



N° d'ordre :

N° de série :

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITAIRE D'EL-OUED  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE  
Département D'électrotechnique

Mémoire de fin d'études présenté  
Pour l'obtention du diplôme de

# LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et techniques**  
Filière : **Electrotechnique**  
Spécialité : **Réseaux Electriques**

## Claquage des diélectriques gazeux

**Proposé et dirigé par :**

Mr. KHECHEKHOUCHE Ali

**Présenté par :**

CHENGUEL Mehrez

GHILANI Hicham

**ANNEE UNIVERSITAIRE : 2013/2014**

# Dédicace

A ma mère, symbole de la bonté par excellence, la source de  
tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager  
et de prier pour moi

Et en souvenir de mon père, avec amour et gratitude.

A tous mes frères et mes sœurs **Aouatif** et **Zahira**.

A mon cher " Hicham "

A l'enseignant monsieur " KHECHKOUCHE Ali "

A tous mes amis

A tous mes collègues de la promotion RESEUA ELECTRIQUE 2013/2014.

A tous ceux qui m'aiment

Je dédie ce modeste travail

Avec tout mon amour et ma tendresse

Mehrez

# Dédicace

Je dédie ce travail à :

A mes très chers parents et bien aimée mère symbole d'amour et patience  
pour ses sacrifices inestimables.

A mes frères et mes sœurs pour leur soutien morale et leur encouragement.

A ma grande famille Ghilani.

A mon cher " Mehrez "

A l'enseignant monsieur " KHECHEKHOUCHE Ali "

A tous mes amis

A tous mes collègues de la promotion RESEAU ELECTRIQUE 2013/2014.

A tous ceux qui m'aiment

Je dédie ce modeste travail

Avec tout mon amour et ma tendresse

Hicham

# Remerciements

Nous remercions Allah le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience pour l'accomplissement de ce travail.

Nous remercions les chers parents qui nous ont donné la volonté pour la réussite de ce travail.

Nous exprimons toutes nos gratitude à Mr "KHECHEKHOUCHE Ali", pour l'effort fourni, les conseils prodigués, sa patience et sa persévérance dans le suivi. Cela a été un plaisir et un honneur de travailler avec quelqu'un d'aussi compétent et d'aussi cultivé.

Nous adressons également nos remerciements, à tous nos enseignants, pour leurs aides inestimables, qui nous ont donné les bases de la science.

Nous remercions très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission d'examineur.

Nous tenons à remercier aussi l'ensemble du personnel de faculté des sciences et technologies et surtout le département électrotechnique.

A toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce modeste travail particulièrement: **Zahira**.

# Table des matières

Table des matières.....	i
Liste des figure.....	ii
Liste des tableaux.....	iii
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I. Phénomène d'ionisation dans les diélectriques gazeux.....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction.....	3
I.2 Constitution de l'atome.....	3
I.3 Mouvement des particules dans le gaz.....	4
I.4 Processus d'ionisation et d'excitation .....	4
I.4.1 Ionisation par collision.....	5
I.4.2 Photo-ionisation.....	5
I.4.3 Ionisation thermique .....	6
I.4.4 Ionisation par les atomes métastables .....	6
I.5 Avalanche électronique.....	6
I.5.1 Electron primaire .....	6
I.5.2 Description de l'avalanche .....	7
I.6 Charge d'espace.....	8
I.6.1 Etude d'avalanche.....	8
I.7 Gaz électronégatifs.....	9
I.7.1 Hexafluorure de soufre SF <sub>6</sub> : .....	10
I.8 Mécanisme de Townsend.....	10
I.8.1 Influence de la cathode : .....	11
I.8.2 Coefficients $\alpha$ et $\gamma$ : .....	11
I.9 Loi de PASCHEN.....	12
I.9.1 Minimum de Paschen.....	13
I.9.2 Interprétation de la courbe : (d constante).....	13
I.10 Mécanisme des streamers .....	14
I.11 Conclusion .....	14
<b>Chapitre II Effet couronne.....</b>	<b>17</b>
II.1 Introduction.....	17
II.2 Définition de l'effet couronne .....	17

II.3 Mécanisme de la décharge couronne.....	18
II.4 Effet de la polarité sur le processus de développement de la décharge .....	18
II.4.1 Décharge positive.....	19
II.4.2 Décharge négative .....	20
II.5 Facteurs influençant la décharge couronne.....	21
II.5.1 Facteurs géométriques .....	21
II.5.2 Les facteurs physico-chimiques.....	24
II.5.3 Facteurs électriques.....	25
II.6 Phénomènes induits par la décharge couronne .....	25
II.6.1 Effets électromagnétiques .....	26
II.6.2 Effet chimique .....	26
II.7 Réduction de l'effet couronne sur les lignes électriques .....	27
II.7.1 Utilisation de conducteurs de gros diamètre.....	27
II.7.2 Utilisation de faisceau de conducteurs .....	27
II.8 Applications utilisant la décharge couronne .....	29
II.8.1 Paratonnerre.....	29
II.8.2 Neutralisation .....	30
II.8.3 Filtre électrostatique .....	30
II.8.4 Séparateur électrostatique .....	30
II.9 Avantage de la décharge couronne dans le réseau .....	31
II.10 Conclusion.....	31
<b>Chapitre III. Claquage dans le gaz SF<sub>6</sub></b> .....	<b>32</b>
III.1 Introduction.....	32
III.2 Fabrication du SF <sub>6</sub> .....	32
III.3 Propriétés du SF <sub>6</sub> .....	33
III.3.1 Propriétés chimiques.....	33
III.3.2 Propriétés physiques .....	34
III.3.3 Rigidité diélectrique .....	36
III.4 Sources des électrons libres .....	37
III.5 Les claquages: initiation et développement.....	37
III.6 Mécanismes de décomposition de SF <sub>6</sub> .....	38
III.7 Conclusion.....	40

## Liste des figures

Figure I. 1 Constitution d'un atome. ....	4
Figure I. 2 Cristal de gaz et de solide. ....	4
Figure I. 3 L'avalanche électronique . ....	7
Figure I. 4 La charge d'espace. ....	8
Figure I. 5 Etude d'avalanche. ....	9
Figure I. 6 Mécanisme de townsed. ....	11
Figure I. 7 Enceinte remplie par un gaz . ....	12
Figure I. 8 la variation de la tension critique en fonction du produit P*d .....	13
Figure I. 9 Schéma d'une avalanche primaire .....	16
Figure II. 1 Descriptif de la décharge couronne positive. ....	20
Figure II. 2 Descriptif de la décharge couronne négative. ....	21
Figure II. 3 Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge. ....	22
Figure II. 4 Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes. ....	22
Figure II. 5 Distribution du champ dans un système pointe-plan. ....	23
Figure II. 6 Distribution du champ dans un système plan-plan. ....	23
Figure II. 7 Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression. ....	25
Figure II. 8 Grandeurs caractéristiques d'un faisceau de conducteur. ....	28
Figure II. 9 Une phase en faisceau. ....	28
Figure II. 10 Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre. ....	29
Figure II. 11 Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique. ....	30
Figure II. 12 Utilisation de la décharge couronne la séparation électrostatique. ....	30
Figure III. 1 Schéma de principe de la synthèse du SF <sub>6</sub> par combinaison directe. ....	33
Figure III. 2 Tension de claquage entre des sphères de 5 cm de diamètre en fonction du produit pd. ....	35
Figure III. 3 Tension de claquage en fonction de la pression pour un champ non uniforme. ....	36
Figure III. 4 Schéma réactionnel de reformation du SF <sub>6</sub> soumis à des claquages [27], [28], [29]. ....	39

Figure III. 5 Schéma réactionnel de formation des principaux sous-produits de décomposition gazeux du SF<sub>6</sub> soumis à des claquages [30, 42, 43, 44, 45, 26].....40

## Liste des tableaux

Tableau I. 1 les énergies d'ionisation de quelques gaz.....4

Tableau III. 1 Caractéristiques physiques principales du SF<sub>6</sub> à la pression atmosphérique, à une température de 25 °C..... 34



# Introduction générale

Les phénomènes de décharge électrique ont fait l'objet de plusieurs études et cela depuis plus d'un siècle. Les premières études décrivant leur évolution et proposant des mécanismes de décharges datent du début du XX<sup>ème</sup> siècle. En effet, Les premières publications sur l'effet de couronne datent de 1915 avec les travaux effectués par F.W.PEEK, qui a établi par des essais expérimentaux une loi empirique exprimant le champ seuil d'apparition de l'effet couronne. Depuis ce temps, un nombre impressionnant de travaux de recherche concernant l'effet couronne sur les lignes aériennes de transport d'énergie électrique ont été effectués et publiés.

Une des conséquences du transport de l'énergie électrique à des hauts niveaux de tension est l'apparition de l'effet de couronne autour des lignes de transport. C'est ainsi que les premières expériences sur les fils conducteurs minces portés à des tensions suffisamment élevées ont montré qu'il se forme autour d'eux une gaine lumineuse, de couleur bleu-violet, dont l'épaisseur augmente avec la tension. C'est la présence de cette lueur qui a donné naissance à l'expression, universellement employée de décharge couronne ou corona effect.

L'hexafluorure de soufre SF<sub>6</sub> est un gaz incolore, inodore, non toxique et ininflammable. Ses hautes performances diélectriques alliées à sa capacité d'extinction de l'arc électrique et à son inertie chimique font qu'il est principalement utilisé comme isolant dans les équipements intervenant dans la transmission et la distribution de l'électricité : disjoncteurs, sectionneurs, caissons blindés, câbles à isolation gazeuse... La part de SF<sub>6</sub> fabriqué employée à cette fin dans le monde a ainsi été estimée à 80%. Les 20% restant sont utilisés dans l'industrie du magnésium et des semi-conducteurs, pour l'isolation phonique, en tant que traceur, ainsi que dans quelques processus médicaux hautement spécialisés.

Le travail qui a conduit à l'accomplissement de ceci est organisé à travers ce mémoire comme suit:

- Une introduction générale.
- Dans le premier chapitre, il s'agit à l'étude de propriétés des atomes et le phénomène d'ionisation dans le diélectrique gazeux et donne l'avalanche électronique et gaz électronégatifs. (puis donne les lois et les relations qui utilisent dans ces chapitres suivants.
- Dans le deuxième chapitre nous allons définir l'effet couronne et le mécanisme de la décharge couronne et se prémunir d'outils permettant la prédiction de ce phénomène et son influence sur les tensions des lignes de haute tension.
- Pour le troisième chapitre, nous présentons comment fabriquer le SF<sub>6</sub>, et leurs propriétés comme la propriété chimique et physique et donne les différentes sources des électrons libres, En suite, Nous présentons l'initiation et le développement de claquage et le mécanisme de décomposition de SF<sub>6</sub>.
- à la fin une conclusion générale clôture le présent manuscrit commentant les différents chapitres et relatant les perspectives de continuation de ce travail.

# Chapitre I

## Phénomène d'ionisation dans les diélectriques gazeux

### I.1 Introduction

Dans les conditions normales, un des meilleurs isolants connus est l'air qui nous entoure. Ses caractéristiques thermiques sont supérieures à celles des porcelaines ; il peut aussi agir comme agent de refroidissement et ne coûte absolument rien. Cependant, à des températures élevées, l'air devient bon conducteur par suite du phénomène d'ionisation.

Ce premier chapitre a pour but d'introduire les notions de base, les concepts et notations nécessaires à la compréhension de ce thème. Il présentera les différentes notions sur les atomes, le gaz et le phénomène d'ionisation dans le gaz.

### I.2 Constitution de l'atome

Le noyau renferme :

- Des protons  $m_p = 1,6725 \cdot 10^{-27} \text{kg}$  ;  $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$
- Des neutrons  $m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{kg}$  ;  $q_n = 0 \text{C}$

Les électrons gravitent autour du noyau

$$m_e = 9,1019 \cdot 10^{-31} \text{kg} ; q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$$

A l'état fondamental, l'atome est neutre

- S'il libère un électron il devient un ion positif  $A - 1e \rightarrow A_+$
- S'il gagne un électron devient un ion négatif  $A - 1e \rightarrow A_-$

Remarque : Le photon est un quantum d'énergie ( $m=0$  ;  $q=0$ ).

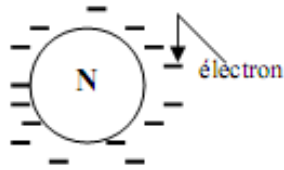


Figure I.1 Constitution d'un atome.

### I.3 Mouvement des particules dans le gaz

Le mouvement des particules dans le gaz est libre, contrairement au solide qui est une masse compacte car les particules sont reliées entre elles par des liaisons cristallines fortes.

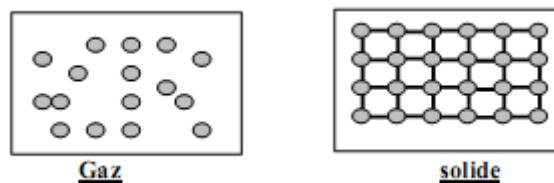


Figure I.2 Cristal de gaz et de solide.

### I.4 Processus d'ionisation et d'excitation

Les électrons dans un conducteur sont libres, dès qu'on applique un champ aussi faible soit-il ils se détachent de l'atome et se déplacent avec le champ. Par contre dans un isolant, les électrons sont liés et ne se détachent que si on leur fournit une énergie suffisamment grande supérieure à l'énergie d'ionisation de l'atome.

Remarque : L'énergie d'ionisation  $W_i$  est l'énergie qui retient l'électron dans l'orbite de l'atome.

$$W_i = e V_i$$

$e$ : charge élémentaire d'un électron ;  $V_i$  : potentiel d'ionisation

On donne ci-dessous les énergies d'ionisation de quelques gaz

Molécules	$W_i$ (eV)
CO <sub>2</sub>	13.7
N <sub>2</sub>	15.5
O <sub>2</sub>	12.2
H <sub>2</sub>	15.4
H <sub>2</sub> O	12.6

Tableau I.1 les énergies d'ionisation de quelques gaz.

### I.4.1 Ionisation par collision

#### I.4.1.1. Ionisation

Sous l'action de E l'électron qui se déplace avec une énergie cinétique  $W_c$ , entre en collision avec l'atome

$$\text{Avec } W_c = \frac{1}{2} m v^2$$

$m$  : masse de la particule

$v$  : vitesse de la particule

si  $W_c \geq W_i \rightarrow$  ionisation de l'atome :  $A + W_c \rightarrow A^+ + 1e + \Delta W$  avec  $\Delta W = W_c + W_i$  énergie supplémentaire cédée à l'électron libéré sous forme d'énergie cinétique. C'est le processus d'ionisation le plus fréquent dans les gaz.

#### I.4.1.2. Excitation

Un atome excité  $A^*$  est un atome qui a absorbé et emmagasiné une énergie. Cela se produit lorsque l'énergie cinétique est légèrement inférieure à  $W_i$ .

Si  $W_c$  est légèrement inférieure à  $W_i \Rightarrow$  excitation de l'atome.  $A + W_c \rightarrow A^*$

Chaque type de gaz possède une valeur propre de l'énergie d'excitation  $W_{ex}$ :

$$W_{ext} = eV_{ext}$$

$W_{ext}$  : Potentiel d'excitation

**Désexcitation** : Les processus de désexcitation peuvent se produire spontanément, lorsque l'électron d'un atome excité revient sur son orbite fondamentale. La perte d'énergie est compensée par l'émission d'un photon ayant une énergie égale au potentiel de désexcitation.

Après un temps très bref (entre  $10^{-7}$  et  $10^{-10}$ s) l'énergie est restituée au gaz sous forme d'un photon d'énergie  $W_p = h\nu(A^* \rightarrow W_p)$

Avec :

$$h = 6,625 \cdot 10^{-34}$$

$J \cdot s$  : constante de Planck

$\nu$  : fréquence du photon

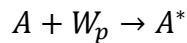
### I.4.2 Photo-ionisation

L'atome absorbe l'énergie d'un photon  $W_p$ .

- Si  $W_p \geq W_i \Rightarrow$  photo ionisation  $A + W_c \rightarrow A^+ + 1e + \Delta W$

Avec  $\Delta W = W_p - W_i$  cédée à l'électron libéré sous forme d'énergie cinétique.

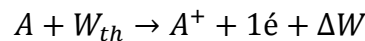
- Si  $W_p$  légèrement inférieure à  $W_i \Rightarrow$  photo excitation.



### I.4.3 Ionisation thermique

Lorsqu'un gaz est porté à une température élevée ( $> 1500$  °K), l'atome est ionisé grâce à l'énergie thermique absorbée  $W_{th}$ .

- $W_{th} \geq W_i \Rightarrow$  ionisation



Avec  $\Delta W = W_{th} - W_i$  cédée à l'électron libéré.

- Si  $W_{th}$  légèrement inférieure à  $W_i \Rightarrow$  excitation

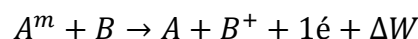


L'ionisation thermique est rencontrée surtout dans les gaz à haute pression. Dans ce cas, l'ionisation ne se produit pas au cours d'un seul choc, mais est le résultat d'excitations successives ; en effet, la forte densité des particules rend la fréquence des chocs élevée.

Le temps moyen entre deux chocs successifs est inférieur à la durée de vie de l'atome excité, si bien les excitations se cumulent pour arriver à la valeur d'ionisation.

### I.4.4 Ionisation par les atomes métastables

Un métastable  $A^m$  est un atome excité qui garde assez longtemps l'énergie absorbée (de l'ordre de 1s). Lors de la rencontre avec un atome B, il peut se produire un transfert d'énergie qui permettra l'ionisation de ce dernier.



C'est le processus le moins fréquent.

## I.5 Avalanche électronique

On considère deux électrodes planes placées dans un gaz et soumises à une tension élevée.

### I.5.1 Electron primaire

Créé par ionisation grâce à des agents naturels tels que les rayonnements cosmiques et la radioactivité de la terre.

### I.5.2 Description de l'avalanche

L'électron primaire  $e_0$  accéléré par le champ  $E$  entre en collision avec un atome  $A_1$  et l'ionise,  $A_1$  libère un électron et devient lui-même un ion positif.

Les électrons  $e_0$  et  $e_1$  ionisent par collision deux atomes  $A_2$  et  $A_3$  qui libèrent deux électrons  $e_2$  et  $e_3$ . Ces quatre électrons entrent en collision avec 4 autres atomes qu'ils ionisent  $\Rightarrow$  avalanche électronique.

La multiplication des électrons se poursuit suivant ce processus jusqu'à ce que l'avalanche arrive à l'anode.

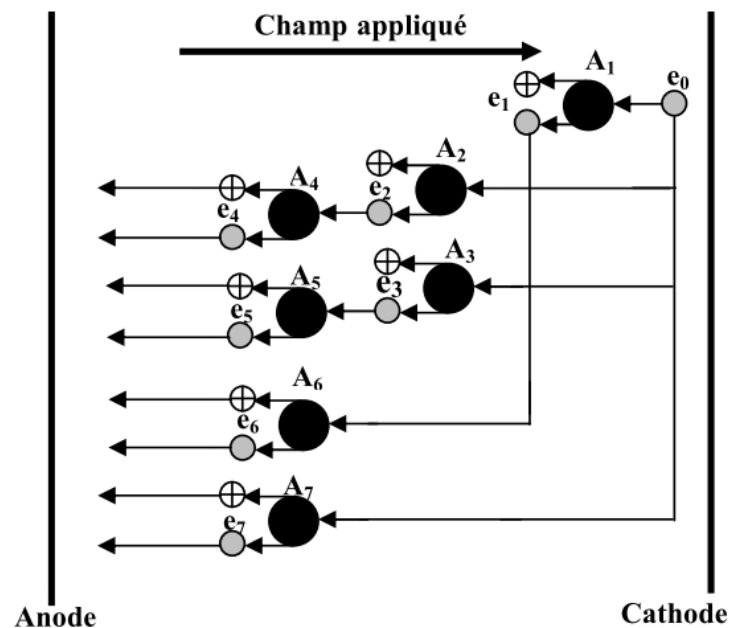


Figure I.3 L'avalanche électronique .

Remarques:

- L'avalanche prépare le chemin au claquage du gaz.
- Un atome ionisé fournit un électron et devient lui-même un ion positif ; Il y a autant d'électrons dans l'avalanche que d'ions positifs. Chaque collision ionisante produit une paire électron-ion positif.
- L'avalanche progresse dans le sens opposé au champ électrique (Cathode  $\rightarrow$  Anode).

## I.6 Charge d'espace

Les électrons plus rapides sont absorbés par l'anode, tandis que les ions positifs lourds et plus lents forment entre les électrodes un ensemble de charges qu'on appelle « Charge d'espace ». (Figure I.4)

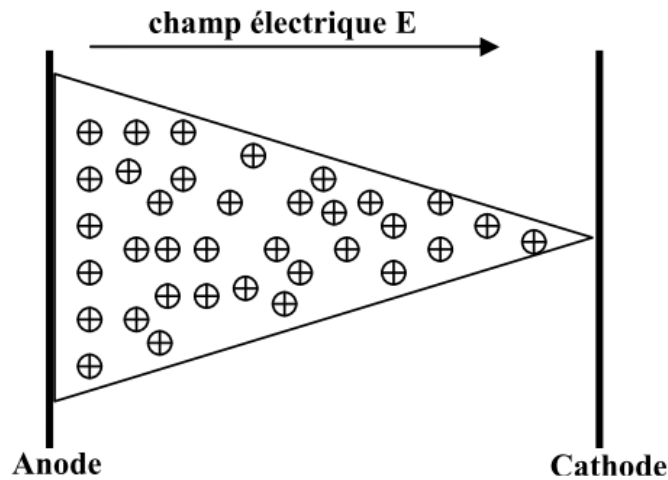


Figure I.4 La charge d'espace.

### Forme de la charge d'espace:

Comme l'avalanche débute près de la cathode et finit sur l'anode, elle présente la forme d'un cône. Elle progresse dans le sens opposé à E.

### Exemple:

Air,  $P = 1 \text{ atm}$ ,  $\alpha = 18,4$  ;  $d = 10 \text{ mm}$

Dans le 10<sup>ème</sup> mm, il y a 5 fois plus d'ions positifs que dans les 9 premiers mm.

### I.6.1 Etude d'avalanche

On considère deux électrodes planes de surface = unité, soumises à une haute tension. Des rayons UV appliqués sur la cathode lui permet d'émettre  $n_0$  électrons primaires/s. (Figure I.5)

- à l'abscisse  $x$ , l'avalanche produit  $n$  électrons.
- à l'abscisse  $x+dx$ , elle produit  $dn$  nouveaux électrons.

$dn$  est proportionnel à  $n$ ,  $dx$  et  $S$  :  $dn = \alpha n S dx$ .

Comme  $S = 1 \text{ cm}^2$  :

$$dn = \alpha n dx \rightarrow \frac{dn}{n} = \alpha dx \rightarrow \log n = \alpha x + C \rightarrow n = e^C e^{\alpha x}$$

Condition limite :  $x = 0 \rightarrow n = n_0 = e^c \rightarrow n = n_0 e^{\alpha x}$

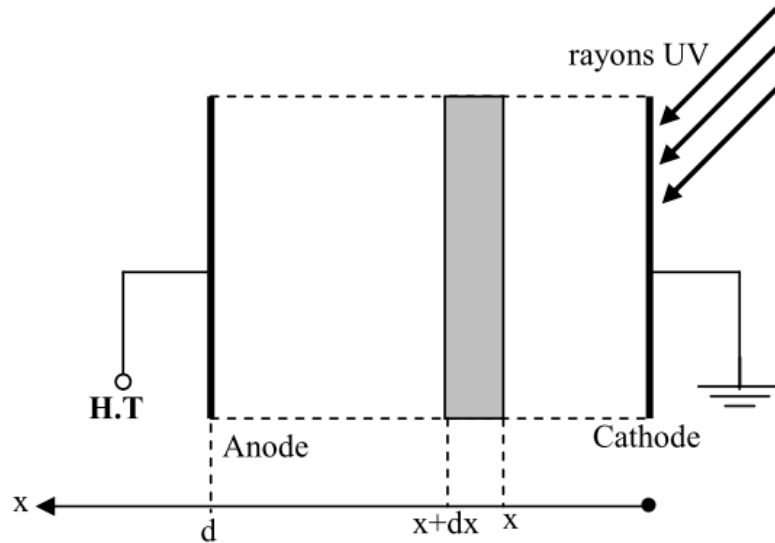


Figure I.5 Etude d'avalanche.

Coefficient  $\alpha$  :

$\alpha = dn\left(\frac{1}{ndx}\right)$  nombre de paires électrons-ions positifs créés par un électron sur un parcours de 1cm.  $\alpha$  est appelé coefficient d'ionisation ou 1<sup>er</sup> coefficient de Townsend.

Nombre total de paires électrons-ions positifs créés dans une avalanche:

$$x = d \rightarrow n = n_0 e^{\alpha d}$$

Nature du courant de l'avalanche :

Rappel :  $j = Nev$

Avec  $N$  nombre de particules/volume ;  $e$  charge d'une particule ;  $v$  vitesse

$$\text{avalanche} \rightarrow \begin{matrix} N_e \text{ électrons} \\ N_i \text{ ions positifs} \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} \text{courant électronique } J_e = N_e e v_e \\ \text{courant ionique } J_i = N_i e v_i \end{matrix}$$

Comme  $v_e \gg v_i \rightarrow J_e \gg J_i \rightarrow$  courant électronique

Courant total par avalanche:

$$n = n_0 e^{\alpha d} \rightarrow i = n_0 e e^{\alpha d} \rightarrow i = i_0 e^{\alpha d} \text{ avec } i_0 = n_0 e \text{ courant primaire}$$

## I.7 Gaz électronégatifs

La diminution d'électrons dans le gaz, grâce à l'attachement aux atomes, rend le claquage plus difficile, pour cette raison, les gaz électronégatifs sont les meilleurs isolants gazeux utilisés dans l'isolation haute tension. Pour ce type de

gaz, les molécules se combinent facilement avec les électrons libres et peuvent absorber une partie de l'énergie de l'électron incident.

### I.7.1 Hexafluorure de soufre SF<sub>6</sub> :

Dans les dernières décennies, la nécessité de diminuer sensiblement les dimensions des installations électriques pour raison d'encombrement et de coût, a conduit à rechercher d'autres types de gaz, possédant de meilleures propriétés d'isolation que l'air, tels que le SF<sub>6</sub>. Le SF<sub>6</sub> est un gaz inodore, incolore, non toxique, ininflammable et plus résistant au claquage. Il n'est pas toxique, chimiquement résistant et ne se décompose pas sous l'effet de la chaleur jusqu'à des températures de 800 °C.

$$\frac{U_c(SF_6)}{U_c(Air)} = 1,6 \div 2,62$$

Le SF<sub>6</sub> est le meilleur isolant gazeux industriel qu'on connaît.

Remarques :

- ✓ Parallèlement, on a utilisé les bonnes caractéristiques du vide (10<sup>-5</sup> – 10<sup>-7</sup> mm Hg) dans la technique de coupure (disjoncteurs, relais...) malgré des difficultés pratiques importantes.
- ✓ L'hydrogène et les gaz inertes (argon, néon, hélium,...) ont une rigidité diélectrique la plus faible que celle de l'air. Pour cette raison qu'ils sont employés dans les applications de la décharge électrique (lampe à décharge...).

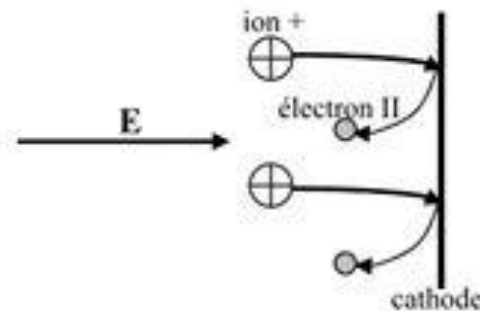
## I.8 Mécanisme de Townsend

Pour les distances faibles (max. 1 m), la théorie de Townsend est valable pour des pressions inférieures à 0,1 à 1 atmosphère tandis que la théorie de Streamer est valable pour les hautes pressions (>=1 atm).

**Phase 1:** Un électron primaire situé près de la cathode provoque une avalanche électronique primaire.

**Phase 2:** Les électrons sont absorbés par l'anode tandis que les ions positifs bombardent la cathode avec leur énergie cinétique pour extraire des électrons secondaires.

**Phase 3:** Les électrons (secondaires) émis de la cathode par bombardement créent de nouvelles avalanches secondaires et provoquent le claquage du gaz.



**Figure I.6** Mécanisme de Townsend.

Remarques:

- ✓ Dans le mécanisme de Townsend, l'étincelle de la décharge se produit dès que la cathode émet des électrons secondaires.
- ✓ La décharge de Townsend se situe entre  $10^{-8}$  et  $10^{-6}$  A, elle est donc peu lumineuse. La luminosité est à peu près uniforme dans tout l'espace compris entre les électrodes.

### I.8.1 Influence de la cathode :

La tension critique de claquage  $U_c$  dépend du type de la cathode utilisée. Supposons 3 cathodes en matière différente : Aluminium, Nickel et l'Alliage Al-Ni.

Les énergies d'extraction d'électrons sont pour :

- Le Nickel  $W_{\text{ext}} = 0,075$  eV ;
- l'Aluminium  $W_{\text{ext}} = 0,1$  eV ;
- l'Alliage Al-Ni  $W_{\text{ext}} = 0,15$  eV.

Il en résulte que  $U_c (\text{Al-Ni}) > U_c (\text{Al}) > U_c (\text{Ni})$

### I.8.2 Coefficients $\alpha$ et $\gamma$ :

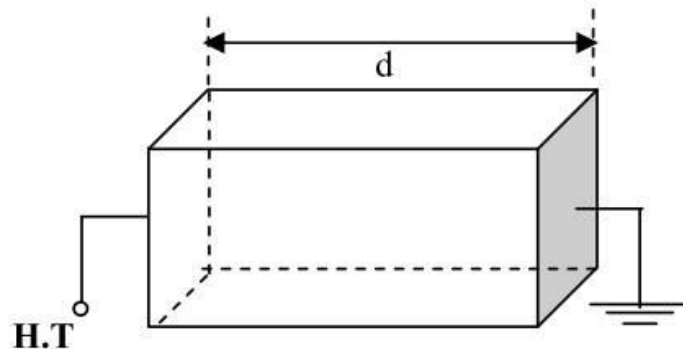
- ✓ Coefficient d'ionisation  $\alpha$  : nombre d'électrons créés par ionisation par un électron sur 1 cm de parcours.
- ✓ Coefficient  $\gamma$  : nombre d'électrons secondaires émis par bombardement de la cathode par un ion positif.

Le premier coefficient de Townsend, appelé aussi coefficient d'ionisation, est plus élevé dans les gaz rares à cause de leur facilité d'ionisation (néon, argon, vapeur

métallique...). Ce coefficient est par contre plus petit dans le cas des gaz électronégatifs.

### I.9 Loi de PASCHEN

Considérons une enceinte pleine de gaz lequel on peut varier la pression (Figure I.7).



**Figure I.7** Enceinte remplie par un gaz .

La loi de Paschen décrit la variation de la tension critique en fonction du produit  $P \cdot d$  (Figure I.8).

$U_c$  : tension critique de claquage ;

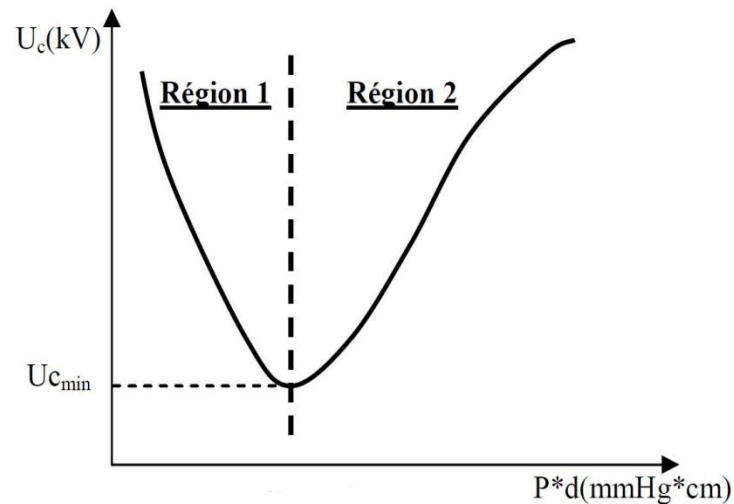
$P$  : pression du gaz ;

$d$  : distance inter-électrodes.

$U_{c_{\min}}$  : tension critique minimale ;

Si  $U < U_{c_{\min}} \Rightarrow$  pas de claquage.

Loi de Paschen est étudiée en champ homogène.



**Figure I.8** la variation de la tension critique en fonction du produit  $P*d$

### I.9.1 Minimum de Paschen

On peut voir d'après la courbe de Paschen qu'il y a une valeur de tension  $U_{c_{min}}$ . Quand la tension est inférieure à cette valeur, l'intervalle gazeux de n'importe quelle longueur et sous n'importe quelle pression ne peut être claqué.

Pour l'air:  $U_{c_{min}} = 326$  V.

Pour l'argon pur:  $U_{c_{min}} = 195$  V.

Pour l'argon avec des impuretés de sodium:  $U_{c_{min}} = 95$  V.

La courbe de Paschen présente un minimum qui correspond à 300-400 V dans l'air à la pression atmosphérique. Ce minimum est assez mal défini et dépend de l'état des électrodes et du gaz.

Cela signifie qu'au dessous de cette tension aucun amorçage n'est possible. C'est ainsi qu'à 220 V, nous aurons seulement des étincelles de rupture de tension inductive et jamais d'étincelles dues à la tension elle-même.

### I.9.2 Interprétation de la courbe : (d constante)

- ✓ Région 1 :  $U_c$  diminue en fonction de la pression  $P$

Quand la pression augmente, la densité atomique augmente ; Il y a plus de particules et donc plus d'ionisation par collision. Le gaz devient plus conducteur et le claquage plus facile  $\Rightarrow U_c$  diminue.

- ✓ Région 2 :  $U_c$  augmente avec la pression  $P$ .

Quand la pression augmente encore plus, malgré que la probabilité d'ionisation par collision augmente, le libre parcours moyen  $\lambda$  est tellement petit que l'énergie de

l'électron  $W = \int qEdr$  nécessaire à l'ionisation des atomes devient insuffisante. Il y a peu d'ionisation et le claquage devient difficile  $\Rightarrow U_c$  augmente

Déduction : Selon la loi de Paschen, il est plus recommandé d'utiliser les gaz à haute pression (et quelquefois à très basse pression) dans les appareillages HT, condensateurs, câbles... La validité expérimentale de la loi de Paschen est vérifiée aux faibles distances jusqu'à 0,1 mm et des pressions jusqu'à 10 atmosphères [1].

### I.10 Mécanisme des streamers

Pour le produit  $p.d$  supérieur à 200 torr.cm, Meek et Raether ont définis une théorie basée sur le passage de l'avalanche primaire en streamer. Raether a établi un critère basé sur le fait que l'avalanche doit atteindre une taille critique pour que le streamer puisse se développer. Le critère est :

$$\int_0^{L_c} \alpha \cdot dx = \ln N_c$$

Avec  $N_c$  nombre critique d'électrons en tête d'avalanche (de l'ordre de  $10^8$ ).  $L_c$  est la longueur critique de l'avalanche. La croissance d'un canal ionisé mince (les streamers) entre les électrodes s'explique par le phénomène de photo-ionisation se produisant à l'intérieur de l'avalanche primaire. Les électrons de grande énergie accélérés par le champ électrique causent l'excitation des atomes du gaz environnant en les portant à des niveaux d'énergie élevés. Ces atomes, en retrouvant leur état stationnaire, libèrent des photons. Si ces photons ont une énergie inférieure à l'énergie d'ionisation des atomes du gaz environnant, ils peuvent être absorbés par ces atomes avant d'être émis de nouveau. Si leur énergie est supérieure à l'énergie d'ionisation des atomes du gaz, de nouveaux électrons peuvent être libérés. Par exemple dans l'air les molécules d'azote  $N_2$  excitées peuvent émettre des photons avec une énergie supérieure à 13 eV, susceptible d'ioniser les molécules d'oxygène dont le potentiel d'ionisation n'est que de 12.2 eV. Si les électrons ainsi produits sont situés au voisinage de l'avalanche primaire, ils vont créer de nouvelles avalanches dites secondaires. Donc la propagation d'un streamer ne peut se maintenir sans les deux principes suivants :

- Notion d'avalanche de taille critique ;
- Création d'électrons en avant de la tête de streamer.

Les streamers positifs ont été amplement étudiés dans les travaux scientifiques. Ce qui n'a pas été le cas des streamers négatifs. Cependant, des différences notables ont été clairement établies dans leur développement. Dans le cas du streamer positif, l'avalanche primaire initiée par un électron germe amène la présence d'une charge d'espace positive près de la cathode et une injection d'électrons devant l'électrode positive. La croissance du nombre de paires d'électron-ion est exponentielle le long du parcours de l'avalanche et le profil de densité des ions positifs croît très rapidement vers la tête de l'avalanche.

Une charge d'espace positive de très forte densité se crée ainsi dans le canal inter électrodes. Elle entraîne une distorsion du champ électrique qui se traduit par une augmentation du champ entre elle et la cathode et un abaissement de celui-ci dans le sens de l'anode (Figure I.9.a). En effet, la séparation des électrons et des ions génère une charge d'espace importante produisant un champ électrique  $E_r$  de structure dipolaire, s'opposant à la séparation et qui s'ajoute vectoriellement au champ extérieur  $E_0$  (Figure I.9.b). Le champ résultant  $E_r$  est alors plus faible que  $E_0$  et acquiert une composante radiale. A ce modèle, il faut ajouter l'effet de répulsion entre électrons qui n'est plus négligeable lorsque la densité électronique devient importante. Il en résulte une augmentation du rayon de la tête de l'avalanche. Alors le taux d'ionisation, croissant avec le champ électrique, est augmenté à la tête de l'avalanche, tandis qu'il est diminué à l'intérieur de celle-ci par le développement du champ résultant. Le champ électrique est alors fortement perturbé par ces charges d'espace. Si ces densités sont importantes le mécanisme de streamer est alors déclenché [2].

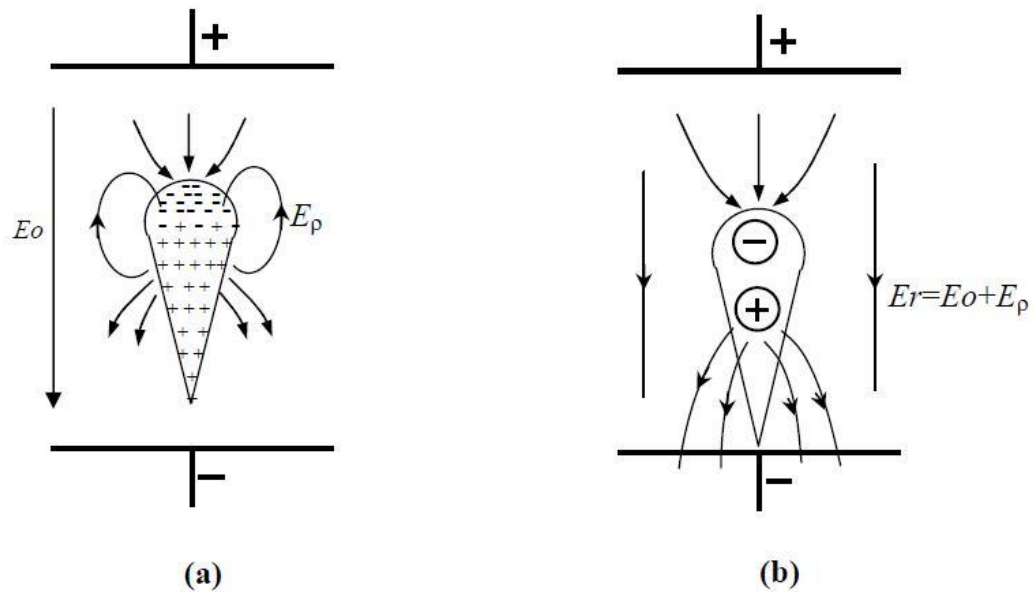


Figure I.9 Schéma d'une avalanche primaire [2].

### I.11 Conclusion

La pression du gaz est un facteur très important dont dépendent les caractéristiques de la décharge. Donc nous résumons la décharge dans l'air en deux théories : La théorie de Townsend pour des faibles pressions et la théorie des streamers pour des pressions élevées. En présence d'un champ uniforme, l'activité d'ionisation conduit généralement au claquage. Par contre, en champ non uniforme, la décharge se manifeste d'abord sous forme de décharge couronne. L'effet couronne se manifeste à partir d'une valeur seuil du champ électrique pour laquelle il y a apparition brusque d'une conductivité de l'air au voisinage immédiat d'un conducteur soumis à une tension croissante.

# Chapitre II

## Effet de couronne

### II.1 Introduction

Une des conséquences indésirable du transport de l'énergie électrique à de hauts niveaux de tension est l'apparition de l'effet couronne. Ce phénomène se manifeste sous forme d'une gaine lumineuse qui apparaît autour des conducteurs de la ligne, lorsque ceux-ci sont portés à une tension suffisamment élevée pour que le champ électrique dépasse le seuil d'apparition de l'effet de couronne.

Il existe toujours dans certain nombre de paires d'ions positif -électrons libres, créés par rayonnement cosmique ou par la radioactivité naturelle. Lorsque ces électrons sont soumis à l'action d'un champ électrique, ils sont accélérés, et si le champ est assez intense, l'énergie qu'ils acquièrent devient suffisante pour provoquer l'ionisation des molécules neutres qu'ils heurtent (ionisation par choc). Il se crée de nouveaux électrons libres, lesquels, soumis au même champ, vont également ioniser des molécules, et ainsi de suite : le processus prend une allure d'avalanche. Pour que celle-ci puisse se maintenir, il faut qu'elle atteigne une taille critique, et que le champ électrique ait une valeur suffisante.

### II.2 Définition de l'effet couronne

L'effet couronne est lié à l'apparition de l'avalanche électronique qui se développe dans un intervalle gazeux séparant deux électrodes asymétriques soumises à un champ électrique hétérogène à des pressions de quelques torrs à quelques atmosphères. La décharge couronne se manifeste dans les conditions naturelles. Elle apparaît sous forme d'une gaine lumineuse qui apparaît autour des conducteurs entourés par l'air, lorsque la valeur maximale du champ électrique atteint celle du champ d'ionisation de l'air et se manifeste sur toute la gamme de

fréquences de la tension. La décharge couronne se caractérise par des phénomènes de nature optique, acoustique et électrique [3], [4].

Lorsque le champ électrique en un point du fluide est suffisamment fort, le fluide s'ionise autour de ce point et devient conducteur. En particulier, si un objet chargé possède des pointes ou des coins, le champ électrique y sera plus important qu'ailleurs (c'est le pouvoir des pointes), c'est là en général, que se produira une décharge de corona. Ce phénomène tendra à se stabiliser de lui-même puisque la région ionisée devenant conductrice, la pointe aura apparemment tendance à disparaître. Les particules chargées se dissipent alors sous l'effet de la force électrique et se neutralisent au contact d'un objet de charge inverse. Les décharges de corona se produisent donc en général autour d'une électrode de rayon de courbure fort (un défaut du conducteur formant une pointe par exemple) tel que le champ électrique à ses environs soit suffisamment important pour permettre la formation d'une couche d'air ionisé, et une autre de rayon de courbure faible (une plaque métallique ou la terre).

### II.3 Mécanisme de la décharge couronne

Les décharges sont interprétées sur la base de deux modèles [3], [5] :

- Le premier concerne les décharges à long rayon d'action faisant intervenir l'intervalle de décharge tout entier et notamment les effets secondaires à la cathode : c'est la décharge de Townsend.
- Le deuxième modèle mis au point pour expliquer la rapidité des phénomènes concernant les décharges à court rayon d'action, faisant intervenir la situation locale : c'est la décharge par Streamers.

### II.4 Effet de la polarité sur le processus de développement de la décharge couronne

La décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure [6]. Si elle est positive, on parle d'une décharge couronne positive, sinon, d'une décharge couronne négative. Du fait de la différence de masse entre les électrons (négatifs) et les ions (positifs), la physique de ces deux types de décharge couronne est radicalement différente. La décharge couronne négative se produit beaucoup plus qu'une décharge couronne positive par

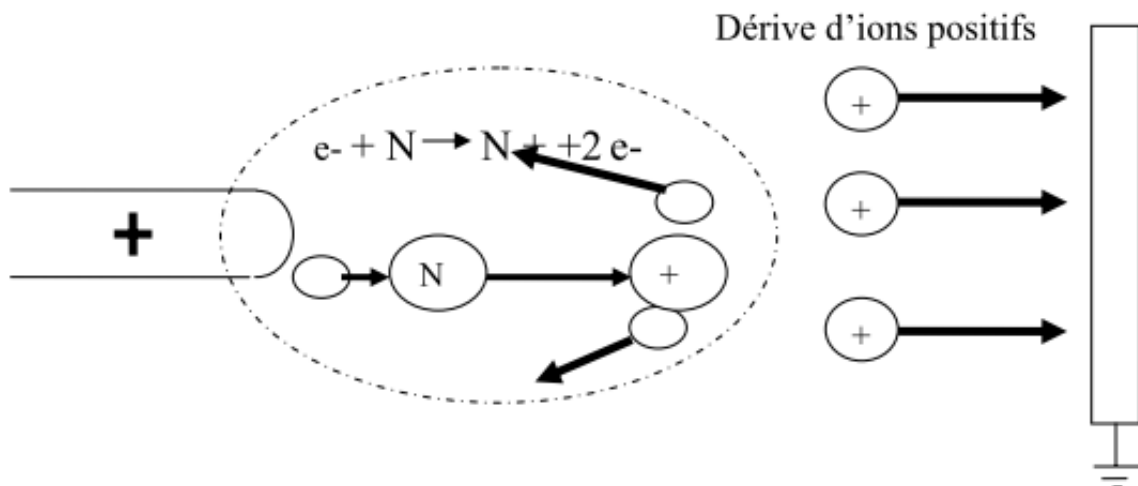
contre la décharge complète intervient à des tensions plus faibles en polarité positive qu'en polarité négative [3], [7].

Pour la décharge couronne négative, l'avalanche électronique prend naissance autour de la pointe et se dirige vers l'électrode plane. Par contre en polarité positive, les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques se déplacent vers l'anode dans la zone où le champ électrique est le plus intense. De plus la décharge couronne apparaît à des tensions plus faibles en pointe négative qu'en pointe positive. Mais la décharge complète intervient à des tensions plus faibles en polarité négative. Du point de vue de l'isolation, les décharges couronne positives sont plus néfastes que celles des couronnes négatives. L'intensité lumineuse et la longueur des streamers sont beaucoup plus faibles qu'en polarité positive [3].

De plus le champ seuil de l'effet couronne est légèrement plus petit en tension positive qu'en tension négative et les pertes sont plus élevées en polarité négative qu'en polarité positive [8]. La décharge positive présente un grand intérêt dans la mesure où elle constitue la contrainte la plus sévère pour un intervalle du point de vue isolation. Les décharges négatives sont en effet de structure très complexe. Il faut pratiquement une tension d'environ deux fois plus forte que dans le cas de la décharge positive pour obtenir l'amorçage [9].

#### II.4.1 Décharge 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 II.1. 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 ( $< 30$  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 [10], est appelée région de « dérive ». (Figure II.1).



**Figure II.1** 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. D'après les modélisations de [11] la décharge est composée d'une phase de propagation du streamer (durée de la propagation de 50 ns à la vitesse de  $2 \times 10^5$  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 [12] 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.

#### II.4.2 Décharge 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 Sigmund [13] expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode (Figure II.2). 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.

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.

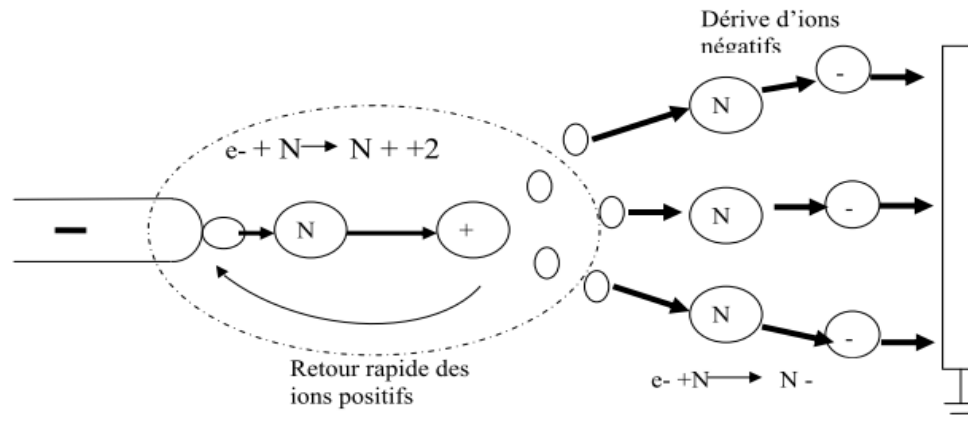


Figure II.2 Descriptif de la décharge couronne négative.

## II.5 Facteurs influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne [14]. On distingue trois facteurs essentiels :

- ✓ Facteurs géométriques.
- ✓ Facteurs physico-chimiques.
- ✓ Facteurs électriques.

### II.5.1 Facteurs géométriques

#### II.5.1.1 Rayon de la courbure

L'augmentation du rayon de courbure augmente la tension seuil d'apparition de l'effet couronne.

#### II.5.1.2 Distance inter-électrodes

L'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge est montrée sur la (Figure II.3).

Il apparaît clairement que le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De

plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour des valeurs de tension inférieures dans le cas de faibles distances inter-électrodes [15].

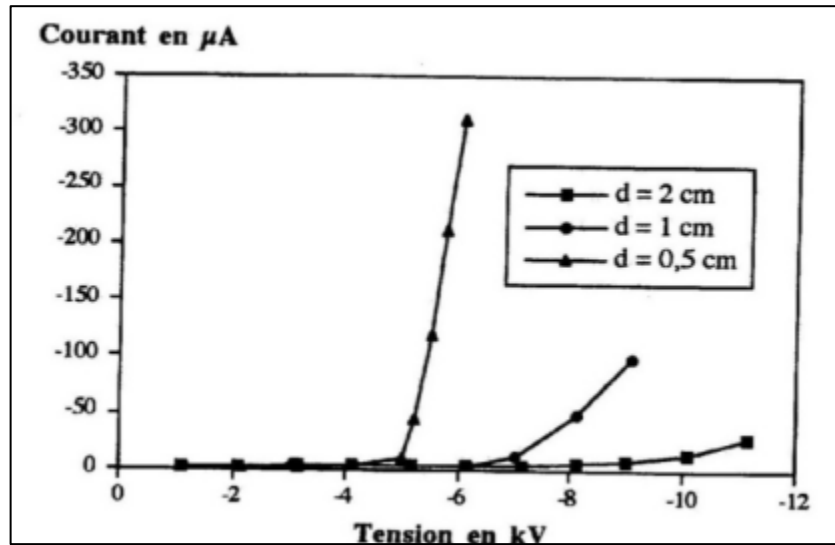


Figure II.3 Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne [15].

### II.5.1.3 La nature des électrodes

La caractéristique courant-tension est représentée selon la nature des électrodes (cuivre, aluminium, et acier) sur la Figure II.4.

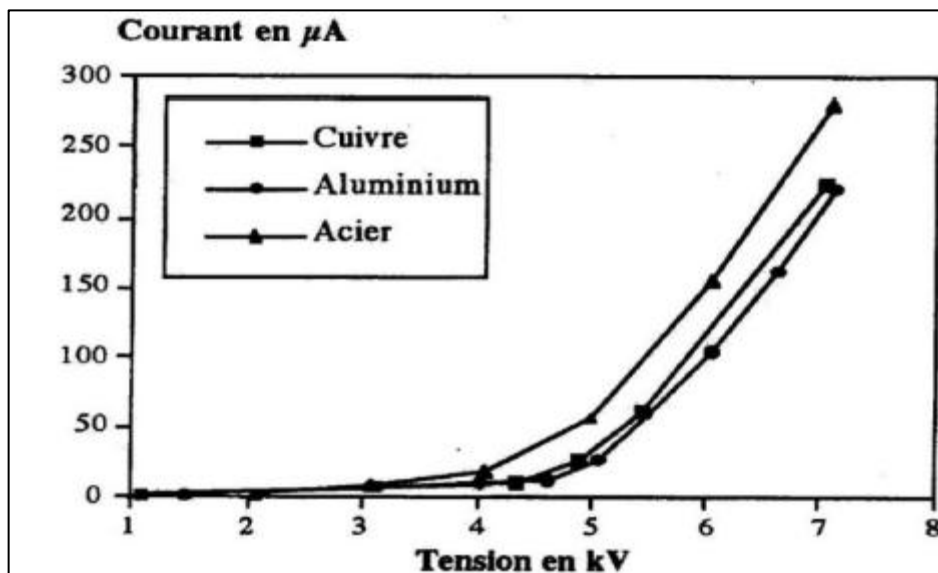


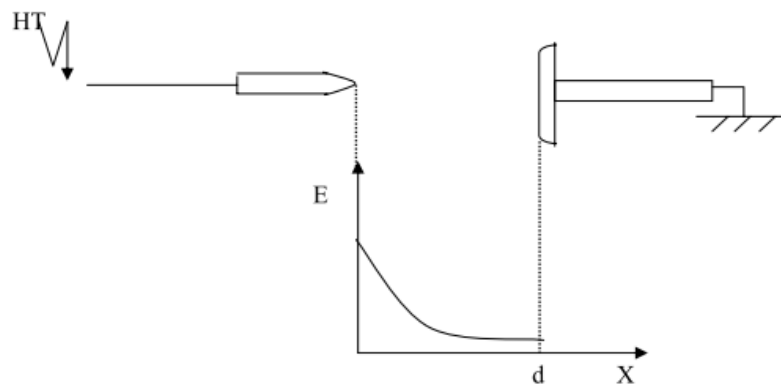
Figure II.4 Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes [15].

### II.5.1.4 La forme d'électrodes

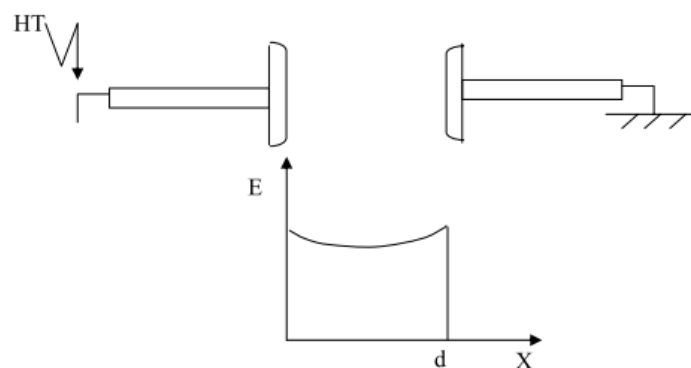
Dans les systèmes d'électrodes utilisées, la distribution du champ électrique dans l'espace inter électrode, avant amorçage de la décharge, dépend de la configuration géométrique des électrodes.

En champ non homogène, comme c'est le cas en géométrie pointe-plan (Figure II.5), la décharge couronne présente une zone de stabilité. Ce type de décharge est caractérisé par une tension seuil  $U$  de son apparition est une tension  $U_d$  de sa transition vers l'arc électrique.

Par contre, en champ homogène (Figure II.6), dès son apparition, la décharge transite rapidement vers l'arc électrique, autrement dit, la décharge couronne est inexistante et les tensions  $U$  et  $U_d$  sont confondues [25].



**Figure II.5** Distribution du champ dans un système pointe-plan [16].



**Figure II.6** Distribution du champ dans un système plan-plan [16].

### II.5.1.5 Etat de surface

L'état de surface des conducteurs est un paramètre important par le fait que, plus il se dégrade plus les pertes augmentent et plus le champ perturbateur est élevé. Parmi les facteurs de dégradation, la pollution végétale ou industrielle, voir suintement en surface de graisse de toronage, jouent un rôle important, mais

malheureusement difficilement maîtrisable. Plus encore, la pluie, en raison des aspérités que constituent les gouttes d'eau suspendues aux conducteurs, multiplie le nombre d'aigrettes génératrices de l'effet couronne [17].

## II.5.2 Les facteurs physico-chimiques

### II.5.2.1 La densité de l'air

Les paramètres climatiques et particulièrement la densité de l'air influencent la tension d'amorçage des intervalles d'air.

La tension  $U_d$  est proportionnelle à la densité de l'air :

$$U_{dn} = \frac{U_d k_h}{\delta}$$

Avec :

$U_{dn}$  : Tension de claquage dans les conditions normales.

$\frac{k_h}{\delta}$  : Correction à apporter pour avoir les conditions normales.

### II.5.2.2 La température

Avec l'augmentation de la température, à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne. Cela est dû au fait que dans ce cas le libre parcours moyen augmente [16].

### II.5.2.3 L'humidité

L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est très importante, surtout dans le cas où le champ électrique est non uniforme. Ce phénomène serait lié d'une part à l'accroissement de l'attachement des électrons libres, du fait de la présence de vapeur d'eau dans l'air (grande électronégativité) et d'autre part la plus grande absorption des photons en tête des streamers, dans la région où se produisent les avalanches secondaires par photo-ionisation [18]. Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour 90% que pour 5% d'humidité relative [15]. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente.

### II.5.2.4 La pression

A partir de la tension atmosphérique, l'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant. La figure II.7 montre l'effet de la pression sur la décharge.

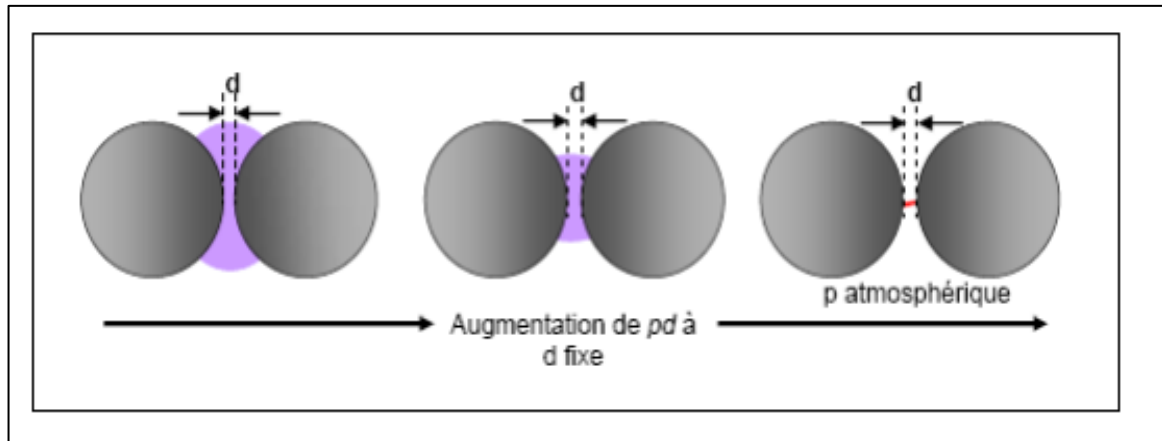


Figure II.7 Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression [19].

### II.5.3 Facteurs électriques

L'effet couronne diffère selon qu'on applique à un système d'électrodes une tension continue ou alternative.

Les différents modes d'émission de charges qui ont été décrits en tension alternative sont observés également en tension continue, la seule différence est que l'effet couronne en tension alternative implique que la concentration des émissions de charges correspond à la crête de la sinusoïde du courant, tandis qu'en continu l'émission de charges est permanente [20].

## II.6 Phénomènes induits par la décharge couronne

De nombreuses réactions autres que des réactions d'ionisation ont lieu au sein du gaz : dissociation, recombinaison, excitation moléculaire, excitation électronique...etc.

Les différentes espèces ainsi produites vont se distinguer par leur charge, leur masse, leur vitesse et leur énergie, mais aussi par leur nature et leur état d'énergie interne.

### II.6.1 Effets électromagnétiques

Ces effets se traduisent par les perturbations radiophoniques et les pertes d'énergie dans les lignes de transport. Celui-ci est lié aux courants à haute fréquence circulant dans les conducteurs. Les perturbations dues aux lignes aériennes à haute tension au-dessus de «1kV» peuvent être produites sur une très large bande de fréquence par:

- ✓ Les décharges par effet couronne dans l'air à la surface des conducteurs.
- ✓ Les décharges et claquages dans les régions à fortes contraintes des isolateurs.
- ✓ Les claquages au niveau de contacts défectueux.

Le phénomène d'effet couronne est à l'origine des pertes sur les lignes de transport d'énergie électrique, à cause du processus de l'ionisation par choc. Les charges des deux signes augmentent et celles de même polarité avec la polarité du conducteur s'éloignent de ce dernier. Le déplacement de ces charges sous l'action du champ électrique crée un courant de couronne qui est beaucoup plus grand que le courant de fuite dans les lignes. Les pertes liées à ce courant de couronne peuvent avoir des valeurs comparatives avec les pertes sur les résistances des lignes en cas des courants de service. [21], [22].

Les mesures effectuées sur les lignes expérimentales montrent que les pertes par effet couronne apparaissent à des tensions inférieures à la tension critique, celle qu'on appelle les pertes en régime localisé. Lors des tensions supérieures à la tension critique, les charges d'espace propagées sont en quantités suffisantes pour former une couronne autour du conducteur et dans ce cas on les appelle les pertes en régime généralisé.

### II.6.2 Effet chimique

Nous assistons, suivant la polarité de la décharge, à la naissance de certaines espèces chimiques dérivées du gaz ambiant, par exemple dans le cas de l'air, à la naissance d'autres d'oxydes d'azote ( $NO$ ,  $NO_2$ ), de radicaux ( $HO$ ) et ( $HO_2$ ) ainsi que l'ozone ( $O_3$ ) qui est un gaz instable, pouvant dégrader beaucoup de matières [3].

## II.7 Réduction de l'effet couronne sur les lignes électriques

Les décharges de corona sont particulièrement à éviter dans:

- ✓ Les installations de transmission électrique où elles provoquent une perte d'énergie, du bruit et de la distorsion des tensions et courants.
- ✓ La plupart des équipements électriques : transformateurs, machines électriques (aussi bien générateurs que moteurs), etc. où elles endommagent progressivement les isolants amenant à une détérioration prématurée des équipements.
- ✓ Toutes les situations nécessitant une tension importante mais où la production d'ozone doit être minimale.

La réduction de l'effet corona sur les lignes à haute tension par des mesures spécifiques n'est en général nécessaire que quand le niveau de la tension de la ligne dépasse 245 kV. Au-delà de la réduction des nuisances aux populations, le coût économique des pertes en ligne par effet Corona peut justifier à lui seul de prendre des mesures correctives. Ces mesures sont de 2 types:

### II.7.1 Utilisation de conducteurs de gros diamètre

Pour limiter le champ électrique à la surface, cette mesure est souvent inefficace, et rarement économiquement justifiée, car l'effet de peau rend souvent inefficace le choix des conducteurs de grosse section.

### II.7.2 Utilisation de faisceau de conducteurs

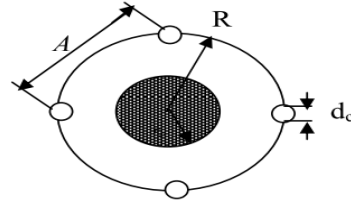
Une technique permettant de limiter l'effet couronne, consiste à remplacer un conducteur par plusieurs conducteurs maintenus à une distance fixe (par des entretoises), dont la section totale est égale à celle du conducteur unique. 2 conducteurs sont utilisés pour une tension de 400 kV, 3 conducteurs pour 500 kV. Cette technique trouve son application dans les lignes à très haute tension (supérieures à 300 kv). Par conséquent cet arrangement permet aussi de maintenir les champs superficiels des conducteurs à des valeurs admissibles (une valeur de l'ordre de 17 KV/cm).

Le choix du nombre de conducteurs d'une ligne électrique se fait donc en fonction du courant à transiter, des conditions climatiques, des effets de peau Et corona, et bien-sûr des aspects économiques [23], [24], [20].

Un faisceau de conducteur est caractérisé par les grandeurs suivantes :

$$A = 2R \sin \frac{\pi}{n}$$

$$r_{ec} = R^n \sqrt{\frac{nr}{R}}$$



**Figure II.8** Grandeurs caractéristiques d'un faisceau de conducteur.

$r$  : rayon des conducteurs élémentaires (cm).

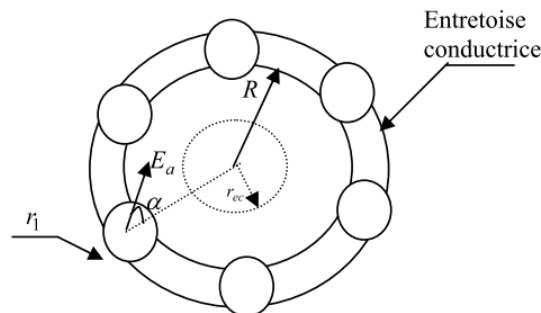
$n$  : nombre de conducteurs élémentaires.

$R$  : rayon géométrique (rayon du cercle passant par les centres de tous les conducteurs) (cm).  $A$  : distance entre deux conducteurs consécutifs (cm).

$r_{ec}$  : rayon équivalent. C'est le rayon d'un conducteur cylindrique unique, fictif, qui aurait les mêmes capacités que le faisceau réel par rapport à tous les autres conducteurs avoisinant (cm).

Théoriquement, le champ à la surface du faisceau est donné de façon approchée :

$$E_\alpha = \left[ 1 - (n-1) \frac{2r_i}{R} \cos \alpha \right] E_m$$



**Figure II.9** Une phase en faisceau.

Avec :

$r_i$  : Rayon des conducteurs élémentaires (cm).

$n$  : Nombre de conducteurs élémentaires du faisceau.

$R$  : Rayon géométrique (rayon du cercle passant par les centres de tous les conducteurs) (cm).

$E_m$  : Valeur moyenne du champ électrique sur le contour du conducteur.

$$E_m = \frac{U}{nr_i \ln \frac{D_e}{r_{ec}}}$$

$U$  : Tension du faisceau contre terre.

$r_{ec}$  : Rayon équivalent de l'ensemble des conducteurs du faisceau.

$D_e$  : Distance équivalente par rapport au sol ( $D_e = 2h$  pour le système conducteur-sol).

Le rayon équivalent de l'ensemble des conducteurs d'un faisceau est défini comme le rayon d'un conducteur unique qui, placé dans les mêmes conditions que le faisceau, aurait la même capacité par rapport au sol et autres conducteurs.

$$r_e = r_i \sqrt[n]{n \left( \frac{R}{2r_i} \right)^{n-1}}$$

Le champ électrique maximum sur le tour d'un conducteur en faisceau est donné par:

$\frac{dE_\alpha}{d\alpha} = 0 \Rightarrow$  Deux solutions :

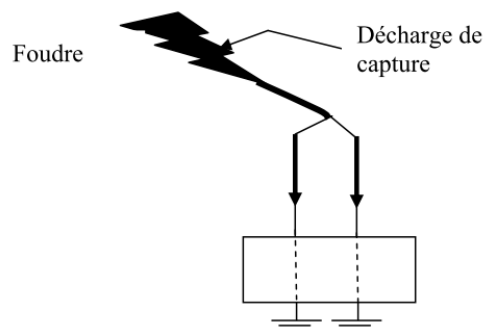
- Maximum pour  $\alpha[2K + 1] \pi$
- Minimum pour  $\alpha = 2K\pi$

$$E_{\alpha \max} = \left[ 1 + (n - 1) \frac{2r_i}{R} \right] E_m$$

## II.8 Applications utilisant la décharge couronne

### II.8.1 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 (Figure II.10).



**Figure II.10** Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre.

### II.8.2 Neutralisation

La surface de l'avion se charge par frottement avec l'air. Les charges créées par effet couronne produites par des flèches disposées sur les ailes de l'avion éliminent par neutralisation les charges surfaciques.

### II.8.3 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 qui les empêche de ressortir. Le cylindre joue le rôle d'un filtre de poussières, lequel une fois saturé sera remplacé par un nouveau filtre (Figure II.11).

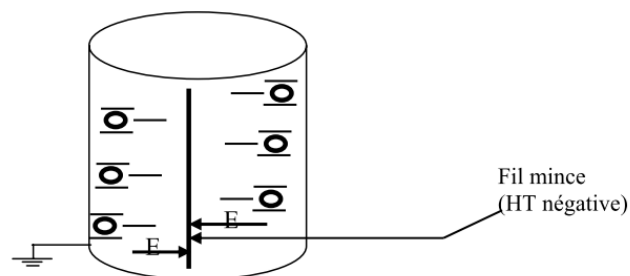


Figure II.11 Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique.

### II.8.4 Séparateur électrostatique

Un mélange de particules granuleuses acquiert des charges électriques créées par effet couronne grâce à une électrode à pointes reliée à une source de haute tension négative. Ces particules se comportent différemment selon qu'elles sont isolantes ou métalliques et tombent dans des endroits différents (Figure II.12).

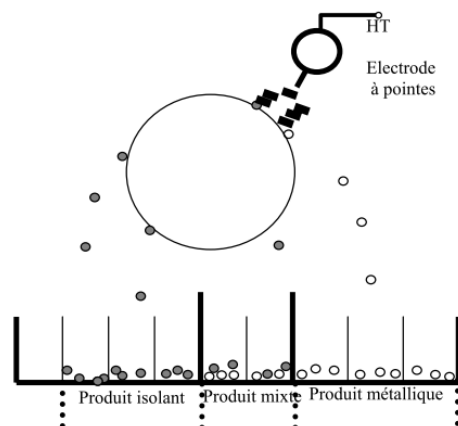


Figure II.12 Utilisation de la décharge couronne la séparation électrostatique.

Les décharges de corona ont de nombreuses autres applications commerciales et industrielles tel que.

- ✓ Production d'ozone.
- ✓ Traitement de surface de certains polymères.
- ✓ Photocopieur.
- ✓ Laser à azote.
- ✓ Refroidissement de composants électroniques (la migration des particules ionisées génère un flux qui expulse l'air chaud)
- ✓ Coloration des véhicules.

## II.9 Avantage de la décharge couronne dans le réseau

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.

## II.10 Conclusion

Nous avons rappelé dans ce chapitre, les différents aspects de l'effet couronne ainsi que le mécanisme de création de la décharge couronne dans le cas d'une décharge positive et négative.

# Chapitre III.

## Claquage dans le gaz SF<sub>6</sub>

### III.1 Introduction

Le SF<sub>6</sub> est largement utilisé dans la technologie moyenne tension et haute tension (disjoncteurs, sous-stations de transformation) depuis 1960. Avec une densité de 4,75 par rapport à l'air.

D'importants progrès ont été réalisés dans l'optimisation des installations au SF<sub>6</sub>, au cours des 40 dernières années. Cela s'est traduit par une forte diminution de la quantité de gaz nécessaire : ainsi, les quantités de SF<sub>6</sub> introduites dans les installations à haute tension (supérieure à 100 kV).

### III.2 Fabrication du SF<sub>6</sub>

Le seul procédé industriel actuellement utilisé est la synthèse de l'hexafluorure de soufre à partir de soufre et de fluor obtenu par électrolyse, selon la réaction exothermique suivante :



Plusieurs fluorures de soufre de valence inférieure sont également produits lors de la réaction, comme SF<sub>4</sub> , SF<sub>2</sub> , S<sub>2</sub>F<sub>2</sub> , S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> ainsi que des impuretés dues à la présence d'humidité, d'air et d'anodes de carbone dans les cellules d'électrolyse du fluor. Ces sous-produits sont éliminés par différents procédés de purification (Figure III.1).

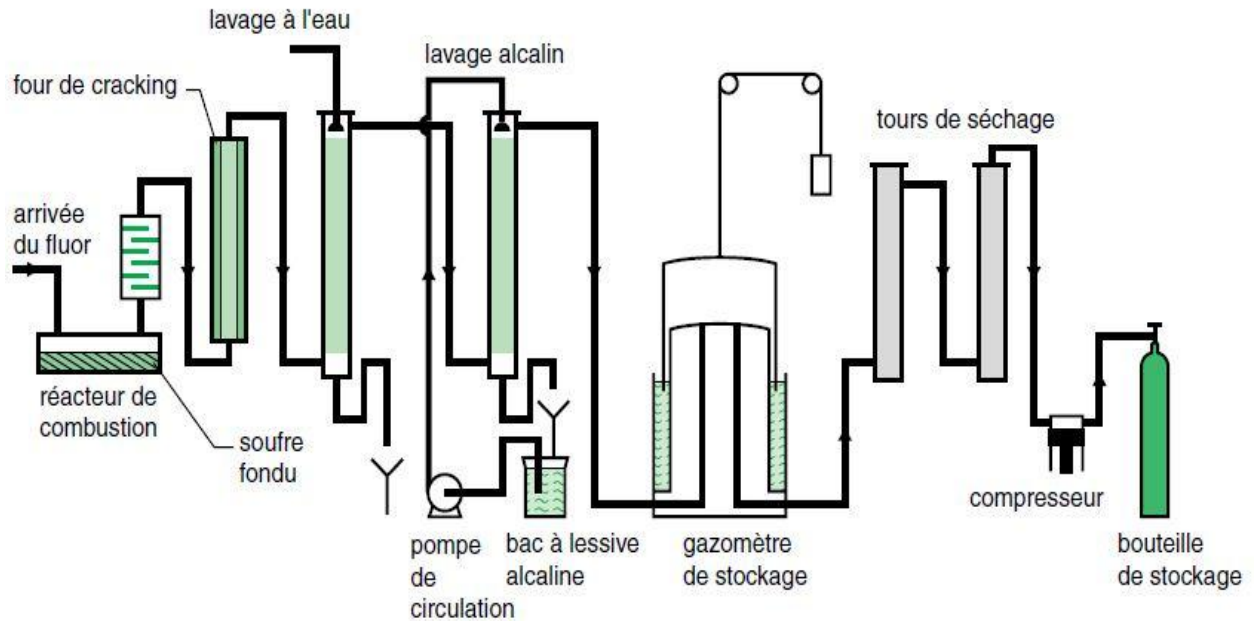


Figure III.1 Schéma de principe de la synthèse du SF<sub>6</sub> par combinaison directe.

### III.3 Propriétés du SF<sub>6</sub>

#### III.3.1 Propriétés chimiques

L'hexafluorure de soufre correspond à la valence maximale du soufre. Sa structure moléculaire est celle d'un octaèdre dont les six sommets sont occupés par des atomes de fluor. La section efficace de collision de la molécule de SF<sub>6</sub> est de 4,77 Å. Les six liaisons sont covalentes, ce qui explique la stabilité exceptionnelle de ce composé :

- le SF<sub>6</sub> peut être chauffé sans décomposition jusqu'à 500 °C en l'absence de métaux catalytiques.
- le SF<sub>6</sub> est ininflammable.
- l'hydrogène, le chlore et l'oxygène sont sans action sur lui.
- le SF<sub>6</sub> est insoluble dans l'eau,
- il n'est pas attaqué par les acides.

L'absence de toxicité du SF<sub>6</sub> à l'état pur est confirmée régulièrement par un test sur les livraisons de gaz neuf, dans lequel des souris sont placées pendant 24 heures dans une atmosphère contenant 80 % de SF<sub>6</sub> et 20 % d'oxygène [24].

### III.3.2 Propriétés physiques

Le SF<sub>6</sub> est l'un des gaz les plus lourds connus (Figure III.2). Sa masse spécifique à 20 °C, sous une pression de 0,1 Mpa (c'est-à-dire une atmosphère), est égale à 6,139 kg/m<sup>3</sup>, soit cinq fois plus que celle de l'air. Sa masse moléculaire est de 146,06. C'est un gaz incolore et inodore. Le SF<sub>6</sub> n'existe à l'état liquide que sous pression.

Densité	6.14 Kg.m <sup>-3</sup>
Connectivité thermique	0.0163 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Point critique <ul style="list-style-type: none"> <li>• Température</li> <li>• Densité</li> <li>• Pression</li> </ul>	45.55°C 730 Kg.m <sup>-3</sup> 3.78 MPa
Vitesse de son	136 m.s <sup>-1</sup>
Indice de réfraction	1.000783
Chaleur de formation	-1221.66 KJ.mol <sup>-1</sup>
Chaleur spécifique	96.6 J.mol <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup>

**Tableau III.1** Caractéristiques physiques principales du SF<sub>6</sub> à la pression atmosphérique, à une température de 25 °C.

Est de 146,06. C'est un gaz incolore et inodore. Le SF<sub>6</sub> n'existe à l'état liquide que sous pression.

#### III.3.2.1 Équation d'état

L'hexafluorure de soufre se comporte comme un gaz parfait jusqu'à une température de 1200 K environ. Son équation d'état est du type Beattie-Bridgeman :

$$pv^2 = RT(v + b) - a$$

Où:

p = pression (Pa)

v = volume (m<sup>3</sup> .mol<sup>-1</sup>)

R = constante du gaz idéal (8,3143 J.mol<sup>-1</sup> .K<sup>-1</sup>)

T = température absolue (K)

a = 15,78 x 10<sup>-6</sup> (1 - 0,1062 x 10<sup>-3</sup> v<sup>-1</sup>)

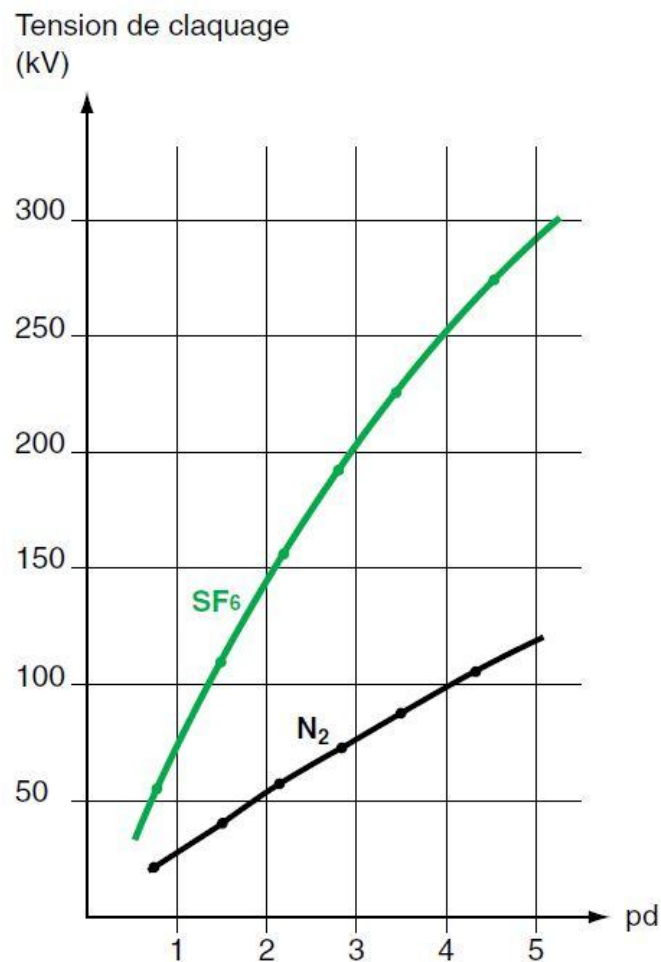
$$b = 0,366 \times 10^{-3} (1 - 0,1236 \times 10^{-3} v^{-1})$$

### III.3.2.2 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique du SF<sub>6</sub> rapportée à l'unité de volume est 3,7 fois plus élevée que celle de l'air. Ceci a des conséquences importantes pour la réduction des échauffements au sein de l'appareillage électrique.

### III.3.2.3 Caractéristiques électriques:

Les excellentes propriétés diélectriques du SF<sub>6</sub> sont dues au caractère électronégatif de la molécule qui possède une tendance marquée à capturer les électrons libres pour former des ions lourds et peu mobiles, ce qui rend difficile le développement d'une avalanche électronique. La rigidité diélectrique du SF<sub>6</sub> est 2,5 fois plus élevée que celle de l'air dans les mêmes conditions.

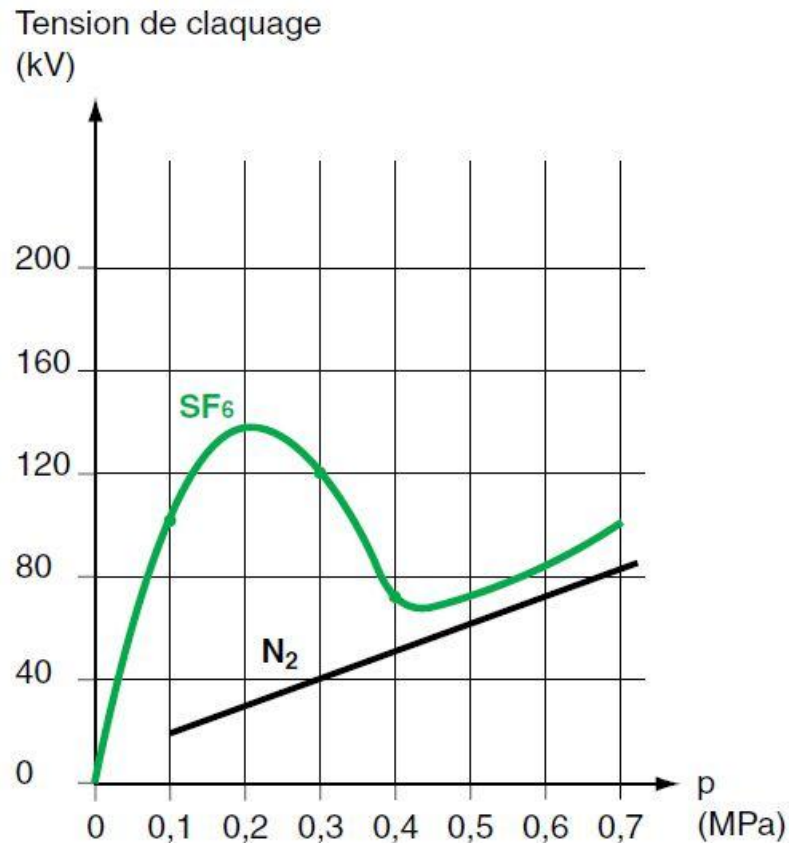


**Figure III.2** Tension de claquage entre des sphères de 5 cm de diamètre en fonction du produit pd.

Produit  $pd$ :

$p$  : pression (MPa)

$d$  : distance des électrodes ( $10^{-3}$  m)



**Figure III.3** Tension de claquage en fonction de la pression pour un champ non uniforme.

La courbe (Figure III.2) illustre clairement l'avantage du SF<sub>6</sub> sur l'azote comme diélectrique. Pour les champs non uniformes (Figure III.3), on observe une tension de claquage maximale pour une pression voisine de 0,2 MPa.

### III.3.3 Rigidité diélectrique

La « rigidité diélectrique » d'un gaz est la capacité de ce dernier à résister à une tension élevée. Ainsi, pour un gaz à une pression donnée, il existe une valeur de la tension, dite tension disruptive, au-dessous de laquelle le gaz reste isolant et au-dessus de laquelle il devient conducteur. Pour tester la rigidité diélectrique d'un gaz, on le place entre deux conducteurs séparés d'une petite distance (par exemple: deux sphères conductrices identiques peu écartées formant un spintermètre). On fixe la pression et on augmente progressivement la tension dans le dispositif. On constate

que, pour une tension donnée, le gaz passe de l'état isolant à celui de conducteur et un courant circule entre les deux éléments conducteurs formant le système. Plus cette tension de claquage est élevée et plus le gaz en question est un bon diélectrique. La rigidité diélectrique du SF<sub>6</sub> est 2 à 3 fois supérieure à celle de l'air à pression identique ceci étant dû à sa forte aptitude à capter des électrons; de plus, sa section efficace élevée (de l'ordre de la dimension de la molécule) permet de ralentir par collision les quelques électrons libres subsistant dans le gaz ce qui va les empêcher d'être trop rapidement accélérés sous l'action du champ électrique et va ainsi retarder la formation des électrons libre de la décharge. La bonne rigidité diélectrique du SF<sub>6</sub> gazeux peut donc s'expliquer par ses multiples possibilités d'arrêt des électrons énergétiques ainsi que par sa faculté de les fixer à basse énergie en formant des ions lourds retardant l'apparition du claquage.

### III.4 Sources des électrons libres

Nous allons maintenant présenter les différentes sources possibles des électrons-germes qui sont nécessaires à l'amorçage de l'avalanche primaire:

- Rayonnements cosmiques ou radioactivité naturelle.
- Contribution de la cathode.
- Détachement collisionnel à partir des ions négatifs.

### III.5 Les claquages: initiation et développement

Lorsqu'un gaz est soumis à un champ électrique élevé, les électrons qui sont émis à partir de la cathode ou par une ionisation externe seront susceptibles d'initier la formation d'une ou plusieurs avalanches électroniques. Ces avalanches constituent la première étape d'un claquage.

Trois théories ont été développées pour expliquer comment et dans quelles conditions à partir de ces avalanches, le claquage pouvait se produire :

- celle de TOWNSEND qui ne prend pas en compte les effets de charge d'espace est mal adaptée au cas des gaz électronégatifs, des pressions élevées et des champs non homogènes [26],
- la théorie des « streamers » dans laquelle le claquage résulte d'une superposition de trois phénomènes :
  - l'ionisation telle qu'elle est décrite dans la théorie de Townsend.

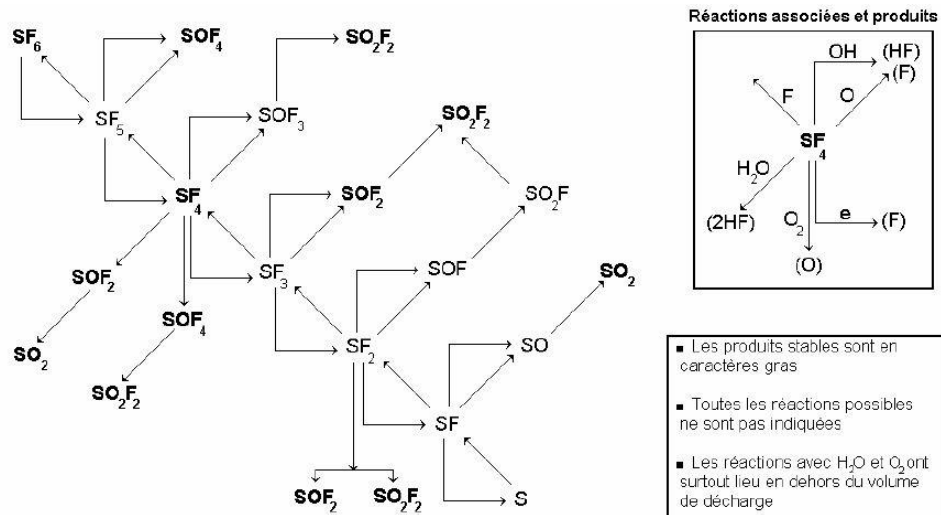
- les effets de charge d'espace.
- la photo-ionisation dans le gaz qui entraîne la production d'électrons libre

à l'avant du front de l'onde d'ionisation, assurant ainsi sa propagation.

Ces deux théories décrivent la formation d'un claquage dit « direct » mais dès lors que les intervalles de SF<sub>6</sub> étudiés correspondent à un fort produit pression-distance et que la tension appliquée est impulsionnelle on doit introduire un autre mécanisme de rupture diélectrique du gaz qui fait intervenir un nouveau type de décharge appelé leader qui en atteignant la cathode, génère un claquage dit «différé ». La décharge de type leader est clairement discontinue et se développe, à partir de l'électrode active (pointe), par des étapes successives selon une séquence de type : couronne – précurseur leader- pas de leader – nouvelle couronne – etc.

### III.6 Mécanismes de décomposition de SF<sub>6</sub>

Un claquage est une contrainte électrique violente caractérisée par un courant de forte intensité et une température élevée ce qui conduit à un échauffement du gaz et à la vaporisation partielle des électrodes entraînant leur dégradation. Ce sont les processus de dissociation thermique qui prédominent alors que les mécanismes collisionnels molécule-électron prévalent dans une décharge couronne. L'énergie dissipée pendant le claquage est susceptible de dissocier toutes les molécules de SF<sub>6</sub> présentes dans un petit volume. A la fin d'un claquage, les atomes se recombinent pour former des molécules de fluorures de soufre: SF<sub>6</sub>, SF<sub>4</sub>, SF<sub>2</sub>, parmi lesquelles la molécule de SF<sub>6</sub> est la plus stable (le SF<sub>6</sub> représente au moins 97% des composés formés). La figure III.4 illustre le processus de reformation du SF<sub>6</sub> après un claquage.



**Figure III.4** Schéma réactionnel de reformation du SF<sub>6</sub> soumis à des claquages [27], [28], [29].

Ce schéma réactionnel montre bien que le taux de formation de SF<sub>4</sub> (produit de décomposition majoritaire lors d'un claquage) dépend de la manière dont le fluor est éliminé par l'intermédiaire de réactions avec des métaux ou isolants organiques situés au voisinage immédiat de la décharge. Il en résulte que le taux de (SF<sub>4</sub>+SOF<sub>2</sub>) et des autres sous-produits dépend fortement des matériaux constituant les électrodes et l'isolant et de leur réactivité vis à vis du fluor dans les conditions qui règnent pendant ou juste après le claquage [30].

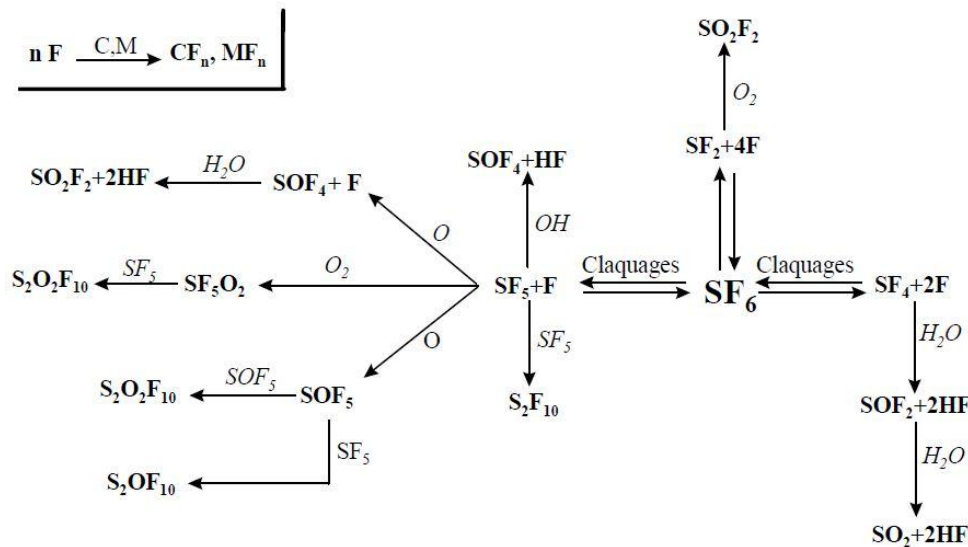
Les principaux produits de décomposition gazeux stables oxysoffrés et oxyfluorés sont le (SF<sub>4</sub>+SOF<sub>2</sub>), le SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> et le SO<sub>2</sub>. La quantité de (SF<sub>4</sub>+SOF<sub>2</sub>) dépasse de loin celle de SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36]. S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>, pour sa part, est formé à partir de 2 fragments SF<sub>5</sub> : il nous intéresse au premier plan à cause de sa grande toxicité mais comme il se décompose totalement au-dessus de 200°C, il est peu vraisemblable qu'il puisse se former en quantités importantes dans le cas des arcs sauf éventuellement dans les zones les plus froides [37]. Par ailleurs les fragments SF<sub>5</sub> interviennent aussi dans des réactions d'oxydation conduisant à la formation de S<sub>2</sub>OF<sub>10</sub> et le SO<sub>2</sub>F<sub>10</sub> qui sont également étudiés. [38, 39, 40]

La présence d'oxygène, d'eau et des vapeurs métalliques qui résultent de l'échauffement des électrodes modifie le processus de recombinaison et par suite la composition de la phase gazeuse, comme le montre la figure III. 5, établie à partir de travaux antérieurs effectués dans notre groupe, dans laquelle sont présentées les

réactions entre H<sub>2</sub>O, OH, O<sub>2</sub>, O, C et M (atomes métalliques) et les fragments SF<sub>x</sub> non recombinaés. Les travaux [27, 42] sur l'influence de O<sub>2</sub> et de HO sur la décomposition de SF<sub>6</sub> (P<sub>SF<sub>6</sub></sub>=200 kPa) soumis à des claquages de haute énergie ont, en particulier, mis en évidence les points suivants :

- une diminution des taux de S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>, de (SF<sub>4</sub>+SOF<sub>2</sub>) et une augmentation de ceux de S<sub>2</sub>OF<sub>10</sub>, S<sub>2</sub>O<sub>2</sub>F<sub>10</sub>, SOF<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> lors de l'ajout de dioxygène (de 0 à 1%) au SF<sub>6</sub> pur,
- une augmentation de la concentration de SOF<sub>4</sub> et de S<sub>2</sub>OF<sub>10</sub> au détriment de celle du S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> lorsque de l'eau est rajoutée (de 0 à 0,2%) au SF<sub>6</sub> pur,
- une stabilité des taux de S<sub>2</sub>O<sub>2</sub>F<sub>10</sub> et de SO<sub>3</sub>F<sub>6</sub> qui restent, quant à eux,

pratiquement identiques et ce, quelle que soit la quantité d'eau présente dans le plasma de SF<sub>6</sub>. Ces tendances sont en accord avec les réactions de formation de chaque composé telle qu'elles apparaissent dans la figure III.5.



**Figure III.5** Schéma réactionnel de formation des principaux sous-produits de décomposition gazeux du SF<sub>6</sub> soumis à des claquages [30, 42, 43, 44, 45, 26].

### III.7 Conclusion

L'adoption du SF<sub>6</sub> dans les appareils électrotechniques, tant pour l'isolation que pour la coupure, a permis d'améliorer leurs performances et leur fiabilité tout en réduisant leur encombrement, leur poids et leur coût global. Le coût total de possession, qui inclut les frais de maintenance, peut être bien plus bas qu'avec les

anciens types d'appareils. Par exemple, dans le cas des disjoncteurs MT, EDF a réduit le temps de maintenance cumulée total pendant la durée de vie d'un disjoncteur de 350 heures à 30 heures.

L'expérience accumulée en service confirme que l'utilisation du SF<sub>6</sub> ne présente aucun risque pour les personnes ou l'environnement aussi longtemps que les méthodes de travail adéquates sont employées.

# Conclusion générale

Les gaz constituent un des éléments de base de l'isolation à haute tension des matériels électriques.

De tout temps, les bonnes qualités isolantes de l'air ont été utilisées aussi bien dans les applications de l'électricité statique que dans l'isolation des lignes aériennes.

Dans ces dernières décennies, la nécessité de diminuer sensiblement les dimensions des installations électriques pour des questions d'encombrement et de coût a conduit à recourir à d'autres gaz isolants tels que l'azote, le CO<sub>2</sub>, le fréon et surtout l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>).

Parallèlement, malgré des difficultés pratiques importantes, on a utilisé les bonnes caractéristiques isolantes du haut vide ( $10^{-5} - 10^{-7}$  mmHg) dans la technique de coupure (disjoncteurs, relais Reed).

Le comportement des isolants gazeux en haute tension doit être étudié dans deux buts:

- Eviter le développement d'arcs, ou si cela n'est pas possible, limiter ses effets (distances d'isolement, cornes et raquettes d'amorçage en parallèle avec des chaînes ou des fûts d'isolateurs, interrupteurs, disjoncteurs, fusibles, etc.);
- Connaître la physique des amorçages d'arc dans les gaz afin de faciliter leur amorçage dans les applications particulières (éclateurs d'amorçage de générateurs de choc, éclateurs de protection, para surtensions, parafoudres, tubes fluorescents, soudure électrique, électroérosion, etc.).

# Bibliographes

- [01] A. Tilmatine, « Techniques de haute tension ». Sypporet de cours, Université DJILLALI LIABES, 2010.
- [02] J.S, Townsend, « Electricity in gases », Oxford University Press, 1914.
- [03] R. Farhi, C. Morel, G. Chéron «Matières plastiques & adjuvant hygiène et sécurité». INRS, ED638, Octobre 2006.
- [04] Saad Djedjiga « Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques ». Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, Avril 2011.
- [05] Zibin. LU «Etude des mécanismes de dégradation de polymères par décharges électriques de type filamentaire». Thèse de doctorat de l'université PARIS VI, décembre 1991.
- [06] J. Koller, V. Krcha, J. Pechal, L. Aubrecht «Corona discharge light emission et electric field intensity comparison». Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 54, 2004.
- [07] Junhong. Chen ET Jane H. Davidson «Model of the Negative DC Corona Plasma: Comparison to the Positive DC Corona Plasma». Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 23, No. 1, Mars 2003 .
- [08] Yall B.SC.A «Contribution à l'étude de l'influence des décharges de couronne sur la perte de volume d'une aspérité de glace portée à un potentiel élevé». Thèse pour l'obtention du grade de maitrise en ressources et systèmes. Université de Québec à Chicoutimi. Avril 1993.
- [09] Issouf. FOFANA «Modélisation de la décharge positive dans les grandes intervalles d'air». Thèse de doctorat, L'école centrale de Lyon novembre 1996 .
- [10] Lacoste A, Pai D, Laux C., 2004, «Ion wind effect in a positive DC corona discharge inatmospheric pressure air», AIAA Paper n°2004-0354, Reno .
- [11] Loiseau J.F., Batina J, Noël F, Peyrous R., 2002, «Hydrodynamical simulation of the electric wind generated by successive streamers in a point-to-plane reactor», J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 35, pp. 1020-1031 .
- [12] Goldman M, Goldman A, Sigmond R.S, 1985, «The corona discharge, its properties and specific uses», Pure and Appl. Chem. 57, n°9, p. 1353-1362.

- [13] Goldman M, Sigmond R.S, 1982, «Corona insulation, IEEE Trans». Elec. Ins, EI. 17/2, pp. 90-105.
- [14] Rezzouga M, Tilmatine A, Gouri R, Medles K, Dascalescu L «Experimental modiling of high-voltage corona discharge using design of experiments». Front. Electr. Electron. Eng, 2(2): 139-143. China 2007.
- [15] M.P. Panaget « Etude en laboratoire des effets physico-chimique induits par les pertes électriques des lignes de transport à haute tension». Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie 1997.
- [16] Acte de la deuxième conférence nationale sur la haute tension, université de Tizi-Ouzou 1997 .
- [17] C.Gary; «Effet couronne sur les réseaux électriques aériens»: Techniques de l'ingénieur, D4440 .
- [18] G.N Adelsandrov, G.M Rigeikov. O.V Cherbatchev «Modélisation de la caractéristique de couronne de courant alternatif» Recueil de l'institut polytechnique de Saint Petersburg, la série de la technique de la haute tension. 1958 .
- [19] Flavien. Koliatene «Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III – Paul Sabatier, le 5 janvier 2009.
- [20] C.Gary; «Effet couronne en tension alternative»: Techniques de l'ingénieur, Tome 1 D640 .
- [21] V.M. Blok « réseaux électriques », Moskou, Bischaya Chkola, 1986.
- [22] G.N Alelsandrov, « les décharges de couronne dans les lignes de transport d'énergie », 1964.
- [23] Gueller-B Veverka-A « Les processus impulsionnels dans les machines électriques »,ENERGUIYA ,Moscou,1976.
- [24] M. Aguet et M. Lanoz «Traité d'électricité : Haute Tension», vol XXII 2ème édition 2004 .
- [25] CEI 60376 : Spécifications et réception de l'hexafluorure de soufre neuf (Complément A-1973) (Complément B-1974).
- [26] A. Pedersen « Criteria for spark breakdown in sulfur haxafluoride ». IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-80, pp. 2043-2048, (1970).

- [27] H.D. Morrison et F.Y. Chu. « SF<sub>6</sub> decomposition ». Rapport ORNL/m-4314, pp.3-6, (1995).
- [28] I.Sauers « By-product formation in spark breakdown of SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> ». Chem. Plasma Proc. , 8, pp. 247-263, (1988).
- [29] R.J. Van Brunt et M. Misakian « Mechanisms for dc and 60 Hz ac corona in SF<sub>6</sub> ». IEEE Trans. Electr. Insul., 17, pp. 106-119, (1982).
- [30] B. Belmadani « Etude de la décomposition de l'hexafluorure de soufre dans un arc de puissance », Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, (1989).
- [31] F.Y. Chu « SF<sub>6</sub> decomposition in Gas-Insulated Equipment ». I.E.E.E. Trans. Electr. Insul., EI-21, pp. 693-725, (1986).
- [32] A. Derdouri « Etude de la décomposition de l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) humide sous l'effet de décharges couronne ou de claquages ». Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, (1988).
- [33] M. Piemontesi et W. Zaengl « Analysis of decomposition products of sulfur hexafluoride by spark discharges at different spark energies ». 9th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Graz, Austria, 28 août - 1 sept., (1995).
- [34] C.Pradayrol « Comparaison de la décomposition de l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) pur et de mélanges de 50% d'hexafluorure de soufre et de 50% de tétrafluorométhane (CF<sub>4</sub>) sous l'effet de décharges couronne et de claquages. Influence de O<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>O ». Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, (1996).
- [35] W. Rügsegger, R. Meier, F.K. Kneubühl et H.J. Schtzaü « Mass spectrometry of arcs in SF<sub>6</sub> circuits breakers ». Appl. Phys. B, 37, pp. 115-135, (1985).
- [36] I. Sauers, H.W. Ellis, L.G. Christophorou, G.D. Griffin et C.E. Easterly Oak Ridge National Laboratory Report. ORNL/TM-9062, (1984).
- [37] H.D. Morrison, F.Y. Chu, M. Eygenraam, I. Sauers et R.J. Van Brunt. «Decomposition of SF<sub>6</sub> and production of S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> in power arcs. ». 7th Int. Symp. on Gaseous Dielectrics, Knoxville, 24-28 Avril, (1994).
- [38] M. Piemontesi et L. Niemeyer « Generation and decay of S<sub>2</sub>O<sub>2</sub>F<sub>10</sub> in SF<sub>6</sub> insulation ». 9th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Graz, Austria, pp. 2284-1-2284-4, 28 août - 1 sept., (1995).
- [39] I.Sauers « Effect of water on the production of S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> and S<sub>2</sub>OF<sub>10</sub> by spark discharges in SF<sub>6</sub> ». 11th International Conference in Gas Discharges and their Applications, Tokyo, pp. 320-323, 11-15 sept., (1995).

- [40] R.J. Van Brunt, J.K. Olthoff, S.L. Firebaugh et I. Sauers « Production of  $S_2F_{10}$ ,  $S_2OF_{10}$  and  $S_2O_2F_{10}$  from Spark and Negative-Corona Discharges in  $SF_6$  and  $SF_6/O_2$  Gas Mixtures ». Trans. I.E.E. of Japan A, 116-A, pp. 1014-1024, (1996).
- [41] C. Pradayrol, A.M. Casanovas, A. Hernoune et J. Casanovas « Spark decomposition of  $SF_6$  and  $SF_6+50\% CF_4$  mixtures ». J.Phys.D. :Appl.Phys., 29, pp. 1941-1951, (1996).
- [42] B. Belmadani, J. Casanovas, A.M. Casanovas, R. Grob et J. Mathieu «  $SF_6$  decomposition under power arcs. I- Physical aspects ». I.E.E.E. Trans. Electr. Insul., 26, p. 1163, (1991).
- [43] B. Belmadani, J. Casanovas et A.M. Casanovas «  $SF_6$  decomposition under power arcs. II- Chemical aspects ». I.E.E.E. Trans. Electr. Insul., 26, p. 1177, (1991).
- [44] A. Derdouri « Etude de la décomposition de l'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ) humide sous l'effet de décharges couronne ou de claquages ». Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, (1988).
- [45] A. Derdouri, J. Casanovas, R. Grob et J. Mathieu « Spark decomposition of  $SF_6/H_2O$  mixtures ». I.E.E.E. Trans. Electr. Insul., 24, pp. 1147-1157, (1989).