative. Finalement, l'application d'un champ électrique est nécessaire pour remplacer les électrons perdus par recombinaison, diffusion et, parfois, attachement [2].

I.2. Décharge électrique dans les gaz

I.2.1. Définition du plasma

Les plasmas sont désignés comme étant le quatrième état de la matière faisant suite dans l'échelle des températures aux trois états classiques : solide, liquide et gaz. Le terme de «plasma» (du grec « matière informe ») a été introduit la première fois en 1923 par les physiciens américains I. Langmuir et L. Tonks pour désigner, dans les tubes à décharge, certaines régions équipotentielles contenant un gaz ionisé électriquement neutre[5].

Ainsi, un plasma est défini comme étant analogue à un gaz mais constitué de particules chargées, d'ions et d'électrons telle que cet ensemble soit globalement électriquement neutre. De façon plus générale, la physique des plasmas joue un rôle très important en astrophysique puisque l'on estime que près de 99 % de l'univers est constitué par de la matière à l'état plasma[5].

Par la suite, les plasmas ont toujours suscité un vif intérêt en vue d'applications aussi bien dans l'industrie (torche à plasma) que dans la vie quotidienne (téléviseurs à écran plasma). Néanmoins, cette discipline se heurte à une étude théorique assez complexe [5]. C'est pourquoi, nous nous limiterons par la suite à donner et décrire quelques éléments

fondamentaux qui nous permettrons de bien situer le cadre général des décharges électriques étudiées durant ce travail.

I.2.2. Paramètre 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 : la densité électronique n'est que le nombre d'électrons libres par unités de volume (cm^{-3}).
- Taux d'ionisation : le taux d'ionisations τ_i représente le rapport du nombre d'électrons libre ne sur le nombre de particules totales $n_e + N$, où N est le nombre de particules neutres par unité de volume. Le taux d'ionisation est alors donné par:

$$\tau_i = \frac{n_e}{n_e + N} \quad (\text{I.1})$$

On utilise également le rapport n_e/N qui traduit l'importance des collisions entre particules chargées par rapport aux collisions entre particules chargées et neutres.

- Température électronique : T_e est la température électronique qui correspond à la température absolue en Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) des électrons. On utilise aussi parfois l'énergie électronique kT_e (en électron-volt ev) avec k la constante de Boltzman, sachant que $1 kT_e \approx 1,4 \times 10^4 \text{ K}$.
- Libre parcours moyen : le libre parcours moyen λ correspond à la distance moyenne parcourue par une particule chargée entre deux collisions. Il dépend de la vitesse des particules, ainsi que de la probabilité de collision.
- Longueur de Debye : la longueur de Debye définit la longueur à partir de laquelle le champ électrique Coulombien issue d'une particule chargée est neutralisé par un ensemble de particules de signe opposées dans le volume environnant. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\lambda_D = \left(\frac{2\varepsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^{1/2} \quad (\text{I.2})$$

avec ε_0 la permittivité du vide ($8,84 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) et e la charge élémentaire d'un électron ($1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$)[5].

I.2.3. Classification des plasmas

A partir des paramètres ci-dessus, il est possible alors de distinguer et classer les différents plasmas. Cette classification permet alors de ressortir deux grandes catégories de plasmas : les plasmas « froids » et les plasmas « chauds ».

Les plasmas chauds (ou thermiques) présentent une température électronique qui est proche de celle du gaz, de 5000 à 50 000°K. Ces plasmas sont dits à l'équilibre thermodynamique. Les énergies mises en jeu sont importantes. Les arcs et les torches à plasmas (utilisées en industrie pour la découpe et la soudure) sont des exemples de ce type de plasma.

A l'inverse, les plasmas froids sont caractérisés par leur état hors équilibre thermodynamique. La température du gaz est dans ce cas proche de la température ambiante alors que celle des électrons (jusqu'à 10^4 °K) 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 [5].

I.2.4. Chocs Elastiques et Inélastiques

Soumises à un champ électrique et donc à la force de Coulomb, les particules chargées vont entrer en collision avec les espèces chimiques environnantes. On distingue alors les collisions élastiques des collisions inélastiques. Dans les chocs élastiques, les atomes conservent la même structure interne, seule leur vitesse est accrue. Globalement, l'énergie cinétique du système reste inchangée [5].

Par contre, dans les chocs inélastiques, l'énergie interne des particules change. L'énergie de la particule incidente, dans ce cas, est suffisante pour que la particule heurtée passe à un niveau excité plus haut ou soit ionisée. Les chocs inélastiques sont donc la source d'un nombre important de réaction physico-chimiques qui vont alors modifier les propriétés macroscopiques du gaz[5].

On distingue alors les phénomènes ionisants :

- Excitation : lorsqu'un atome a acquis suffisamment d'énergie pour qu'un des électrons passe à un niveau (orbital) d'énergie plus élevé. L'atome passe alors de son état fondamental à un état excité.
- Ionisation : dans ce cas, l'énergie absorbée par l'atome lors de la collision est suffisante pour qu'un de ses électrons soit arraché de l'attraction du noyau. L'électron est alors soit attaché à un autre atome (attachement), soit il s'éloigne à l'infini.

Puis les phénomènes déionisants :

- Recombinaison : la recombinaison est le phénomène d'attachement de particules lorsqu'un ion positif rencontre un électron ou lorsque deux ions de signes contraires se rencontrent.
- Détachement : c'est le phénomène qui se produit lorsqu'un ion perd son électron supplémentaire [5].

I.2.5. Vent Ionique

Considérons ainsi une électrode portée à un fort potentiel électrique et plongée dans l'air à la pression atmosphérique. Cette configuration est schématisée sur la (Figure 1.5). Un électron présent initialement dans l'atmosphère, du fait par exemple du rayonnement cosmique, est accéléré par le champ électrique créé et gagne ainsi de l'énergie. Dans son mouvement en direction de l'anode, cet électron entre en collision avec un neutre. Si le champ électrique est suffisant, l'électron aura atteint un niveau d'énergie capable d'ioniser la molécule neutre. On dispose alors d'un nouvel électron et d'un ion positif. Les deux électrons sont à nouveau accélérés et capables d'arracher des électrons aux neutres percutés. Les électrons formés lors d'une telle avalanche électronique sont absorbés à l'anode tandis que les ions positifs dérivent en direction opposée. Dans l'espace lointain, il ne subsiste ainsi qu'un courant d'ions positifs. En dérivant, les ions entrent en collision avec les molécules neutres de l'air. Une grande fraction de ces collisions est purement élastique : les ions cèdent une partie de leur quantité de mouvement aux neutres. La mise en mouvement des neutres est ce que l'on appelle vent ionique[6].

Considérons maintenant une électrode portée à un fort potentiel négatif. Une avalanche électronique se produit, créatrice d'un nombre élevé d'ions positifs et d'électrons. Les ions positifs sont absorbés à la cathode tandis que les électrons s'en éloignent rapidement. Ayant atteint une zone de champ électrique plus faible, ces électrons s'attachent rapidement aux molécules d'oxygène de l'air pour former des ions négatifs. Ces ions dérivent alors en s'écartant de leur zone de production. Ce mouvement se traduit par la création d'un vent ionique [6].

I.3.Décharge couronne

I.3.1. Définition

A pression atmosphérique, une décharge plasma générée par un champ électrique homogène atteint facilement l'équilibre. Pour stabiliser une décharge hors équilibre il faut créer un champ électrique fortement inhomogène en utilisant des électrodes de géométrie très différente (les géométries les plus fréquemment utilisées sont des géométries pointe plan ou fil-cylindre). Les plasmas créés de cette façon sont appelés décharges couronne.

Les deux régimes de décharge couronne sont les régimes luminescent (glow) et filamentaire. Ce dernier est caractérisé par la présence de dards, c'est à dire d'impulsions de courant issues de l'extrémité de l'électrode à fort rayon de courbure qui se propagent dans l'espace inter-électrode jusqu'à atteindre l'électrode à faible rayon de courbure. On appelle ces impulsions de courant streamer et impulsion de Trichel [7].

Les décharges couronnes ont la propriété de permettre une grande distribution en énergie des espèces excitées (électrons, neutres et ions), ce qui génère une forte activité réactionnelle au sein du réacteur [7].

I.3.2. Différentes géométries d'électrodes

La décharge couronne apparaît entre deux électrodes asymétriques. Ce type de décharge se caractérise par un champ fortement inhomogène et intense au voisinage de l'électrode de petite dimension. Les configurations courantes de réacteur plasma à décharge couronne, qui varient en fonction des applications, correspondent aux géométries d'électrodes suivantes (Figure I.1):

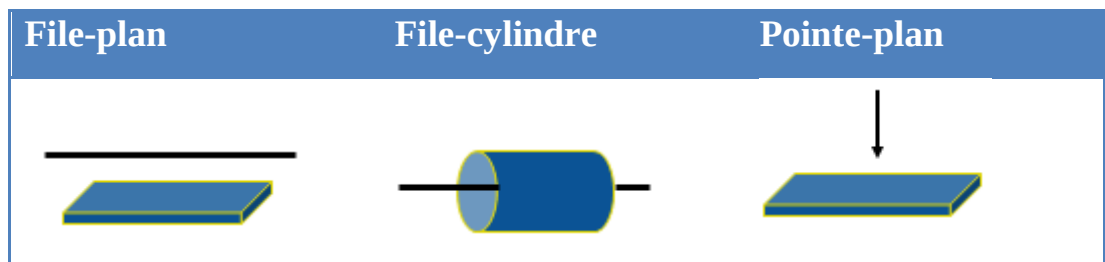


Figure I.1: Trois exemples de configurations de réacteurs couronne couramment utilisés

En ce qui concerne la polarité, la décharge couronne est dite positive, si la haute tension (positive) est appliquée sur l'électrode présentant le plus petit rayon de courbure et elle est dite négative dans le cas inverse. Durant notre travail, on s'intéresse à l'étude d'une décharge couronne négative dans une configuration pointe-plan. Deux types de tensions peuvent être appliqués à ce type de décharge ; tension continue (DC) ou impulsionnelle. Cependant, on peut noter que quel que soit le régime de tension appliquée (continue ou impulsionnelle) le courant de la décharge couronne peut être impulsionnel [8].

Selon la polarité du potentiel appliqué à la pointe on distingue la décharge couronne positive de la décharge couronne négative. C'est ce que nous allons voir dans ce qui suit :

A. Pointe – plan positive

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand la pointe est portée à un potentiel positif et la plaque à la terre. Dans ce cas, dans la zone de champ intense autour de la pointe, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers l'anode (la pointe). Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation : zone en pointillé à la (Figure I.2). Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance de la pointe (inférieure au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible ($<30 \text{ kV/cm}$ dans l'air à pression atmosphérique) ne permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers la cathode (la plaque). Cette zone unipolaire, puisqu'il n'y a que des ions positifs, est appelée région de « dérive » (Figure I.2) [5].

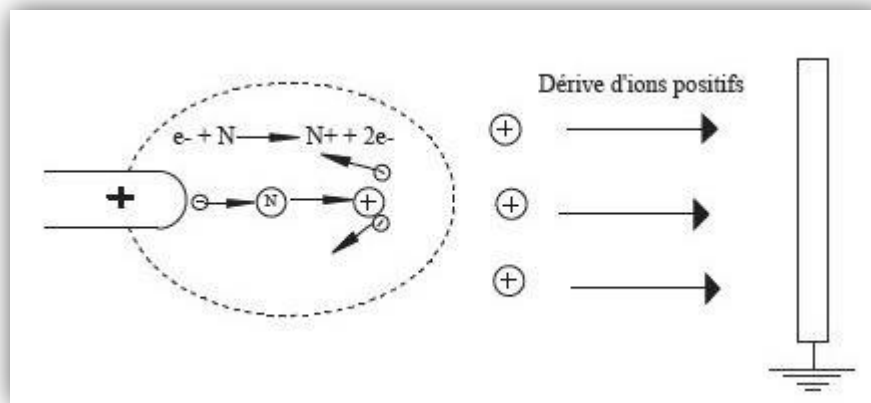


Figure I.2: Descriptif de la décharge couronne positive.

Pour cette décharge, il y a avancement de streamers, qui se propage en quelque sorte comme une extension de l'anode. La décharge est composée d'une phase de propagation du streamer (durée de la propagation de 50 ns à la vitesse de $2 \times 10^5 \text{ m/s}$) et d'une phase de restauration pendant laquelle les ions dérivent. Ces deux phases forment un cycle de fréquence 10 kHz. Le courant de décharge n'est donc pas continu, mais correspond à une succession de phénomènes transitoires. Goldman et al. (1985) indique qu'un courant positif de $50 \mu\text{A}$ se décomposerait en un courant unipolaire continu de $20 \mu\text{A}$, distribué uniformément à la surface de la cathode, et de streamers contribuant à $30 \mu\text{A}$ percutant la cathode à une fréquence de 10 kHz [5].

B. Pointe – plan négative

Dans le cas où la pointe est portée à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de la pointe. Goldman et Sigmond (1982) expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode (Figure I.3). Seuls les ions négatifs créés par attachement dans une zone où le champ est plus

faible peuvent migrer vers la plaque. De plus, lorsque la haute tension dépasse un seuil, il y a passage à l'arc [5].

Le courant de cette décharge est dû à des impulsions de Trichel à une fréquence qui dépend de la tension appliquée. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques. Une fois ces ions migrés vers l'anode, de nouvelles avalanches apparaissent. L'intervalle entre deux pics de courant, impulsions de Trichel, dépend donc du temps nécessaire aux ions négatifs à atteindre l'anode [5].

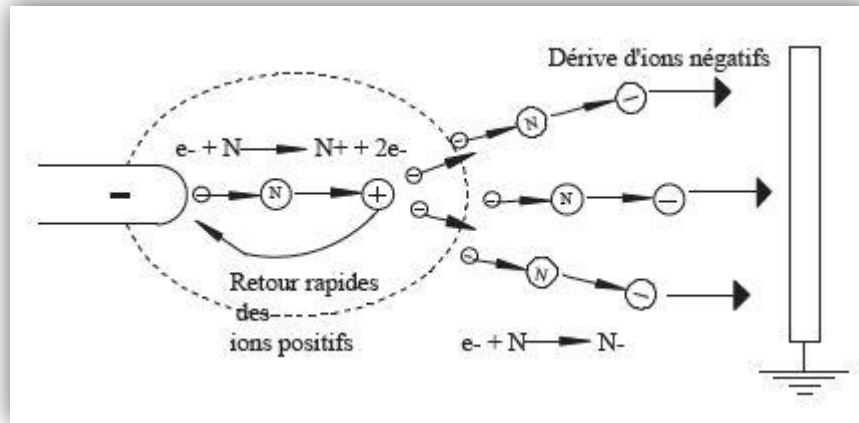


Figure I.3 : Descriptif de la décharge couronne négative.

Les mécanismes physico-chimiques au sein des décharges couronnes sont assez complexes et sont encore amplement étudiés par les physiciens des plasmas, car ils ne sont pas encore totalement connus.

C. Décharge en régime alternatif

A la place d'un potentiel continu appliqué à la pointe, on peut également y appliquer un signal sinusoïdal à valeur moyenne nulle. Dans ce cas, les processus de la décharge soumise à une excitation alternative sont identiques à ceux décrits pour une excitation continue, dans la mesure où l'intervalle de temps entre les inversions de polarité est suffisamment long pour que toutes les charges résiduelles de l'alternance précédente soient écoulées. Ceci implique l'existence d'une fréquence f et d'une distance inter-électrodes D limites reliées par l'expression suivante (Parissi, 1999):

$$D_{max} = \frac{\mu E_0}{\pi f} \quad \Leftrightarrow \quad f_{max} = \frac{\mu E_0}{\pi d} \quad (I.3)$$

Avec μ la mobilité des ions et E_0 l'amplitude du champ électrique. Si l'excitation est supérieure à cette fréquence f_{max} , la charge d'espace va osciller et augmenter à chaque période

entre les électrodes. Cet effet cumulatif aura pour conséquence des passages à l'arc pour des potentiels plus faible qu'en continu [5].

I.4.Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne

La figure 1-4 présente la caractéristique courant–tension dans un gaz basse pression, depuis le régime des décharges non autonomes jusqu'à l'arc électrique. La courbe est obtenue avec une tension continue et elle représente 4 différents régimes de courant correspondants aux 4 zones suivantes:

- ✓ *Zone A* : Dans cette zone, le courant et la tension sont très faibles (moins de 10^{-11} A, 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 B* : 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 C* : 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 luminescente dont le courant varie de 10^{-4} A à 10^{-1} A.
- ✓ *Zone D* : 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 [9].

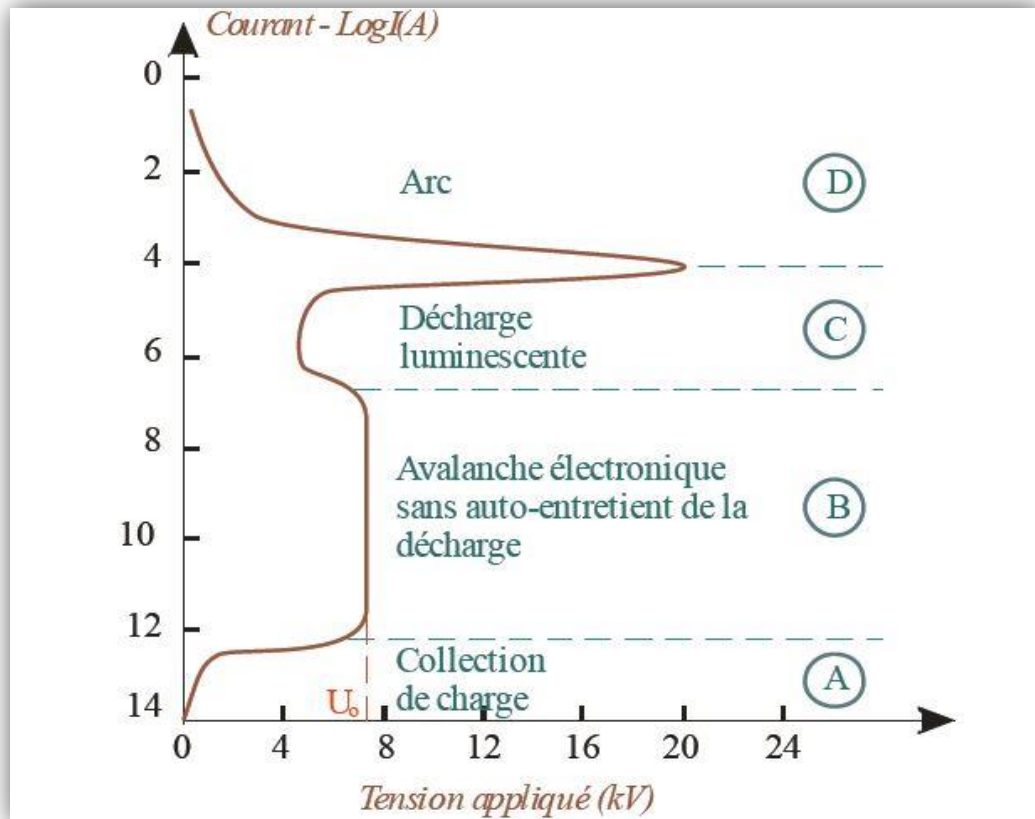


Figure I.4 : Caractéristique courant-tension d'un gaz basse pression.

I.5. Les régimes de la décharge couronne

Le schéma électrique de la figure 1-5 représente un dispositif expérimental permettant de générer ce type de décharge. E est la source de tension DC, R_{ch} une résistance de charge permettant de limiter le courant et U_0 la tension aux bornes des électrodes. La figure 1-6 représente la caractéristique courant-tension associée à ce dispositif. Elle est obtenue en augmentant progressivement la tension E [10]. La courbe noire de la figure 1-6 montre la caractéristique courant-tension dans l'air synthétique (80 % d'azote et 20 % d'oxygène) à pression atmosphérique et à température ambiante. Le rayon de courbure de la pointe utilisée dans l'expérience est égal à $20\mu\text{m}$ et les deux électrodes sont espacées de 7mm [11].

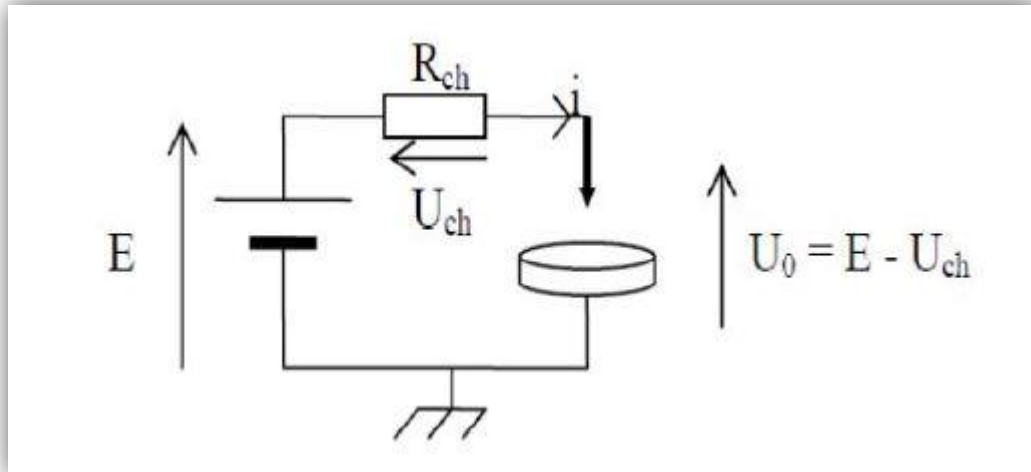


Figure I.5 : Schéma électrique permettant de tracer une caractéristique courant-tension d'une décharge couronne pointe plan.

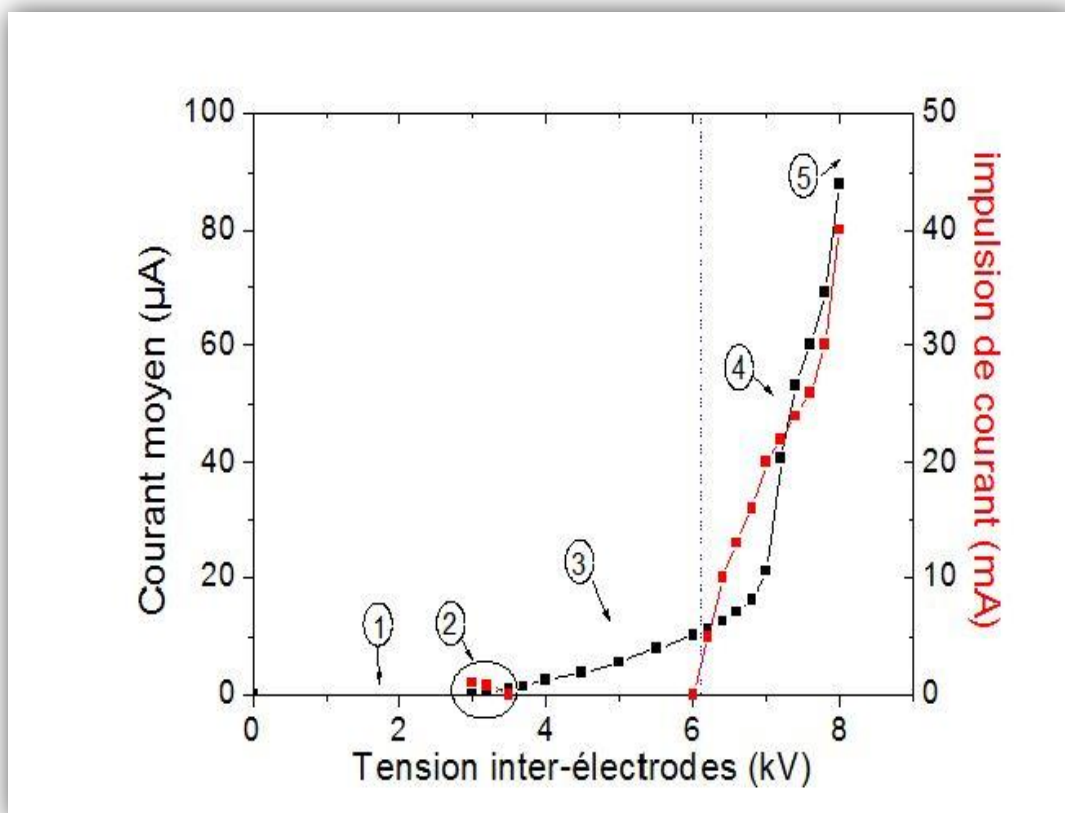


Figure I.6: Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne « pointe – plan » dans l'air à pression atmosphérique [10].

A. Régime onset streamer

Le régime « onset streamer » correspond à la zone 2 de la courbe sur la (figure I.6) Cette phase est caractérisée par un faible courant moyen et de faibles impulsions de courant qui

apparaissent de manière irrégulière avec une fréquence moyenne de quelques milliers de Hertz. L'amplitude de ces impulsions est illustrée par la courbe rouge. Ces impulsions de courant (encore appelée « burst pulses ») proviennent du développement et de la propagation de décharges filamenteuses qui restent localisées au voisinage de la pointe. Dans les conditions de travail utilisées [10], ces impulsions présentent des amplitudes de l'ordre de quelques mA. Un halo lumineux peut être observé autour de la pointe à l'aide d'une caméra ICCD en intégrant sur une durée d'une seconde (voir figure I.7)[8] .

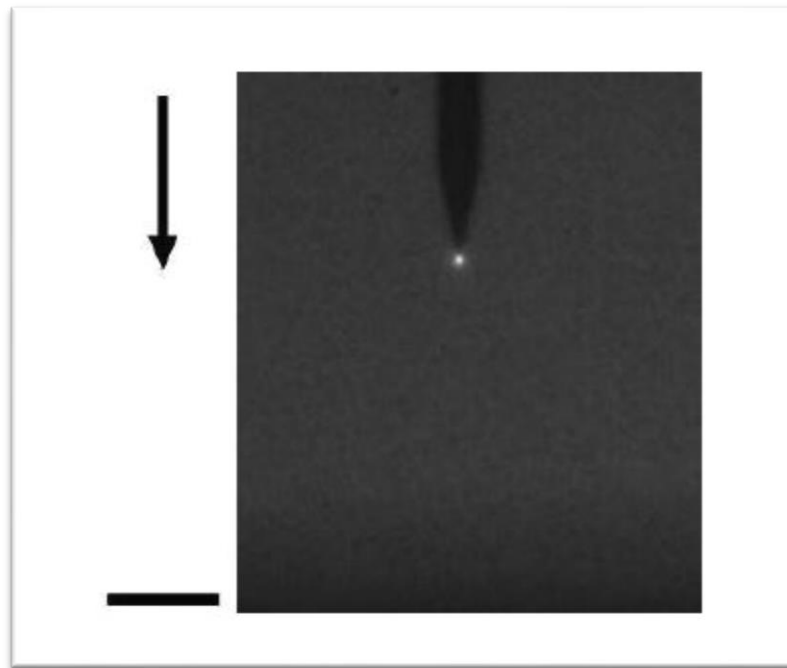


Figure I.7 : Photographie de la décharge couronne en régime « onset streamer » à l'aide de la caméra ICCD pour un temps d'intégration de 1s [10]

B. Régime « Glow »

La zone 3 de la (figure I-6) correspond au régime « glow » ou luminescent. Les impulsions de courant disparaissent et la décharge est visible à l'œil nu, car, à proximité de la pointe, les décharges filamenteuses laissent place à une zone active d'ionisation et d'excitation sous un fort champ électrique. Elle occupe un faible volume autour de la pointe. Avec une caméra ICCD, on observe le même halo lumineux autour de la pointe (voir la figure I.7) mais avec un temps d'ouverture de 1 μ s. En régime de décharge couronne luminescente, l'espace inter électrodes peut être divisé en trois domaines (figure I.8). Le premier correspond à une zone active d'ionisation et d'excitation située au voisinage de la pointe là où le champ géométrique est le plus intense. Dans cette zone, les phénomènes d'ionisation prédominent et des avalanches électroniques de type Townsend se développent. Après cette zone d'ionisation,

il se trouve une région de transition où le mécanisme d'ionisation est compensé par les phénomènes de pertes d'électrons par attachement et recombinaison. Enfin, le dernier domaine est caractérisé par un champ trop faible pour permettre l'ionisation du milieu. Les ions positifs formés dans la partie active de la décharge y dérivent vers le plan. Cette zone, passive d'un point de vue électrique occupe la quasi-intégralité de l'espace inter-électrode et est le siège d'une forte activité physicochimique et d'un transfert de quantité de mouvement des ions vers les neutres [8].

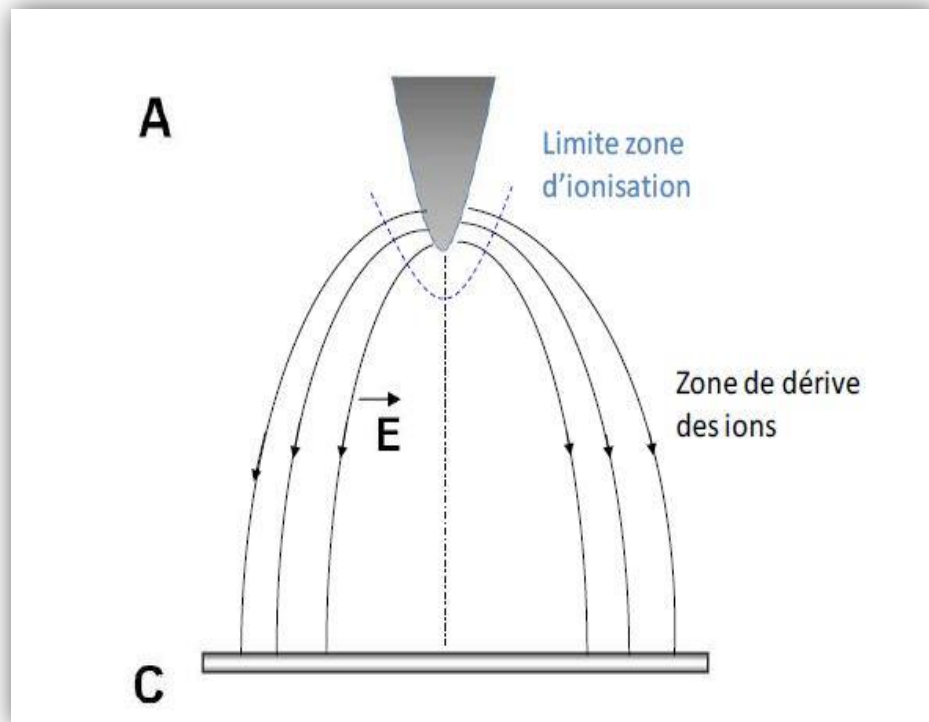


Figure I.8: Topographie de la décharge couronne « pointe – plan » en régime glow.

C. Régime « Breakdown streamer »

Dans la zone 4 de la figure 1-6 apparaît le régime « breakdown streamer ». Pour ce régime, la caractéristique courant-tension montre une augmentation rapide du courant en fonction de la tension inter-électrode. Cette montée de courant est due au fait que des impulsions de courant apparaissent et se superposent au régime « glow ». Sur la courbe rouge (figure I.6), on constate que l'amplitude des impulsions de courant augmente continuellement avec la tension inter-électrode. L'amplitude de ces impulsions est beaucoup plus importante (plusieurs dizaines de mA) que celle des impulsions présentes dans le régime « onset streamer ». Leur fréquence de répétition est relativement stable (une dizaine de kHz) et leur durée de vie est de l'ordre de cent

nanosecondes. En effet, ces impulsions de courant sont le résultat de la propagation d'une onde d'ionisation à travers l'espace inter-électrode. La figure 1-9 est une photographie (à l'aide d'une caméra ICCD) de la trace lumineuse laissée par la décharge lors d'une impulsion de courant. La trace est plus lumineuse à proximité de la pointe et sa luminosité s'affaiblit en allant vers le plan. La figure 1-7 présente une photo prise par une caméra à balayage rapide (streak camera), montrant l'évolution spatio-temporelle du streamer où apparaissent les phases de propagation du primary (primaire) streamer et du secondary (secondaire) streamer. Contrairement au régime « glow », la morphologie de la décharge en régime «breakdown streamer » est celle d'un « filament ionisé» s'étirant entre la pointe (anode) et le plan (cathode) [8].

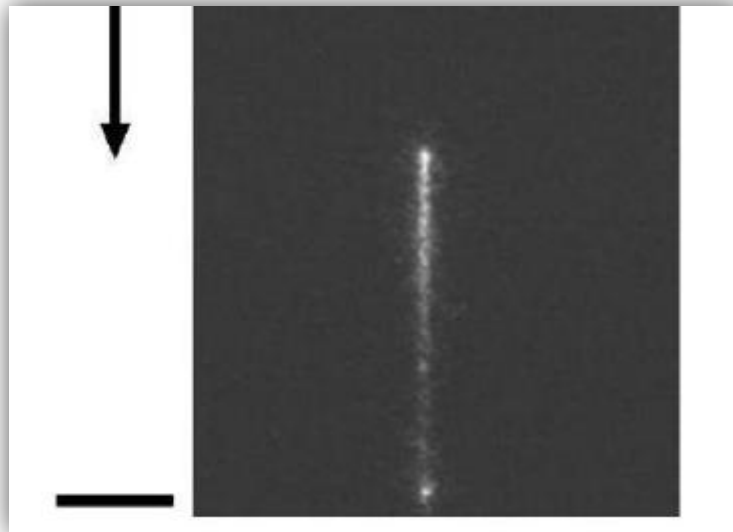


Figure I.9 : Photographie de la décharge couronne en régime « breakdown streamer » à l'aide de la caméra ICCD pour un temps d'intégration de $10\mu\text{s}$ [10].

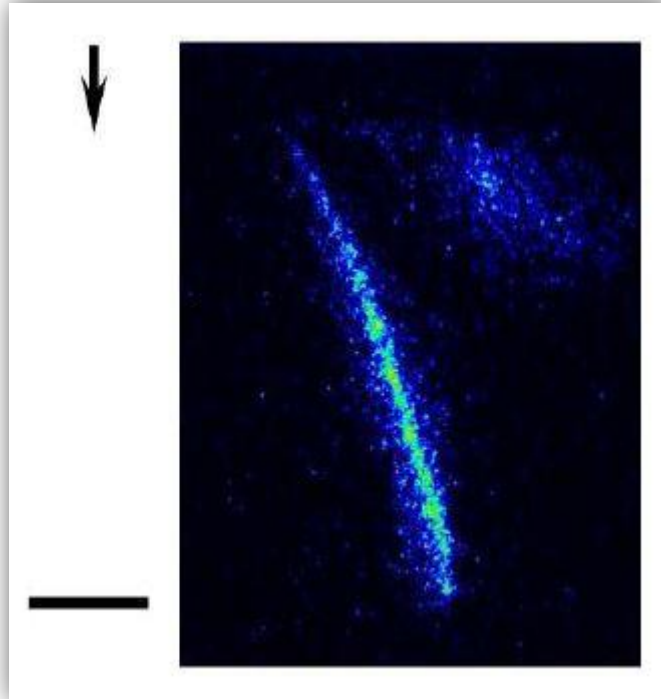


Figure I.10: Photographie de la décharge en régime « breakdown streamer » à l'aide d'une caméra à balayage rapide pour un temps de balayage de 100ns [10].

I.6. Conclusion

A la fin de ce chapitre on peut dire, malgré que l'air est l'un des meilleurs isolants mais sous certain conditions il perdra sa grande résistivité et il devient conducteur, c'est ce qu'on appelle le claquage. Le claquage est due à l'ionisation des atomes d'air contenant dans un intervalle soumis sous une tension élevée. La collision entre électrons donne naissance à une avalanche électrique qui cause le claquage de l'intervalle.