

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 8 Mai 1945 – Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf: ...../2018



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Académique**

**Domaine:** Sciences et Technologie

**Filière:** Electrotechnique

**Spécialité:** Réseaux électriques

**Par:** SAYOUD Toufik et ZAIDI Ramzi

## Thème

**Etude des décharges électriques produites dans les isolants gazeux et solides**

Soutenu publiquement, le 24 Juin 2018, devant le jury composé de:

M. LEMZADMI Ahcène	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. BELOUCIF Faissel	MCB	Univ. Guelma	Encadreur
M. BOUDEFEL Amar	MCA	Univ. Guelma	Examinateur
M. REMADNIA Mokdad	MCA	Univ. Guelma	Examinateur

**Année Universitaire: 2017/2018**

18/3799

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui me sont chères ou monde .*

*A ma très chère mère que j'adore énormément*

*A mon père pour son sacrifice et dévouement*

*A mes frères Mohamed, Hichem, Noureddine, Salim, Sohiabe, et les femmes des  
mais frères (Radia, Nadia, Khaoila, Razika)*

*A mes très chères sœurs , Rafika*

*A ma femme Nassima que j'aime très fort*

*Aux étudiants de la promotion 2018,*

*A mes amis, amies*

*A ma grande mère wanassa que j'adore énormément*

*A mes oncles Khamisi et sa femme Laalia et Tahar et sa femme, Jadida, Ammar et  
sa femme Rebiha et Jaroia.*

*A Wahab Kaaba Wahda*

*A mes enfants Jalil, Kosai , Sayfe et Hamza.*

*Toufik*

## *Dédicaces*

*Jo dódio oo modesto travail à ceux qui sont chères pour moi .*

*A Mes parant qui j'adore énormément pour son sacrifice et dévouement*

*A ma femme pour leur encouragement*

*Ramzi*



## *Remerciements*

*L'aide des grands hommes nous permet de réaliser toute les choses quelque soient leurs grandeurs.*

*Il est notre devoir de remercier vivement et chaleureusement toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin dans notre travail en particulier notre encadreur le docteur Beloucif Faissel pour sa très grande rigueur scientifique, ses conseils, ses encouragements et sa bonne patience.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos enseignants du département Génie électrotechnique et Automatique.*

## Sommaire

---

<i>Introduction générale</i> .....	- 2 -
<i>Chapitre I : Caractérisation de quelques gaz utilisés en isolation électrique</i>	
I.1. Introduction.....	- 5 -
I.2. L'air.....	- 5 -
I.2.1. Composition de l'air.....	- 5 -
I.2.2. Le rôle de l'atmosphère .....	- 5 -
I.2.3. Quelques propriétés de l'air .....	- 6 -
I.2.3.1. Volume et pression de l'air .....	- 6 -
I.2.3.2. L'air est compressible et expansible .....	- 6 -
I.2.3.3. La masse de l'air.....	- 6 -
I.2.3.4. Propriétés diélectriques de l'air .....	- 6 -
I.3. L'azote $N_2$ .....	- 7 -
I.3.1. Constitution de l'atome.....	- 7 -
I.3.2. Propriétés physicochimiques.....	- 8 -
I.3.3. Propriétés diélectriques.....	- 8 -
I.4. Dioxyde de carbone $CO_2$ .....	- 9 -
I.4.1. Constitution de l'atome.....	- 9 -
I.4.2. Propriétés physicochimiques.....	- 9 -
I.4.3. Propriétés diélectriques.....	- 10 -
I.5. L'hexafluorure de soufre $SF_6$ .....	- 10 -
I.5.1. Introduction.....	- 10 -
I.5.2. Propriétés physicochimiques.....	- 11 -
I.5.3. Propriétés diélectriques.....	- 12 -
I.5.4. Rigidité diélectrique .....	- 13 -
I.5.5. Pureté .....	- 13 -
I.5.6. Effet de serre.....	- 14 -
I.6. Trifluoroiodomethane $CF_3I$ .....	- 15 -
I.6.1. Propriétés physicochimiques.....	- 15 -
I.6.2. Propriétés Diélectriques.....	- 16 -
I.7. Conclusion .....	- 17 -
<i>Chapitre II : Propriétés et utilisation des isolants solides</i>	
II.1. Introduction .....	- 19 -
II.2. Classification des isolants solides utilisés en isolation électrique .....	- 19 -
II.2.1. Isolants naturels.....	- 19 -
II.2.1.1. Minéraux.....	- 19 -

## *Sommaire*

---

II.2.1.1.1. Verre .....	- 19 -
a)Application.....	- 19 -
b)Caractéristiques.....	- 20 -
II.2.1.1.2. Céramique .....	- 21 -
a)Préparation .....	- 21 -
b)Type de céramiques.....	- 21 -
c)Propriétés des céramiques.....	- 22 -
II.2.1.1.3. Mica .....	- 22 -
II.2.1.2.Organiques.....	- 22 -
II.2.1.2.1. Papiers.....	- 22 -
II.2.1.2.2. Textiles .....	- 22 -
II.2.1.2.3. Caoutchouc.....	- 23 -
II.2.2.Isolants Synthétiques .....	- 24 -
II.2.2.1. Nature.....	- 24 -
II.2.2.2. Fabrication.....	- 24 -
II.2.2.3. Caractéristiques.....	- 24 -
II.3. Permittivité relative .....	- 24 -
II.4. Polarisation des isolants solides .....	- 26 -
II.4.1.1. Polarisation électronique et ionique.....	- 27 -
II.4.1.2. Polarisation dipolaire.....	- 28 -
II.4.1.3. Polarisation interfaciale.....	- 28 -
II.4.1.4. Polarisation par charges d'espaces.....	- 28 -
II.5. Conclusion .....	- 29 -
 <b><i>Chapitre III : Modélisation des phénomènes de claquage en isolation électrique</i></b>	
III.1. Introduction .....	- 31 -
III.2. Claquage dans les diélectriques gazeux .....	- 31 -
III.2.1. État du gaz.....	- 31 -
III.2.2. L'avalanche électronique.....	- 31 -
III.2.3. Initiation de la décharge électrique.....	- 32 -
III.2.3.1. Émission photoélectrique .....	- 32 -
III.2.3.2. Émission des ions positifs et négatifs.....	- 34 -
III.2.3.3. Émission thermo-ionique.....	- 35 -
III.2.4. Caractéristique courant – tension.....	- 36 -
III.2.5. Claquage de Townsend.....	- 37 -
III.2.6. Critère de claquage de Townsend.....	- 38 -

## *Sommaire*

---

III.2.7. Tension de claquage.....	- 39 -
III.3. Claquage des isolants solides .....	- 42 -
III.3.1 : Introduction.....	- 42 -
III.3.2.Claquage électrique .....	- 43 -
III.3.2.1. Claquage électrique intrinsèque.....	- 43 -
III.3.2.2.Claquage électrique par avalanches.....	- 44 -
III.3.3.Claquage thermique.....	- 45 -
III.3.4. Claquage électromécanique.....	- 47 -
III.3.5. Claquage par Décharges partielles.....	- 49 -
III.3.6. Conclusion.....	- 49 -
<i>Conclusion générale</i> .....	- 51 -
<i>Références bibliographiques</i> .....	- 53 -

# *Introduction Générale*



### **Introduction générale**

Les isolants mixtes solides et gaz sont appliqués dans de nombreuses applications, en particulier les appareillages à haute et moyenne tensions comme les transformateurs, les condensateurs de puissance, les disjoncteurs et les câbles ainsi que dans les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. Cette structure solide –gaz est largement utilisée dans certains éléments du système énergétique, comme les disjoncteurs isolés au gaz (GIS), ou les câbles de transport de grande puissance (GIL).

Les isolants solides sont utilisés comme enveloppe de l'appareil et comme support (buse) pour les électrodes (contacts); le gaz est utilisé pour ses propriétés isolantes et pour le refroidissement en présence de l'arc électrique. Dans le cas des transformateurs de puissance, en plus de l'isolation des bobinages et des traversées, les isolants solides servent comme panneaux et barrière isolante.

Cette large application des isolants solides et gazeux pour assurer un ensemble de fonctions : isolation électrique, refroidissement, extinction de l'arc, élimination des décharges partielles, cependant ces isolants ne peuvent fonctionner sans être dégradés sous l'action de plusieurs phénomènes provoquant des conceptions électriques et des pertes d'énergie, ce qui se traduit généralement par une naissance de décharges électriques déformantes de cette structure isolante ainsi qu'une élévation de la température de leurs parties constituantes.

Les équipements électriques et donc les structures isolantes mixtes qui y sont intégrées, sont exposés à différents types de contraintes : mécanique, thermique, électrique, chimique et environnementales. Ils doivent donc posséder des propriétés électriques, physiques et chimiques spécifiques ainsi qu'une toxicité vis-à-vis des personnes et de l'environnement la plus faible possible.

Dans cette étude, nous nous intéressons aux contraintes électriques. L'application d'un champ électrique suffisamment élevé à un environnement solide ou gaz peut avoir divers phénomènes résultent d'un claquage complet ou partiel, à cause de développement des décharges volumiques ou surfaciques, conduisant ainsi la rupture diélectrique et la destruction de la structure isolante voire à la mise hors service du système énergétique.

Dans ce contexte nous présentons dans les deux premiers chapitres un ensemble des isolants solide et gazeux en étudiant leurs propriétés physicochimiques et diélectriques pour savoir toutes



## *Introduction Générale*

---

les caractéristiques fondamentales permettant de bonne conception et dimensionnement des appareillages utilisés en moyenne et haute tension.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des phénomènes de développement des décharges électriques ainsi que les mécanismes de claquage provoquant le vieillissement et la dégradation de cette structure isolante.

# *Chapitre I*

*Caractérisation de quelques gaz utilisés en  
isolation électrique*

### I.1. Introduction

Le gaz le plus utilisé de tout temps dans les applications à basse tension est l'air. Cependant, pour une isolation électrique (lignes aériennes, disjoncteurs, électrodes, etc.), d'autres gaz tels que l'azote ( $N_2$ ), le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et le hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ) connaissent, depuis 1950, un succès grandissant dans le domaine des postes blindés, câbles à isolation gazeuse, ...). Leur utilisation a permis d'améliorer la fiabilité des systèmes et d'en réduire leurs poids et dimensions.

L'azote et l'air possèdent les champs de décomposition les plus élevés de tous les gaz naturels. Dans des conditions standard dans un champ homogène, on peut s'attendre à un champ de claquage d'environ 30 kV/cm. La résistance électrique dépend également de la géométrie des électrodes.

### I.2. L'air

#### I.2.1. Composition de l'air

L'air sec au voisinage du sol est un mélange gazeux homogène. Il est approximativement composé en fraction molaire ou en volume de 80% de molécules de diazote et 20% de molécule de dioxygène, il contient aussi des traces de quelques autres gaz (l'argon, néon, krypton...), il est composé pour 5 molécules de l'air de :

- 4 molécules de diazote
- 1 molécule de dioxygène

#### I.2.2. Le rôle de l'atmosphère

L'atmosphère contient 2 gaz essentiels à la vie :

- le dioxygène qui permet la respiration des animaux
  - le dioxyde de carbone qui permet aux végétaux de se développer à l'aide de la lumière du soleil et de l'eau.
- L'atmosphère nous protège des rayons ultraviolets du Soleil grâce à la couche d'ozone située vers 25km d'altitude.
  - L'atmosphère maintient une température à la surface du globe favorable à la vie (15°C en moyenne) par l'effet de serre.

### **I.2.3. Quelques propriétés de l'air**

#### **I.2.3.1. Volume et pression de l'air**

- Le volume d'un gaz mesure l'espace qu'il occupe. Comme un gaz n'a pas de volume propre, son volume est celui du récipient qui le contient. unité de mesure : le mètre cube (m<sup>3</sup>) ou le litre (L).
- Les particules d'un gaz sont toujours en mouvement : il y a des chocs entre les particules du gaz et les objets qu'elles rencontrent ; On dit que le gaz exerce une pression sur ces objets.

la pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer dépend essentiellement de la masse de l'atmosphère, celle-ci pouvant évoluer avec la masse moyenne des gaz à concentration variable comme la vapeur d'eau. Elle varie autour de l'atmosphère normale, soit 101,325 kPa. La pression d'un gaz se mesure soit en Pascal (Pa) soit en bar ou le bar (1 bar = 101,3 kPa).

#### **I.2.3.2. L'air est compressible et expansible**

Lorsque l'on comprime l'air, l'espace vide entre les molécules diminue donc le volume occupé par le gaz diminue. Les chocs particules/parois sont plus fréquents et la pression du gaz augmente. On dit que l'air est compressible.

A l'inverse, si on augmente le volume occupé par un gaz, l'espace vide entre les particules augmente. Les chocs particules/parois sont moins fréquents et la pression du gaz diminue. On dit que le gaz est expansible.

Un gaz enfermé dans une enceinte a toujours tendance à reprendre son volume et sa pression initiale. On dit que le gaz est élastique.

#### **I.2.3.3. La masse de l'air**

L'air est constitué de particules comme toutes les matières. Il a donc une masse et à 25°C et à la pression atmosphérique normale, la masse d'un litre d'air est voisine de 1,2g.

#### **I.2.3.4. Propriétés diélectriques de l'air**

Un gaz contient toujours un certain nombre de particules chargées. Celles-ci proviennent principalement des cascades d'électrons et d'ions résultant du rayonnement cosmique dans l'air par exemple, au niveau du sol, elle est d'environ une dizaine de paires d'ions par centimètre cube et par seconde. Par suite de la présence en permanence de ces particules chargées, l'application



d'une tension, même très faible (de l'ordre du microvolt), aux bornes d'électrodes plongées dans le gaz se traduit par l'apparition d'un courant dans le circuit extérieur consécutif au déplacement des charges à l'intérieur du gaz.

L'air présente une permittivité proche de celle du vide  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ , il est un isolant fort. Mais sous de fortes tensions, les électrons qui composent les atomes des molécules de l'air sont littéralement arrachés à leur orbite de valence pour participer à la conduction électrique. La valeur du champ disruptif de l'air est alors  $E = 30 \text{ kV/cm}$  dans les conditions normales atmosphériques Fig. I.1. [1]

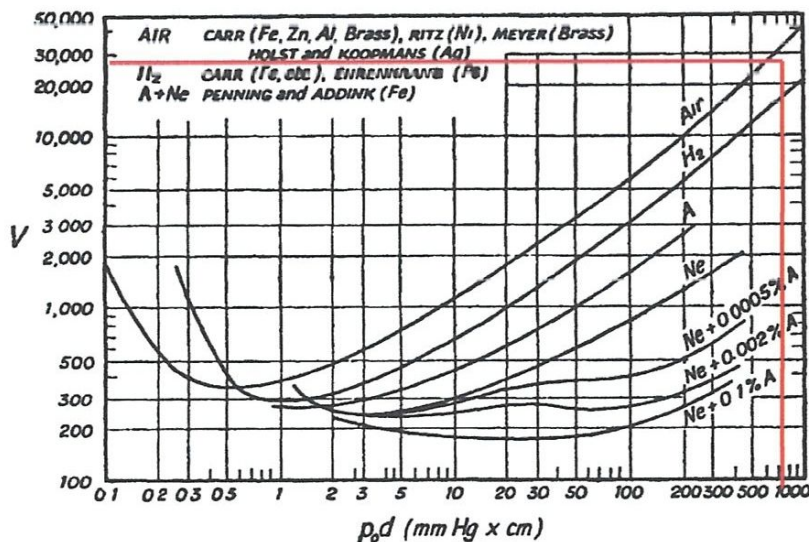


Figure I.1. Tracé de tension de claquage pour quelques gaz en fonction du produit  $pd$  [2].

Pour l'air dont le champ électrique réduit est de l'ordre de  $E/P = 44-178 \text{ (V/cm.torr)}$ , le premier coefficient de Townsend peut s'exprimer par la relation suivante.

$$\alpha = 1,17 \cdot 10^{-4} \cdot P \cdot \left( \frac{E}{P} - 32,2 \right)^2 \quad (I.1)$$

### I.3. L'azote $N_2$

#### I.3.1. Constitution de l'atome

L'azote se trouve principalement dans l'atmosphère. En effet, il représente en volume 78,08 % de l'air que nous respirons. La molécule d'azote de formule brute  $N_2$  est formée de deux atomes N séparés par 109,8 pm.

### I.3.2. Propriétés physicochimiques

Sous forme gazeuse, dans les conditions normales de pression et de température ( $T = 288,15$  K,  $P = 101,3$  kPa), l'azote est un gaz incolore, inodore, non toxique, ininflammable, non corrosif et physiologiquement inerte. Toutefois, lorsqu'il est présent en très grande quantité, il peut avoir des effets nocifs sur l'organisme par déplacement de l'oxygène de l'air, ce qui conduit à la réduction de la pression partielle de l'oxygène dans les poumons et à agir comme asphyxiant. Sous forme gazeuse, l'azote se liquéfie à très basse température (entre  $-196$  et  $-198$  °C), ce qui lui donne un avantage indéniable sur le  $\text{SF}_6$  (qui se liquéfie aux environs de  $-64$ °C à la pression atmosphérique [3] pour une utilisation dans les pays où la température peut atteindre des valeurs très basses. Sa conductivité thermique est plus élevée que celle du  $\text{SF}_6$ .

### I.3.3. Propriétés diélectriques

L'azote n'est pas un gaz électronégatif comme le  $\text{SF}_6$  (pas de processus d'attachement). Son coefficient d'ionisation effectif ( $\alpha^* = \alpha - \eta$ ) se réduit donc au coefficient d'ionisation primaire de Townsend  $\alpha$  ( $\alpha$  est le coefficient d'ionisation par collision et  $\eta$  le nombre d'électrons capturés par unité de longueur dans la direction de E).

Le coefficient d'ionisation réduit  $\frac{\alpha}{P}$  est uniquement fonction du champ réduit E/p, lié par l'expression suivante.

$$\frac{\alpha}{P} = A.e^{\left(\frac{-B}{E/p}\right)} \quad (1.2)$$

Où A et B sont des constantes :  $A = 66$  ( $\text{kPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) et  $B = 2,15$  ( $\text{kV}/\text{kPa} \cdot \text{cm}$ )

Cette relation est valable pour des champs réduits (E/p) compris entre 3 et 10  $\text{kV}/\text{cm} \cdot \text{kPa}$  [4]

Une autre relation linéaire donnée par [5] :

$$\frac{\alpha}{P} = 0,015 \cdot \left(\frac{E}{P}\right) - 0,55 \quad (1.3)$$

Il faut noter que cette relation est valable pour des valeurs de champs réduits inférieures 300  $\text{kV}/\text{cm} \cdot \text{bar}$ . Le coefficient  $\alpha$  est négligeable jusqu'à une valeur limite ( $E/p = 27$   $\text{kV}/\text{cm} \cdot \text{bar}$ ) qui constitue le champ critique dans l'azote.



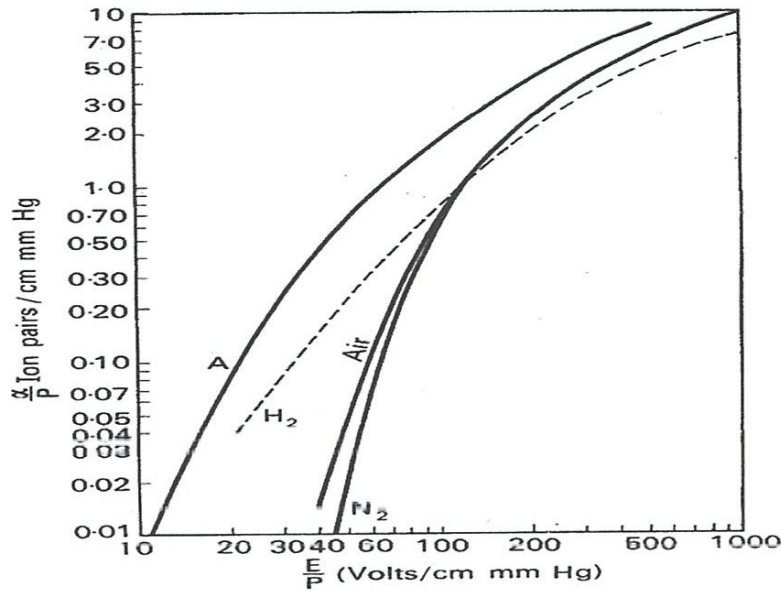


Figure 1.2. Variation du coefficient d'ionisation ( $\alpha/P$ ) en fonction de ( $E/p$ )  
Pour N<sub>2</sub>, Air, H<sub>2</sub> et A [6].

Sur cette figure il est montré la variation du premier coefficient de Townsend de l'azote comparé à autre gaz en fonction de la variation du champ électrique réduit, cela signifie que l'azote peut résister devant des champs électriques importants par rapport à l'hydrogène et même l'air dans une intervalle de variation limitée.

## I.4. Dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>

### I.4.1. Constitution de l'atome

Il est composé d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est une molécule linéaire. Aux conditions normales de pression et température, ce composé inorganique est présent sous forme gazeuse.

Il est rejeté par la respiration humaine et animale mais il est consommé par les plantes lors de la photosynthèse et son pourcentage reste relativement stable. Il existe dans l'atmosphère en faible proportion (0,03 %).

### I.4.2. Propriétés physicochimiques

Le dioxyde de carbone a un poids moléculaire de l'ordre de 44,01 g/mol et une température de liquéfaction de l'ordre de -78,5°C. Le CO<sub>2</sub> gazeux a une odeur légèrement irritante, il est incolore et plus lourd que l'air.

Le dioxyde de carbone est cependant l'un des gaz qui contribue à l'effet de serre et provoque le réchauffement climatique.

### I.4.3. Propriétés diélectriques

Dans le  $\text{CO}_2$  (légèrement électronégatif), sa tenue diélectrique est très proche de celle de l'azote et supérieure à celle de l'air mais inférieure à celle du  $\text{SF}_6$ .

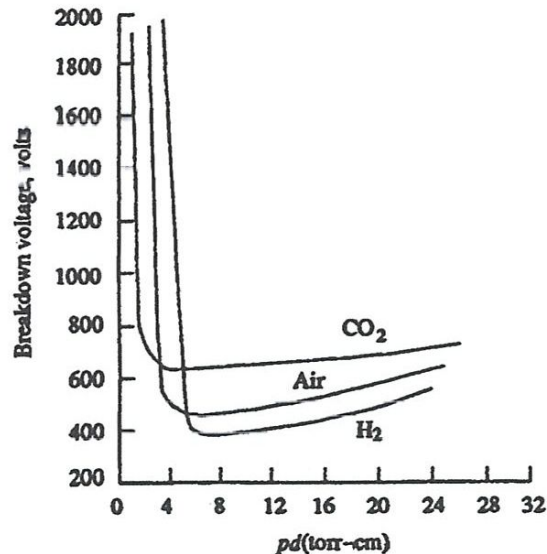


Figure 1.3. Tension de claquage en fonction du produit pd de  $\text{CO}_2$ , l'air et l'hydrogène [7].

## I.5. L'hexafluorure de soufre $\text{SF}_6$

### I.5.1. Introduction

Le  $\text{SF}_6$  est largement utilisé dans la technologie moyenne tension et haute tension (disjoncteurs, sous-stations de transformation) depuis 1960, il est l'un des gaz les plus lourds qui existent.

Au cours des dernières années, l'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ) a présenté un intérêt technologique considérable comme un milieu isolant dans la conception des systèmes énergétiques, surtout en haute et très haute tension, en raison de ses excellentes propriétés isolantes, même à une pression relativement basse et sa stabilité thermique et chimique.

L'hexafluorure de soufre est considéré comme étant un composé complètement fluoré (CCF), sa molécule est formée d'un atome de soufre et six atomes de fluor.

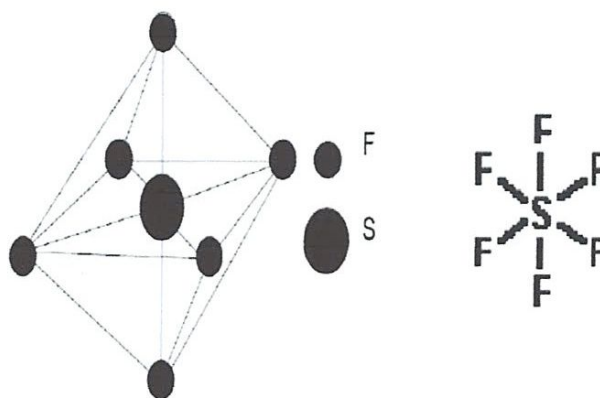


Figure 1.4. Structure moléculaire de SF<sub>6</sub>.

Les liaisons entre les atomes sont de distances,  $d_{S-F} = 1,56 \text{ \AA}$  et  $d_{F-F} = 2,21 \text{ \AA}$ . Cette figure montre que la molécule de SF<sub>6</sub> est de forme octaédrique ou les six atomes de fluor sont symétriquement repartis sur les sommets autour de l'atome de soufre.

### I.5.2. Propriétés physicochimiques

L'hexafluorure de soufre SF<sub>6</sub> fut élaboré en 1900 par Moissan et Lebeau selon la réaction suivante :  $S \text{ (solide)} + 3F_2 \text{ (gaz)} \rightarrow SF_6 \text{ (gaz)} + 1096 \text{ kJ}$ . Et ce sont les travaux du français Berthelot qui sont à l'origine de l'utilisation du SF<sub>6</sub> dans le domaine de l'appareillage électrique comme gaz de coupure et d'isolation, ce gaz présente une très bonne stabilité chimique de ce gaz en présence d'un arc électrique.

C'est un gaz incolore, inodore, stable à la chaleur, non toxique et ininflammable dans les CNTP (conditions normales de température et de pression). Puisque les composés complètement fluorés CCF ont des longévités atmosphériques pouvant aller jusqu'à plus de 3000 ans, le SF<sub>6</sub> pourrait donc contribuer de façon permanente à l'échauffement global du climat si les émissions continuent de croître. Le potentiel d'échauffement global (PEG) du SF<sub>6</sub> est 23900 fois supérieur à celui du CO<sub>2</sub> pris comme référence (PEG = 1).

Lorsqu'il est utilisé comme isolant, certains de ces paramètres physico-chimiques sont susceptibles de jouer un rôle plus ou moins important.

En outre, sa chaleur spécifique est 3,7 fois supérieure à celle de l'air, ce qui limite significativement l'échauffement des équipements.



### I.5.3. Propriétés diélectriques

Grâce au caractère électronégatif du fluor, la molécule du SF<sub>6</sub> a tendance à capturer les électrons pour former des ions négatifs. Sa section efficace élevée permet de ralentir (lors des collisions) les électrons libres subsistant dans le volume, ce qui les empêche d'être trop rapidement accélérés sous l'action du champ électrique retardant ainsi le développement de la décharge.

Sa grande qualité d'isolation (bonne tenue diélectrique), son aptitude à ne pas entretenir l'arc électrique et son excellente stabilité chimique et thermique font de lui SF<sub>6</sub> un gaz de premier plan pour les applications industrielles (disjoncteurs, commutateurs, transformateurs haute tension, lignes de transmission et sous-stations de distribution ...).

Si on prend en compte uniquement l'ionisation par les électrons, on peut calculer le premier coefficient d'ionisation  $\alpha$  dans un champ uniforme selon la relation (I.2), mais dans le cas où les ions positifs sont pris en compte dans le processus d'ionisation, on définit un deuxième coefficient d'ionisation le « coefficient d'ionisation primaire effectif  $\alpha^*$  ». Plusieurs méthodes ont été proposées pour son calcul tel que.

- La relation de Boyd et Crichton qui donne le coefficient d'ionisation en fonction du champ réduit  $E/p$  :

$$\frac{\alpha^*}{P} = 27,8 \cdot \left( \frac{E}{P} \right) - 2460 \quad (I.4)$$

$E$  est le champ en kV/cm,  $p$  la pression bar et  $\alpha^*$  en 1/cm. Cette relation est limitée à une plage de champ réduit ( $E/p$ ) comprise entre 30 et 200 kV/cm. bar.

- Les relations de Balla et Graggs qui permettent de comparer la croissance des coefficients d'ionisation primaire  $\alpha$  et d'attachement  $\eta$  sous champ uniforme.

$$\frac{\alpha}{P} = 23 \cdot \left( \frac{E}{P} \right) - 1234 \quad (I.5)$$

$$\frac{\eta}{P} = -4 \cdot \left( \frac{E}{P} \right) + 1135 \quad (I.6)$$

- Et enfin la relation empirique de Nitta [8], elle est valable pour une plage de champ réduit relativement grande.

$$\frac{\alpha^*}{P} = k \cdot \left( \frac{E}{P} - \left( \frac{E}{P} \right)_{cr} \right) \quad (I.7)$$

$$\text{Avec } k = 27 \text{ kV}^{-1} \text{ et } \left( \frac{E}{P} \right)_{cr} = 0.8775 \left( \frac{\text{KV}}{\text{cm.kPa}} \right)$$

Donc l'expression (I.7) devient :

$$\frac{\alpha^*}{P} = 27 \cdot \left( \frac{E}{P} - 0.8775 \right) \quad (I.8)$$

Le champ critique réduit  $(E/p)_{cr}$  dans le SF<sub>6</sub> est de 89 kV/(cm. bar), valeur obtenue pour une configuration parfaite. Aucune ionisation n'est possible pour toute valeur inférieure à ce champ critique.

Les propriétés diélectriques du SF<sub>6</sub> peuvent être dégradées par une diminution importante de la température à travers une diminution de la valeur critique de  $(E/p)$  provoquée par une augmentation du coefficient d'ionisation. Des précautions doivent être donc prises lors de son utilisation (disjoncteur haute tension par exemple) dans les pays ou les températures peuvent descendre à des valeurs très basses (climat très froid) pour éviter les condensations.

#### **I.5.4. Rigidité diélectrique**

L'intérêt d'utilisation du SF<sub>6</sub> en isolation électrique surtout en haute tension est qu'il supporte des champs électriques uniformes 2,5 fois supérieurs ceux que l'on peut appliquer dans l'air, à pression atmosphérique. Et dans les champs non uniformes, ce rapport atteint 5 fois à 2 bars, ainsi que la taille des équipements isolés au SF<sub>6</sub>, s'en trouvent considérablement réduites, par rapport à leurs homologues isolés à l'air.

#### **I.5.5. Pureté**

L'hexafluorure de soufre pur n'est pas toxique. En revanche, la fabrication de ce gaz laisse parfois subsister d'autres composés de soufre (SF<sub>4</sub>, SF<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>) dont certains peuvent être toxiques. D'autres impuretés sont susceptibles de nuire à la qualité diélectrique du gaz. La norme CEI 60376, Spécifications de la qualité technique de l'hexafluorure de soufre SF<sub>6</sub> pour utilisation dans les appareils électriques, spécifie les niveaux suivants pour les impuretés admissibles au moment de la livraison :

**Tableau I.1 :** Spécification de la pureté pour le SF<sub>6</sub> utilisé dans les dispositifs haute tension (CEI 60376)

Corps étranger	Quantité tolérée
Air	2g/Kg
Huile minérale	10mg/Kg
CF <sub>4</sub>	2.4/KG
Acidité totale	1mg/Kg
H <sub>2</sub> O	25mg/Kg
Impureté totale	0.3% vol

Par ailleurs, des composés nocifs peuvent être engendrés par des arcs électriques qui éclatent dans le SF<sub>6</sub>, portant la température du gaz à environ 15000 °C. De tels arcs se produisent forcément dans un disjoncteur, par exemple, où chaque ouverture et fermeture s'accompagne d'un arc. Les sous-produits de décomposition qui en résultent sont principalement le fluorure de thionyle SOF<sub>2</sub>, le fluorure de sulfuryle SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> et le déca fluorure de soufre S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>, ce dernier étant particulièrement toxique.

La norme CEI 61634, Appareillage à haute tension – Utilisation et manipulation de gaz hexafluorure de soufre SF<sub>6</sub> dans l'appareillage à haute tension, indique les procédures à suivre et les précautions à prendre lors de la manipulation et de l'utilisation de ce gaz.

### **I.5.6. Effet de serre**

Le SF<sub>6</sub> est un gaz à effet de serre 23900 fois plus efficace que le gaz carbonique, à concentration égale ; en outre, il ne se dégrade que lentement et sa durée de vie dans l'atmosphère est de l'ordre de 3200 ans.

La recommandation CEI 62271, Appareillage à haute tension, précise les conditions d'étanchéité requises pour les installations à gaz. Le taux de fuite F<sub>p</sub> est défini comme la masse de gaz qui s'échappe de l'installation, en pourcent de la masse totale du gaz, par année [% p.a.]. La recommandation de la CEI distingue les "systèmes fermés" et les "systèmes étanches" (soudés). Les directives actuelles spécifient, pour les installations de grandes dimensions isolées au SF<sub>6</sub> :

$$F_p < 0,5\% \text{ p.a. (systèmes fermés)}$$

$$F_p < 0,1\% \text{ p.a. (systèmes étanches)}$$



Ces taux ont été définis de manière à limiter autant que possible la quantité de gaz rejeté dans l'atmosphère durant toute la durée de vie de l'installation, qui est de l'ordre de 20 à 40 ans. Les procédures de contrôle du taux de fuite sont spécifiées par la norme CEI 60068-2-17, Essais fondamentaux climatiques et de robustesse mécanique – Essai Q : étanchéité.

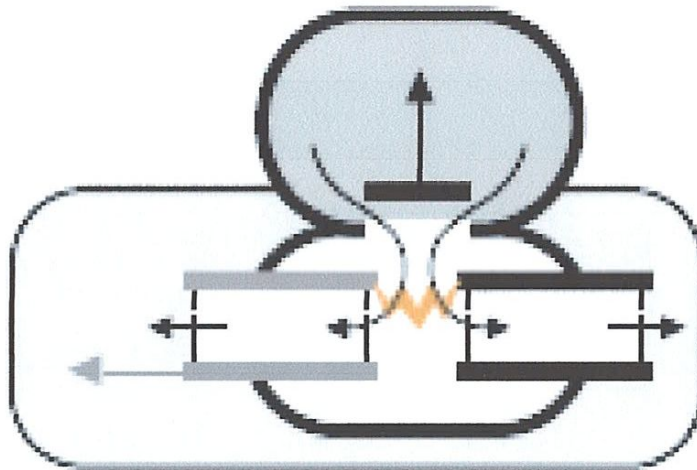


Figure 1.5. Fuite du gaz pendant le mouvement des contacts.

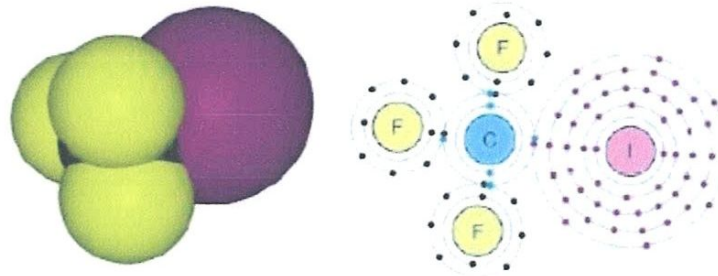
Par ailleurs, les installations électriques équipées d'un système de stabilisation de la pression ne sont plus autorisées, du fait de leur taux de fuite élevé. [9]

### I.6. Trifluoroiodomethane CF<sub>3</sub>I

À l'exception de l'air, SF<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub> et le N<sub>2</sub> et au cours des dernières années, le gaz CF<sub>3</sub>I a attiré l'attention de plusieurs chercheurs dans le domaine de la des matériaux diélectriques en tant que gaz électronégatif stable et typique [10]. Leurs propriétés physiques et chimiques, leurs propriétés thermodynamiques, ainsi que la performance électrique que présente ce gaz sont remarquables, Cependant, il peut être également l'alternative de gaz isolant la plus prometteuse au SF<sub>6</sub> que nous ayons trouvée ces dernières années.

#### I.6.1. Propriétés physicochimiques

Le CF<sub>3</sub>I est un gaz synthétique avec une molécule qui se compose de trois atomes de fluor et d'un atome d'iode dans la composition d'un atome de carbone central, comme le montre la figure 1.6. Où l'atome de fluor est l'atome électronégatif le plus élevé de la nature.



**Figure 1.6.** Structure du  $CF_3I$ .

Le  $CF_3I$  est un gaz incolore et ininflammable, sa température de liquéfaction est considérée un peu élevée  $-22.5\text{ °C}$  de, il a un faible impact environnemental son potentiel de réchauffement global (PRG) inférieur à 5) et un potentiel de dégradation d’ozone (PDO) de l’ordre de  $10^{-4}$ .

Sur le tableau I.2 nous avons résumé les principales propriétés du gaz  $SF_6$  comparées à celles du  $CF_3I$ .

**Tableau I.2** nous avons résumé les principales propriétés du gaz  $SF_6$  comparées à celles du  $CF_3I$ .

Gaz	$CF_3I$	$SF_6$
Masse moléculaire	195.91	146.05
Caractéristique	Incolore et ininflammable	Incolore et ininflammable
PEG	<5	23900
PDO	0.0001	0
Durée de vie dans l’atmosphère (année)	0.005	3200
Température de liquéfaction	$-22.5^{\circ}C$	$-63.9^{\circ}C$

### **I.6.2. Propriétés Diélectriques**

La rigidité diélectrique de ce dernier est 1,2 fois supérieure à celle du  $SF_6$ , l’orsqu’il est exploité à des pressions élevées 0.5- 0.8 MPa, une rigidité diélectrique presque équivalente à celle des disjoncteurs conventionnels isolés au  $SF_6$  pourra être obtenue [11]. Cependant, il est

impossible de l'utiliser à des pressions de cet ordre à cause de sa température de liquéfaction assez élevée.

Les caractéristiques d'extinction mesurées lors des tests sur un modèle de chambre de coupure contenant une buse en Téflon montrent que les constantes de temps de coupure de l'arc pour le  $\text{CO}_2$  et le  $\text{SF}_6$  sont respectivement de  $0,72 \mu\text{s}$  et  $0,58 \mu\text{s}$  [12,13]. Mais Celle du  $\text{CF}_3\text{I}$  est de  $0,6 \mu\text{s}$  qui est proche de celle du  $\text{SF}_6$ , par ailleurs, le coefficient de perte diélectrique (facteur de dissipation tangente delta) est réduit de moitié par rapport à celui du  $\text{SF}_6$ .

En résumé et en se basant sur les résultats de plusieurs recherches [13, 14, 15], la constante de temps d'arc du  $\text{CF}_3\text{I}$  en comparaison à d'autres gaz se présentent selon l'ordre hiérarchique suivant :  $\text{SF}_6 < \text{CF}_3\text{I} < \text{CO}_2 < \text{H}_2 < \text{Air} < \text{N}_2$ . Celui du coefficient de perte diélectrique est :  $\text{H}_2 > \text{SF}_6 > \text{CO}_2 > \text{Air} > \text{N}_2 > \text{CF}_3\text{I}$ .

### **I.7. Conclusion**

l'air et l'azote sont des gaz n'ont pas d'impact négatif sur l'environnement, présentent une rigidité diélectrique beaucoup plus faible que celle du  $\text{SF}_6$  qu'il reste le gaz le plus souvent utilisé dans les appareillages à moyenne et haute tension grâce à sa rigidité diélectrique relativement élevée et sa bonne conductivité thermique, il ne présente aucune toxicité pour les humains et les animaux. Néanmoins, le  $\text{SF}_6$  est classé parmi les gaz présentant l'effet de serre le plus puissant.

Un autre gaz de propriétés diélectriques remarquable est  $\text{CF}_3\text{I}$ , qui peut devenir le remplaçant du  $\text{SF}_6$  mais il ne peut pas être compressible à cause de sa température de liquéfaction élevée, ainsi il est cher et classé parmi les substances cancérigènes, mutagènes et repro toxiques de catégorie 3.

## *Chapitre II*

*Propriétés et utilisation des isolants solides*



### **II.1. Introduction**

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée :  $10^8$  à  $10^{10}$   $\Omega.m$ , alors ils ne sont pas conducteurs du courant électrique puisque ils ne contiennent pas de charges libres dans leurs structures. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une des tensions faibles, à moins qu'ils soient soumis à des champs électriques fortement élevés et à l'action des facteurs ionisants externes provoquant la perte de leurs propriétés diélectriques.

Parmi les matériaux isolants solides utilisés dans les systèmes d'énergie, on peut citer le verre, la céramique, le Téflon (PTFE polytétrafluoroéthylène) utilisé pour certaines pièces des disjoncteurs haute tension, les résines (Epoxy) ainsi que de nombreux plastiques (polymères et composites, etc.).

### **II.2. Classification des isolants solides utilisés en isolation électrique**

Les matériaux diélectriques traditionnels ont longtemps été des substances isolantes minérales (silice, alumine, ...) mais les polymères organiques sont de plus en plus utilisés du fait de leurs possibilités de mise en œuvre (films, laminés, moulages...), de leur flexibilité, de leur faible densité et de la grande variété de compositions, ces matériaux peuvent trouver en deux grandes familles [16].

#### **II.2.1. Isolants naturels**

##### **II.2.1.1. Minéraux**

###### **II.2.1.1.1. Verre**

###### **a) Application**

Parmi les matériaux ayant des caractéristiques électriques isolantes, le verre s'affirme comme un candidat idéal. Son utilisation est cependant conditionnée par la manière dont les contraintes mécaniques sont appréhendées. De ce fait, les applications du verre dans le domaine de l'isolement électrique se retrouvent soit dans le domaine des verres trempés soit dans des technologies où le verre est utilisé à l'état de fibres de renforcement de polymères [17].

Le verre utilisé dans le domaine électrotechnique, dont les principales applications se trouvent dans les techniques d'isolement électrique de conducteurs ou d'éléments sous tension dans les réseaux de transport et de distribution d'électricité.

Le verre moulé ainsi que les fibres de verre sont destinées au renforcement mécanique de pièces en résine directement au contact d'éléments conducteurs.



Figure II.1. Isolateur en verre de ligne électrique.

### b) Caractéristiques

Généralement le verre est fabriqué de sable siliceux, chaux et la soude, ces caractéristiques sont différentes selon les applications, qu'elles soient en verre moulé ou réalisées avec des fibres de verre. D'une manière générale, les caractéristiques électriques des verres sont secondaires (le verre, par nature, dispose de caractéristiques électriques isolantes, il présente une rigidité diélectrique  $E_c = 7 \text{ kV/mm}$ , sa permittivité est de l'ordre de  $\epsilon_r = 7$ , avec un facteur de perte diélectrique  $\tan\delta = 0,02 - 0,04$ , le verre peut supporter une température maximale  $T_{\max} = 400$  à  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , en effet ce sont surtout les caractéristiques chimiques et d'abord mécaniques qui sont déterminantes.

Dans le cas de pièces moulées, il existe deux familles principales qui se différencient par la résistance mécanique du verre. Certaines pièces ne nécessitant pas de grande résistance mécanique sont moulées et recuites. La limite mécanique du matériau lorsqu'il est recuit a amené les fabricants d'isolateurs en verre à développer et à adapter le procédé de la trempe (plus commun dans le domaine du verre plat) à des objets aux formes plus complexes, tels que les isolateurs en verre des lignes aériennes.

La chimie des verres utilisés dans le domaine de l'isolement électrique se distingue principalement par la nature des courants appliqués (alternatifs ou continus) sur les isolants moulés alors que la corrosion chimique ou électrochimique des fibres de verre oriente les choix dans les matériaux utilisés pour le renforcement des polymères.



### II.2.1.1.2. Céramique

#### a) Préparation

Les isolants céramiques sont des produits de matières premières inorganiques, en particulier des silicates et des oxydes, qui se forment comme un mélange de matières premières et obtiennent leurs propriétés par frittage. Ils comprennent des structures cristallines noyées dans une matrice de verre [16]. L'homme les emploie depuis des millénaires, leur première utilisation comme brique, produite en façonnant de l'argile puis en la chauffant pour la figer (argile + quartz + fondants + oxydes métalliques). De nos jours les applications des céramiques ne se limitent plus au simple domaine de la construction (lavabos, briques, ciments...), mais elles s'étendent aux domaines techniques (fibres optiques, capteurs piézoélectriques, isolateurs ...) figure II.2, en raison de leurs propriétés exceptionnelles (résistance à haute température et à l'usure, inertie chimique, ténacité, propriétés électriques...).

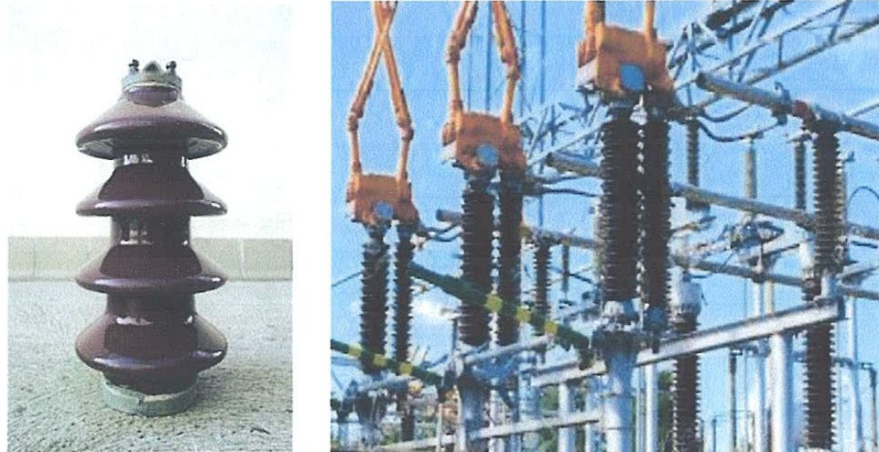


Figure II.2. Isolateur électrique en céramique destiné aux lignes électriques.

#### b) Type de céramiques

La plupart des céramiques sont des matériaux polycristallins, c'est à dire comportant un grand nombre de microcristaux bien ordonnés (grains) reliés par des zones moins ordonnées, les familles de céramiques les plus importantes sont les oxydes tel que l'Oxyde d'aluminium  $Al_2O_3$ , Oxyde de béryllium  $BeO$ , Oxyde de fer  $Fe_3O_4$ , Oxyde de magnésium  $MgO$ , dioxyde de zirconium  $ZrO_2$ , les nitrures tel que le nitrure d'aluminium  $AlN$ , les carbures tel que le carbure de silicium  $SiC$  [18].

### c) Propriétés des céramiques

Les isolants de type céramique sont des matériaux largement utilisés en génie électrique.. Le terme céramique signifie souvent des objets rustiques comme des poteries, des briques et des tuiles mais le terme de céramique signifie plus généralement un solide qui n'est ni un métal ni un polymère.

Les céramiques possèdent d'excellentes propriétés intrinsèques telles que la rigidité diélectrique  $E_c \approx 10$  à  $20$  kV/mm et son facteur de perte  $\tan\delta = 5 \cdot 10^{-4}$ , leur permittivité peut varier de  $\epsilon_r = 10$  à  $3000$ , le comportement réfractaire et l'inertie chimique ( $T_{\max} = 200$  à  $500$  °C). Cette polyvalence permet la sollicitation de ces matériaux dans de nombreuses applications.

#### II.2.1.1.3. Mica

Un Produit naturel qui présente un ensemble de propriétés électriques, mécaniques, thermiques et de tenue aux agents chimiques assez exceptionnelles qui l'a fait apprécier depuis très longtemps dans l'industrie électrotechnique [19].

Le mica présente des propriétés thermiques et électriques tel que,  $T_{\max} = 500$  à  $1000$  °C,  $E_c \approx 210$  à  $240$  kV/mm,  $\tan\delta = 3 \cdot 10^{-4}$  à  $26 \cdot 10^{-4}$ ,  $\epsilon_r = 6$  à  $7$ .

#### II.2.1.2. Organiques

Ce sont les matériaux d'origine animale, végétale ou synthétiques.

##### II.2.1.2.1. Papiers

Cellulose extraite du bois ou de l'alfa. Imprègnes de diélectrique liquide pour éviter l'absorption d'eau, ils sont utilisés dans les transformateurs secs et les condensateurs.

**Propriétés :** la température max que peut supporter ce type de matériau est de l'ordre de  $T_{\max} = 105$  °C,  $E_c \approx 50$  à  $80$  kV/mm (papier sec),  $100$  kV/mm (papier imprègne d'huile) et un  $\tan\delta = 2 \cdot 10^{-3}$  à  $4 \cdot 10^{-3}$ , sa permittivité est  $\epsilon_r = 4$  à  $6$ .

##### II.2.1.2.2. Textiles

Coton, soie naturelle, fibres artificielles. Rubans, toiles pour l'isolation, de conducteurs de faible diamètre, bobines.

**Propriétés :** ce type de matériaux supporte une température max de l'ordre de  $T_{\max} = 90$  à  $120$  °C et sa rigidité diélectrique  $E_c \approx 5$  à  $10$  kV/mm avec une permittivité  $\epsilon_r = 3$ .



### II.2.1.2.3. Caoutchouc

La matière première, fournie sous forme de granulés solides, après chauffage devient une masse visqueuse qui peut être modélisée par coulée ou injection dans un moule et retirée après durcissement; ou il peut être formé en corps moulés par extrusion dans une presse, par ex. dans une isolation de câble cylindrique. Outre le PE, le PVC et le PTFE, le polypropylène, le polystyrène et le polyamide, par exemple, appartiennent également au groupe des thermoplastiques.

La polymérisation par condensation est la combinaison de divers groupes (dissemblables) de bas poids moléculaire pour former des macromolécules avec séparation des produits secondaires tels que l'eau, l'ammoniac, l'acide chlorhydrique.



Figure II.3. Câble 12 kV à isolation XLPE

**Propriétés :** la température max que peut supporter ce type de matériau est de l'ordre de  $T_{\max} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $E_c \approx 20 \text{ à } 30 \text{ kV/mm}$ ;  $\epsilon_r = 3$ .

Le LDPE et le XLPE (à base de LDPE réticulé par peroxyde) sont largement utilisés pour l'isolation des câbles jusqu'à 110 kV. Ils ont presque complètement supplanté le câble rempli de composés dans la gamme moyenne tension. L'isolation extrudée sur la gaine du conducteur interne est soumise à une contrainte avec une force de champ de fonctionnement maximale de 5 kV/mm.

La gaine conductrice intérieure et extérieure est composée de matériaux mélangés avec du noir de carbone. Les avantages des câbles PE sont les suivants: assemblage rapide, faible poids, petits rayons de courbure, installation en pente ou en position verticale sans difficulté.

Les principales difficultés rencontrées avec les câbles PE et XLPE résident dans leur sensibilité aux décharges partielles (PD) et à la question de leur durée de vie. Les plus petites cavités (microcavités) sont inévitables lors de la fabrication, ainsi que des impuretés occasionnelles. A ces points faibles, sous contrainte électrique, il peut se produire des décharges partielles et le développement de pistes de décharge (arbres) qui déclenchent une décomposition complète.

## **II.2.2. Isolants Synthétiques**

### **II.2.2.1. Nature**

Les matériaux isolants organiques synthétiques - couramment classés sous le mot-clé plastiques ont acquis une position d'une grande importance dans la technologie d'isolation électrique en tant que thermoplastiques non durcissables, duroplastiques durcissables, élastomères, et quelques matériaux liquides, par ex. les huiles de silicone.

### **II.2.2.2. Fabrication**

Une matière plastique est le résultat d'un mélange qui comprend :

- **une résine de base ou polymère**, obtenue à partir de réactions chimiques complexes de polymérisation effectuées sur des matières de base :
- **dérives du pétrole ou du charbon** ;
- **calcaires, sable, fluorures, sels marins** ;
- **bois.**

Les procédés de fabrication des matières plastiques sont principalement basés sur des traitements à haute température, sous des pressions élevées. Leur application couvre tous les domaines des systèmes d'isolation à haute tension, dans l'appareillage électrique basse tension, les câbles et dans les disjoncteurs à haute tension.

### **II.2.2.3. Caractéristiques**

- très bonne rigidité diélectrique : toujours  $\geq 10$  kV/mm;
- résistivité élevée :  $10^8 \leq \rho \leq 10^{17} \Omega.m$  ;
- faibles pertes diélectriques ;
- propriétés mécaniques inférieures à celles des métaux mais pouvant être améliorées par les procédés de fabrication (charges).

## **II.3. Permittivité relative**

La réponse du matériau au champ électrique appliqué  $E$  est le déplacement  $D$  des dipôles comme le montre la figure II.4, alors on peut exprimer la permittivité relative en combinant l'expression de la définition du vecteur induction électrique.

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{II.1})$$



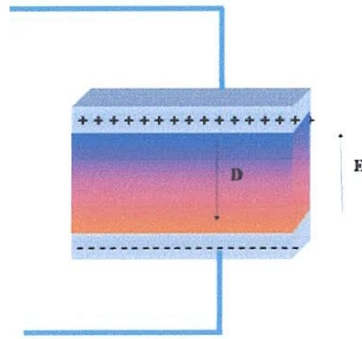


Figure II.4. Condensateur plan

La permittivité diélectrique  $\epsilon$  d'un matériau diélectrique solide, appelée aussi constante diélectrique, est le produit de la permittivité du vide  $\epsilon_0$  par la permittivité relative  $\epsilon_r$ .

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (\text{II.2})$$

La valeur de  $\epsilon$  est caractéristique d'un matériau diélectrique et peut se déduire de mesures électriques capacitives.

Pour un condensateur plan (Figure.II.4), la capacité  $C$  mesurée dépend linéairement de la permittivité  $\epsilon$  suivant la relation :

$$C = \epsilon \cdot C_0 = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \quad (\text{II.3})$$

Où ;  $d$  : épaisseur,  $S$  : surface d'un condensateur plan, et  $\epsilon_r$  : la permittivité du matériau du condensateur, elle peut varier avec la température, la fréquence et l'amplitude du champ électrique d'excitation.

et  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m est la permittivité absolue du vide (ou de l'air).

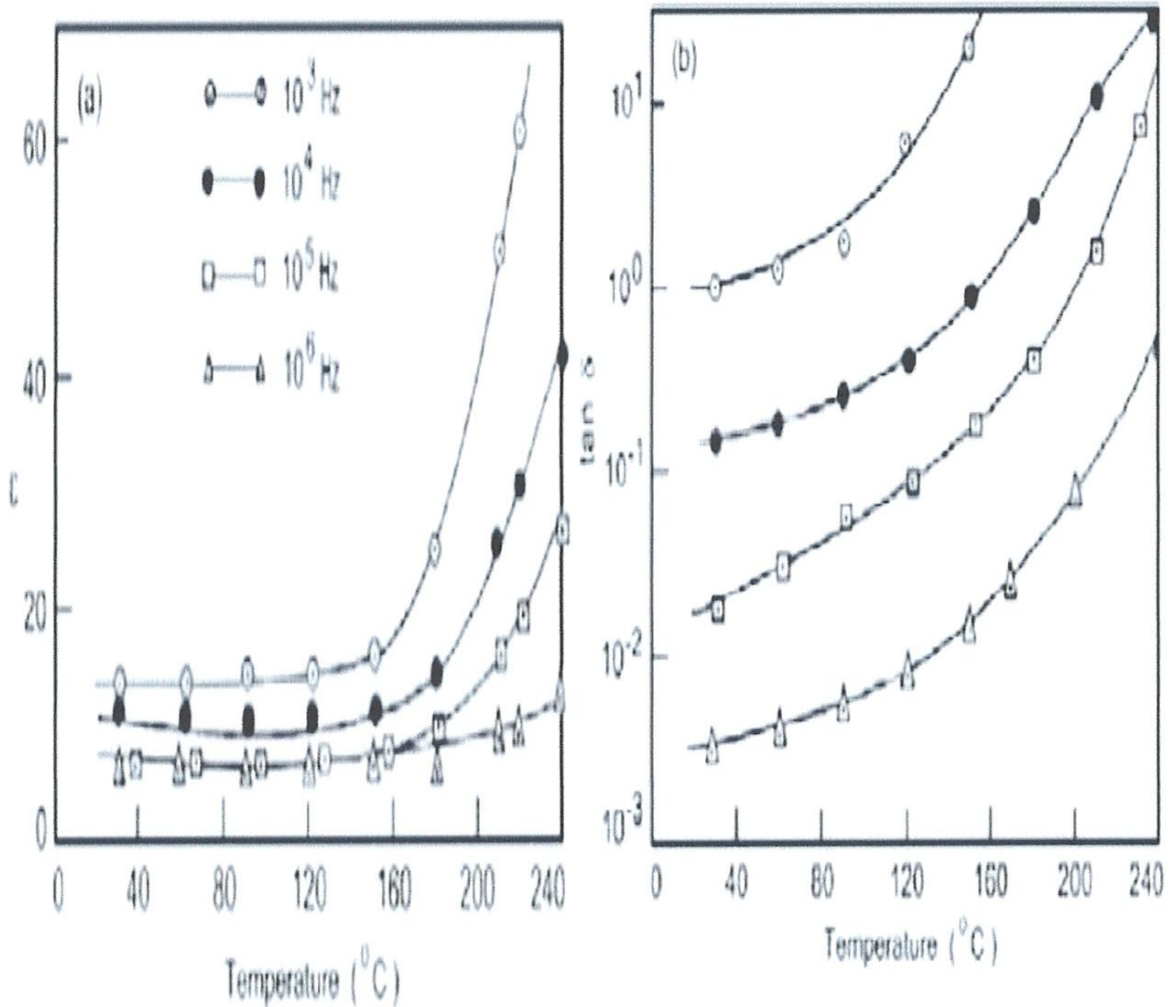


Figure II.4. Variation de permittivité a) et de facteur de perte diélectrique  $\tan \delta$  b) avec la température pour différentes fréquences d'un solide NaIO4 [20].

#### II.4. Polarisation des isolants solides

Polarisation : Parmi les diélectriques, certains matériaux sont dits polarisables : sous l'action d'un champ électrique, leurs charges positives se déplacent selon la direction du champ et leurs charges négatives selon la direction opposée, créant des dipôles électriques +/- orientés parallèlement au champ. Une fois le champ électrique annulé, les charges reprennent leur position d'équilibre et la polarisation disparaît. Les charges se déplacent et s'orientent par rapport au champ. C'est l'origine de l'effet capacitif dans les matériaux diélectriques.

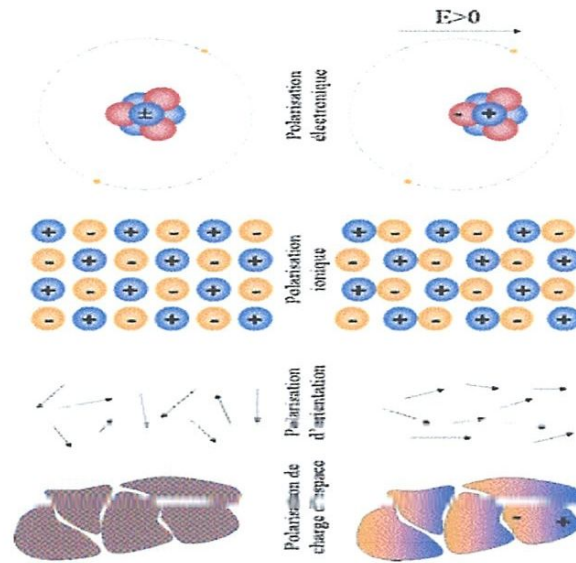


Figure II.5. Différents types de polarisation dans un diélectrique solide.

Une fois le champ électrique annulé, les charges reprennent leur position d'équilibre et la polarisation disparaît. Les charges se déplacent et s'orientent par rapport au champ. C'est l'origine de l'effet capacitif dans les matériaux diélectriques.

Selon la polarisabilité des dipôles permanents polaires dans le matériau, différents types de polarisation diélectrique peuvent être identifiées. En général, on distingue quatre types de polarisation.

#### II.4.1.1. Polarisation électronique et ionique

Sous l'influence d'un champ électrique externe, les orbites électroniques sont déformées avec une cinétique très rapide ( $10^{-15}$  s) provoquant une polarisation électronique. Les déplacements ioniques seront réalisés avec une cinétique plus lente ( $10^{-13}$  s), ils sont responsables de la polarisation ionique.

Considérant le temps d'établissement de tous ces mécanismes, ils se comportent comme des phénomènes instantanés dans le domaine temporel, et sont observés à des fréquences beaucoup plus élevées que celles des champs électriques utilisés en spectroscopie diélectrique dynamique, le déplacement relatif des ions positifs et négatifs sous l'action du champ fait apparaître un moment dipolaire ionique induit.

Cette polarisation sera désignée par  $P_\infty$  et est liée à la permittivité à fréquence infinie par l'équation:

$$\vec{P}_\infty = (\epsilon_\infty - 1) \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (\text{II.6})$$

### II.4.1.2. Polarisation dipolaire

Les matériaux polymériques sont constitués d'entités plus ou moins polaires, de super-nanométrique). Leur réorientation, qui tend à les aligner Lorsqu' on applique un champ électrique dans une direction , Les diélectriques polaires ont une permittivité supérieure aux diélectriques non polaires, Cette polarisation dipolaire  $P_d$  est associée à la permittivité  $\epsilon_d$  par la relation:

$$\vec{P}_d = (\epsilon_d - 1) \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

En absence du champ électrique externe tous les dipôles permanents sont orientés de façon aléatoire de telle sorte que la polarisation nette résultante est zéro.

La polarisation d'orientation joue un rôle important dans les matériaux macromoléculaire auxquels elle confère les propriétés suivantes [21] :

- Valeur relativement élevée de la permittivité relative  $\epsilon_r$ .
- Forte variation de la constante diélectrique avec la température et avec la fréquence.
- Tangente de l'angle de perte élevée, variant rapidement avec la température et la fréquence.

### II.4.1.3. Polarisation interfaciale

Lorsque le présente une certaine non homogénéité des charges piégées à la surface du matériau l'échantillon font apparaitre un macro dipôle dont la dimension caractéristique correspond à l'épaisseur du matériau. ce dipole est caractérisé par une polarisation supplémentaire appelée polarisation interfaciale due à l'accumulation de charges aux interfaces.

### II.4.1.4. Polarisation par charges d'espaces

Lorsqu'un diélectrique est soumis à des contraintes électrique, thermique ou mécanique, nous pouvons observer dans certaines régions du matériau un excès de charges électriques que nous appelons charges d'espace, peuvent se libérer sous l'action du champ électrique et s'accumulent près de l'électrode de signe opposé constituant ainsi une hétérocharge.



## **II.5. Conclusion**

Jusqu'ici nous avons étudié les différents isolants solides de point de vue, construction, types et propriétés, ainsi que tous les concepts de polarisation, de permittivité et de pertes diélectriques. Ces grandeurs physiques servent d'outils de base pour appréhender les phénomènes de claquage dans ces isolants que nous allons étudier dans le chapitre suivant.

## *Chapitre III*

*Modélisation des phénomènes de claquage en  
isolation électrique*

### **III.1. Introduction**

La compréhension des phénomènes de décharges produites dans les systèmes d'isolation électrique solide et gaz, est d'une importance capitale pour la conception et le dimensionnement des équipements moyenne et haute tension que pour les lignes de transport de grandes puissances. Aussi, les mécanismes physiques impliqués dans le développement de ces décharges sont beaucoup plus complexes selon la nature de tel isolant.

La tension de claquage d'un système d'isolation est la valeur de la tension avec une certaine dépendance temporelle pour laquelle le diélectrique perd temporairement ou définitivement sa propriété isolante au moyen d'un processus de décharge.

### **III.2. Claquage dans les diélectriques gazeux**

#### **III.2.1. État du gaz**

Théoriquement un gaz est un isolant parfait puisqu'il ne contient que des atomes ou des molécules neutres. L'initiation du mécanisme d'ionisation est conditionnée par la présence dans le gaz de quelques particules chargées dites particules germes, généralement des électrons qui peuvent être générés par plusieurs sources.

#### **III.2.2. L'avalanche électronique**

Un électron libre, placé dans un champ électrique uniforme  $E = U/d$  où  $U$  est la différence de potentiel appliquée entre deux électrodes planes séparées par une distance  $d$  (Figure III.1)[22] est de plus en plus accéléré sous l'effet du champ électrique par l'action de la force. Il parvient ainsi à gagner une énergie suffisante pour ioniser par collisions des particules neutres, donnant naissance à des ions positifs et à de nouveaux électrons

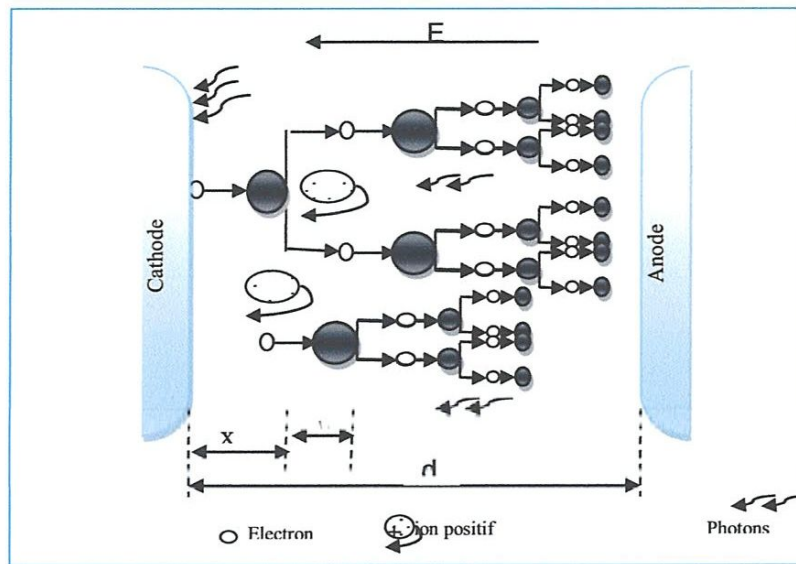


Figure III.1. Avalanche électronique.

### III.2.3. Initiation de la décharge électrique

L'étude des phénomènes de conduction électrique dans les gaz a été observé par Townsend en 1915, suite à de plusieurs travaux originaux traitant cet aspect physique (Villard 1899, Lenard Wied 1894 et J.Thomson 1909), entre deux électrodes planes et parallèles placés dans un milieu gazeux l'air, un faible courant produit dans le circuit extérieur due principalement de plusieurs mécanismes développés à l'intérieur du gaz, permettant le mouvement des particules chargées.

D'ailleurs, il existe toujours dans les gaz un petit nombre de charges électriques libres dues, comme décrit précédemment, à l'action de certains agents ionisants extérieurs (radiation cosmiques, radioactivité de la terre et les rayons présents dans l'atmosphère, ainsi en générale, il n'existe pas de gaz qui soient des isolants électriques parfaits dont de conductibilité très réduite, le courant à l'extérieur résulte de plusieurs émissions.

#### III.2.3.1. Émission photoélectrique

L'action des rayonnements extérieurs sur la cathode et dans le volume du gaz est caractérisé par le coefficient d'émission  $\gamma_0$ , nous analysons d'abord le passage du courant électrique à travers le gaz, dans le cas de la décharge non autonome et nous supposons, dans ce qui suit, le champ électrique suffisamment faible, de sorte que l'ionisation du gaz par multiplication électronique ne se produit pas, et négligeons aussi la charge d'espace devant la charge superficielle des électrodes.



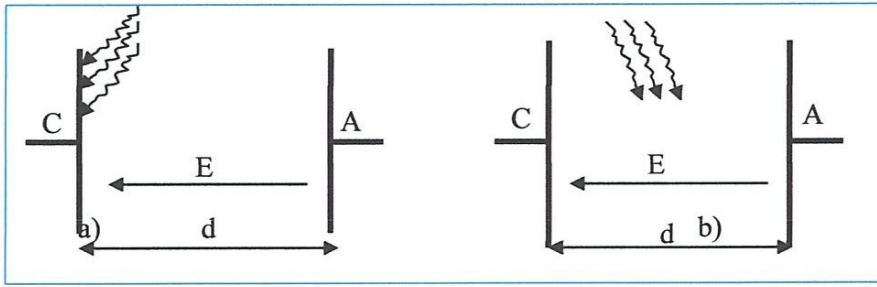


Figure III.2. a) Émission photo-électronique de la cathode, b) Émission photo-électronique du volume du gaz.

Dans ce cas la densité de courant résulte d'une différence de courant d'émission et de courant rétrodiffusé  $j_r$ , dû à la diffusion des électrons vers la cathode.

$$j = e \cdot \left( \gamma_0 - \frac{n_e \cdot v_e^-}{4} \right), \text{ avec } j_r = \frac{n_e \cdot v_e^-}{4} \quad (\text{III.1})$$

Où  $v_e^-$  désigné la vitesse d'agitation thermique, autrement dit la vitesse moyenne des électrons dans leur mouvement désordonné et  $\gamma_0$  est le nombre de paires d'ions créés par une source extérieure (ionisante) par unité de temps et de volume, L'équation de continuité du courant impose la relation.

$$j = e \cdot n_e \cdot u_e = e \cdot n_e \cdot \mu_e \cdot E \quad (\text{III.2})$$

$u_e$ ,  $\mu_e$ , sont respectivement la vitesse de dérive des électrons et leur mobilité.

Après quelques combinaisons, il ressort.

$$j = \frac{e \cdot \gamma_0 \cdot \mu_e \cdot E}{\mu_e E + \frac{v_e^-}{4}} \quad (\text{III.3})$$

Pour un champ électrique très faible où  $\mu_e E \leq \frac{v_e^-}{4}$ , l'expression (III.3) se réduit à :

$$j = \frac{4 \cdot e \cdot \gamma_0 \cdot \mu_e \cdot E}{v_e^-} = \sigma \cdot E \quad (\text{III.4})$$

Et contrairement quand le champ est suffisamment intense  $\mu_e E \geq \frac{v_e^-}{4}$ , la densité de courant atteint la valeur de saturation.

$$j = j_0 = 4 \cdot \gamma_0 \quad (\text{III.5})$$

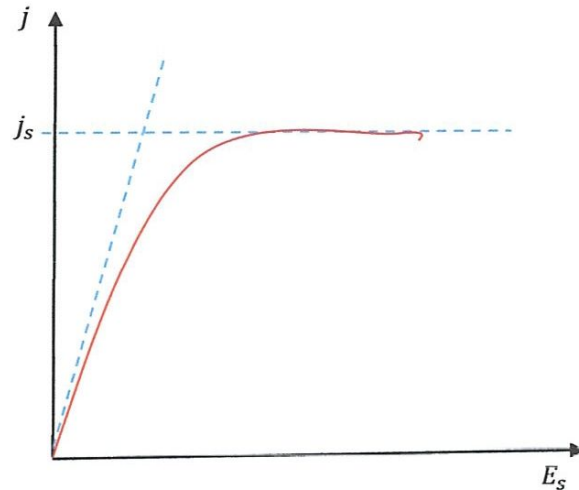


Figure III.3. Représentation schématique de la variation de densité du courant.

### III.2.3.2. Émission des ions positifs et négatifs

Une ionisation secondaire se développe dans le volume de gaz par une multiplication électronique due principalement des différents ioniseurs, des ions, atomes excités et aussi des photons en présence toujours des électrons, se déplacent en opposition sous l'effet de l'augmentation successive du champ électrique, le courant commence de nouveau à s'accroître au début lentement à partir de sa saturation, puis de plus en plus rapidement jusqu'à une limitation imposée.

le courant total développé est de densité :

$$j = e.(n_e u_e + n_i u_i) \quad , \text{ avec } u_e = \frac{e E}{m v_e} \quad (\text{III.6})$$

En introduisant la mobilité des électrons et des ions, l'équation (III.3) devient :

$$j = e.(n_e \mu_e + n_i \mu_i).E \quad (\text{III.7})$$

$$\text{Qui peut s'écrire : } j = \sigma .E \quad \text{avec : } \sigma = e.(n_e \mu_e + n_+ \mu_+ + n_- \mu_-) \quad (\text{III.8})$$

Où  $n_e, n_+$  et  $n_-$  sont les densités des électrons, ions positifs et négatifs, et leurs mobilités sont respectivement,  $\mu_e, \mu_+$  et  $\mu_-$ .

Les électrons ayant une masse beaucoup plus faible que les molécules du gaz, ils sont beaucoup plus mobiles que les ions créés dans les avalanches et en raison de cette différence de masse et sous un champ extérieur, les électrons vont dériver beaucoup plus vite que les ions.

### III.2.3.3. Émission thermo-ionique

A température ambiante, les électrons de conduction du métal n'ont pas une énergie thermique suffisante pour quitter la surface. Cependant, si la température du métal de la surface cathodique dépasse 1500° K, les électrons acquièrent suffisamment d'énergie pour traverser la barrière de potentiel et s'accumulent auprès de la surface de la cathode. Richardson a formulé une expression de densité de courant de saturation de cette émission lié à la température du métal comme suite[23].

$$j_s = \frac{4.\pi.m.e.k^2.T^2}{h^3} \exp\left[-\frac{W_a}{kT}\right], \quad A = \frac{4.\pi.m.e.k^2}{h^3} \quad (\text{III.9})$$

Avec :  $e$  et  $m$  respectivement la charge et la masse de l'électron,  $k$  et  $h$  sont les constantes de Boltzmann et de Planck,  $T$  est la température absolue,  $W_a$  la fonction du travail de la surface. Pour un champ électrique très fort, une fonction de travail effective est exprimée par.

$$W_{eff} = W_a - \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}} \quad (\text{III.10})$$

D'où le courant de saturation en présence du champ est déterminé par l'équation de Schottky.

$$j_s = A.T^2 \exp\left[-\frac{e}{K.T}\left(W_a - \sqrt{\frac{e.E}{4\pi.\epsilon_0}}\right)\right] \quad (\text{III.11})$$

Si  $j_0$  est la densité de courant en absence du champ électrique extérieur l'équation (III.9) peut prendre la forme.

$$j_s = j_0 \exp\left[\frac{e}{K.T}\left(W_a - \sqrt{\frac{e.E}{4\pi.\epsilon_0}}\right)\right] = j_0 \exp\left[\frac{B\sqrt{E}}{T}\right] \quad (\text{III.12})$$

Nous remarquons que le courant émis par la surface cathodique est sensible à toute augmentation du champ électrique appliqué.

### III.2.4. Caractéristique courant – tension

La variation du courant de décharges en fonction de la tension appliquée à un intervalle de gaz compris entre deux électrodes planes et parallèles (Figure III.1) est représentée sur la Figure III.3 Cette caractéristique I (V) comporte différentes zones correspondant chacune à un régime de décharges donné.

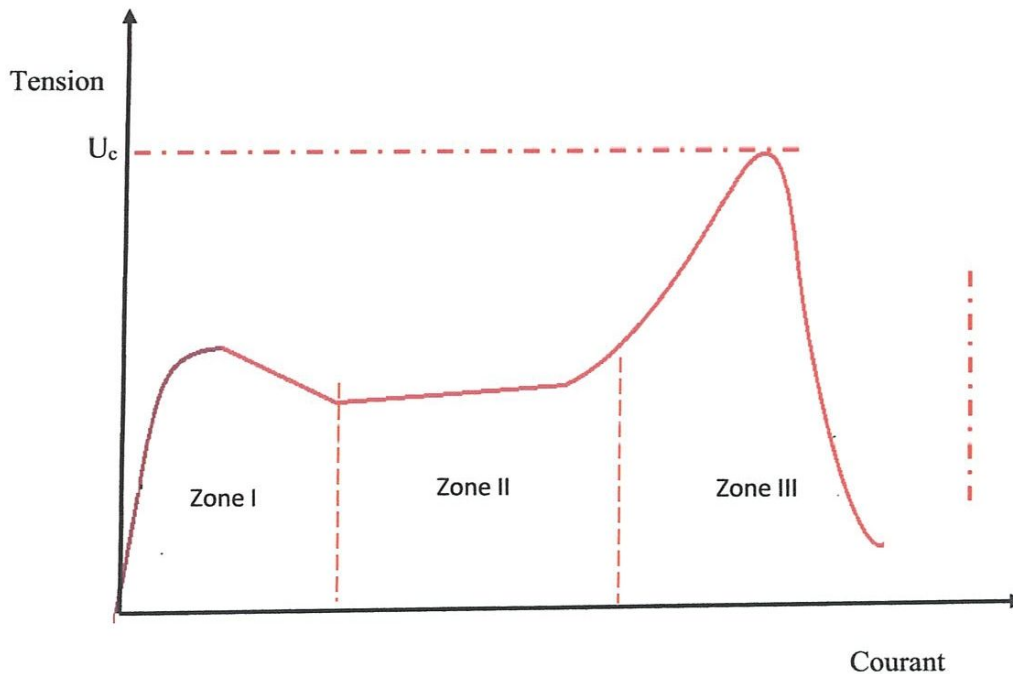


Figure III.4. Représentation de la caractéristique I-V.

- Zone I : c'est la zone correspond aux des décharges non autonomes sans multiplication électronique au début de la zone et avec multiplication des électrons se trouvant dans le volume de décharge acquièrent suffisamment d'énergie, grâce au champ électrique juste la saturation avant la fin de la zone, pour créer de nouvelles ionisations par d'autres agents ionisants.

- Zone II : L'augmentation du champ électrique accélère la vitesse de bombardement des ions sur la cathode. Ce mouvement génère des électrons supplémentaires qui à leur tour font augmenter le courant. La décharge électrique est suffisante, n'a pas de dépendance avec la source extérieure, le courant est suffisamment élevé ( $>10^{-4}$  A), et peut entraîner une décharge lumineuse dite décharge couronne.



• Zone III : Au-delà du régime de décharge luminescente anormale, une nouvelle augmentation du courant peut provoquer un court-circuit. C'est le régime de décharge d'arc. La tension chute brutalement alors que le courant augmente rapidement. ce régime n'est jamais atteint car il peut être à l'origine de la destruction des électrodes et du circuit d'alimentation électrique.

### III.2.5. Claquage de Townsend

En augmentant progressivement la tension  $V$ , le courant croît linéairement jusqu'à une certaine valeur  $I_0$  dite de saturation. Le phénomène de claquage de Townsend peut se développer en deux phases dont la première est caractérisée par un coefficient  $\alpha$  appelé coefficient d'ionisation (ou premier coefficient de Townsend). Ce coefficient représente le nombre de paires électron-ions produites par centimètre de parcours d'un électron dans la direction du champ électrique.

$$dN_x = N_x \alpha \cdot dx \quad (\text{III.13})$$

À  $x=0$  (surface cathodique),  $N_x(x=0) = N_0$

$$\text{D'où ; } N_x = N_0 \cdot e^{\alpha \cdot x} \quad (\text{III.14})$$

Si  $d$  est la distance inter électrode, le nombre d'électrons  $N_d$  arrivant sur l'anode est :

$$N_d = N_0 \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (\text{III.15})$$

De même pour le courant,

$$I_d = I_0 \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (\text{III.16})$$

$I_0$ , est le courant initial crée à la surface cathodique.

Dans la deuxième phase d'ionisation de Townsend, chaque ionisation d'un neutre du gaz donne naissance à un électron libre et un ion positif qui se dirige vers la cathode où il donnera à son tour naissance à un nombre  $\gamma$  de nouveaux électrons arrachés de la cathode par son bombardement par ces ions positifs, si son énergie est suffisante (supérieure à l'énergie d'ionisation du matériau constituant la cathode). Le coefficient  $\gamma$ , caractérisant l'ionisation en surface au niveau de la cathode, est appelé deuxième coefficient de Townsend, qui représente donc l'ensemble des effets secondaires et quantitativement fourni par l'expression.

$$\gamma = \gamma_i + \gamma_{ph} + \gamma_m \cdots \gamma_n \quad (\text{III.17})$$

Où  $n$  indique le type d'effet secondaire.

L'efficacité de ces effets secondaires par leurs action sur la surface cathodique, dépend à la fois du champ réduit  $E/P$ , nature du gaz et fortement du métal qui constitue la cathode et de son état de surface.

En tenant compte maintenant ces effets secondaires représentés par le deuxième coefficient de Townsend  $\gamma$  [24].

$$N_0'' = N_0 + N_0' \quad (\text{III.18})$$

$N_0''$ , le nombre total des nouveaux électrons arrachés de la cathode dans le deuxième processus, l'expression de la densité des électrons (III.15) doit être recalculée de la façon suivante.

$$N_d = N_0'' \cdot e^{\alpha \cdot d} = (N_0 + N_0') \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (\text{III.19})$$

replaçons maintenant  $N_0' = \gamma[N - (N_0 + N_0')]$ , on obtient ;

$$N_d = \frac{N_0 \cdot e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}, \quad \text{et pour le courant} \quad I_d = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{III.20})$$

Si  $I_0$  représente un courant dû aux électrons produits par l'agent ionisant extérieur, le courant  $I$  d'une décharge qui s'établit entre les électrodes distantes de  $d$  est représenté par la relation classique.

### III.2.6. Critère de claquage de Townsend

Pour avoir une décharge autonome qui ne cesse pas l'absence d'agent ionisant extérieur et génère ainsi un courant suffisamment important à la surface anodique conduit à un claquage du gaz entre les électrodes, le dénominateur des expressions données par (III.20) ne doit être nul, que lorsque  $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ , ce qui signifie que le courant  $I_0$  n'est plus nécessaire à l'entretien de l'ionisation, et la décharge est alors dite autonome.

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (\text{III.21})$$

L'expression (III.21), constitué le critère d'amorçage du claquage de Townsend en champ uniforme, Dans le cas où le champ n'est plus uniforme, le critère de Townsend s'écrira comme suite :

$$\gamma \left[ \exp \left( \int_0^d \alpha dx \right) - 1 \right] = 1 \quad (\text{III.22})$$

Pour tous les gaz électronégatifs, il suffit de remplacer à chaque étape le premier coefficient de Townsend par :

$$\alpha' = \alpha - \eta \quad (\text{III.23})$$

Le critère de claquage pour un champ uniforme devient alors de la forme suivante :

$$\frac{\alpha\gamma}{\alpha - \eta} \left[ \exp(\alpha - \eta)d - 1 \right] = 1 \quad (\text{III.24})$$

Et celui en champ non uniforme la relation (III.22) doit être modifiée pour tenir compte du fait de l'électronégativité du gaz, on aura :

$$\gamma \left[ \exp \left( \int_0^d (\alpha - \eta) dx \right) - 1 \right] = 1 \quad (\text{III.25})$$

### III.2.7. Tension de claquage

Le mécanisme proposé par Townsend permet d'expliquer de manière théorique la loi empirique de Paschen décrivant la tension nécessaire à l'apparition d'une décharge disruptive en fonction du produit  $pd$  de la pression  $p$  et de la distance  $d$  inter-électrodes.

Le premier coefficient de Townsend  $\alpha$  qui décrit le processus d'avalanche caractérisé par les ionisations successives et la création d'électrons dépend de l'intensité du champ électrique  $E$ .

L'état du gaz étant déterminé par sa pression et sa température qui restent pratiquement constantes lors de l'ionisation par les électrons, l'expression de  $\alpha$  peut se mettre sous la forme :

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp \left( - \frac{B}{E/p} \right) \quad (\text{III.26})$$

Avec:

$p$  : pression exprimée en Torr ;

$A$  et  $B$  : deux constantes exprimées respectivement en [ $\text{Torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] et [ $\text{V} \cdot \text{Torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ]

$E/p$  : le champ réduit exprimé en [ $\text{V} \cdot \text{Torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ].

Les valeurs  $A$  et  $B$  sont déterminées expérimentalement pour chaque gaz (Tableau III.1) et elles sont considérées constantes sur un domaine de champ réduit  $E/p$ .

**Tableau III.1.** Les constantes  $A$  et  $B$  pour différents gaz; et les gammes de  $E/p$  où la formule est valide.

gaz	$A$ ( $\text{Torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	$B$ ( $\text{V} \cdot \text{Torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	Domaine de validité $E/P$ ( $\text{V} \cdot \text{Torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )
H <sub>2</sub>	5	130	150-600
N <sub>2</sub>	12	342	100-600
CO <sub>2</sub>	20	466	500-1000
Air	15	365	100-800

A partir de l'équation (III.21) donnant la condition de claquage, on aura :

$$\alpha d = \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (\text{III.27})$$

En champ uniforme la tension est fonction linéaire du champ électrique  $E$  :

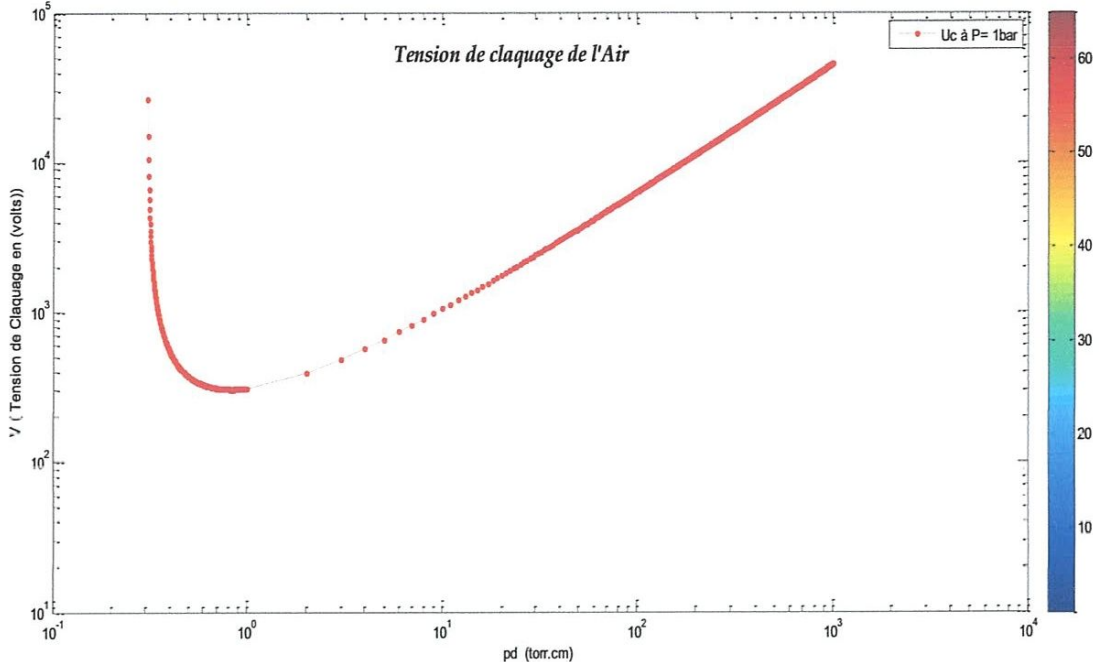
$$U = E \cdot d \quad (\text{III.28})$$

Substituons les équations (III.27), (III.28) dans (III.26), nous trouvons par la suite une relation entre la tension de claquage  $U_c$  et le produit  $pd$  exprimée comme suite :

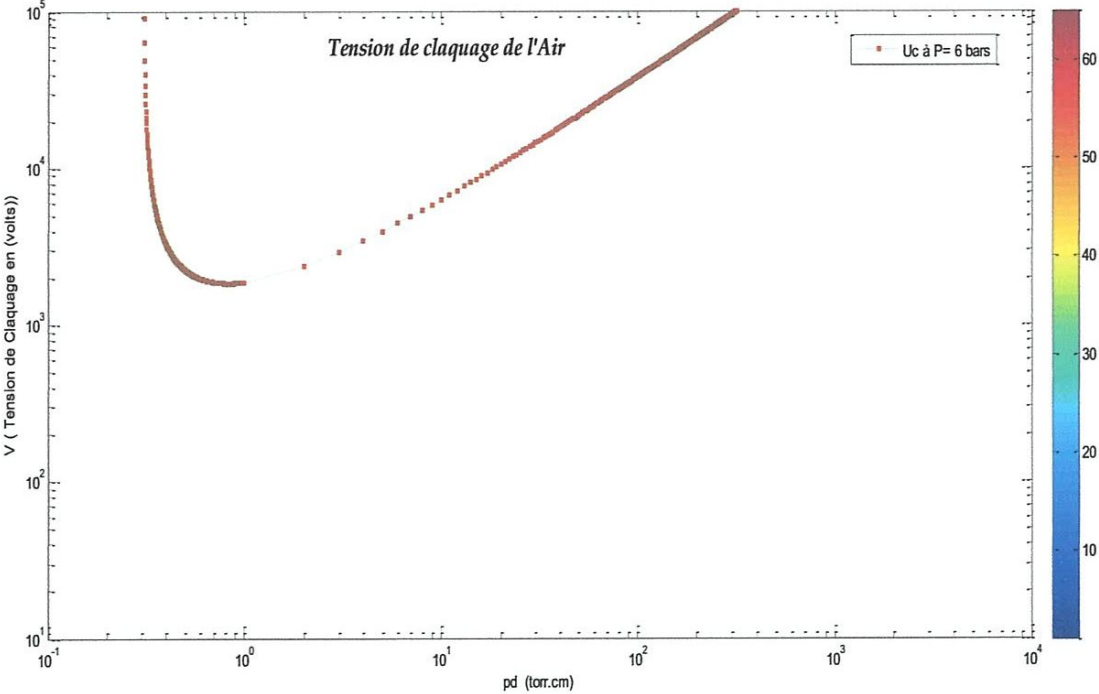
$$U_c = \frac{B \cdot Pd}{\ln \left[ \frac{A \cdot Pd}{\ln \left( 1 + \left( \frac{1}{\gamma} \right) \right)} \right]} \quad (\text{III.29})$$

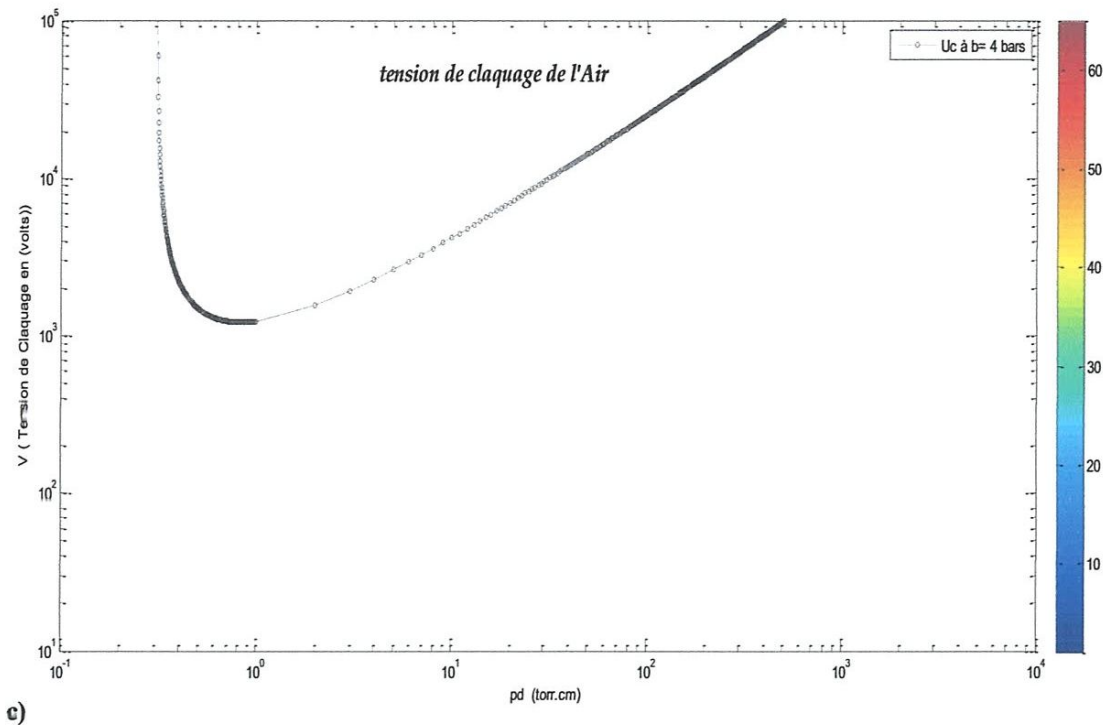


a)



b)





III.5. Tension de claquage de l'Air pour ;a) P = 1 bar, b) P = 4 bars, c) P = 6 bars.

D'après les courbes que nous avons tracées, nous observons que la tension de claquage est augmentée en fonction de l'augmentation de la pression du gaz, cela est valable pour presque tous les gaz étudiés précédemment.

### III.3. Claquage des isolants solides

#### III.3.1 : Introduction

Le claquage (ou contournement) est l'aboutissement d'une série de processus complexes et interactifs. À la différence des gaz et des liquides, le claquage des isolants solides entraîne la destruction du matériau, et par conséquent, l'arrêt de fonctionnement du composant ou système dont il fait partie.

Le claquage d'un matériau résulte de phénomènes complexes apparaissant lors de la phase de pré-claquage, rendant difficile l'énoncé d'une théorie unifiée pour expliquer le mécanisme de claquage. Cependant, c'est selon les processus de pré-claquage, qu'on classe les mécanismes de claquage des diélectriques solides. Cette classification diffère selon les auteurs et n'est que conventionnelle. En général, on distingue trois types de mécanismes de claquage des isolants solides :

- Le claquage "électrique"
- Le claquage "thermique"
- Le claquage "électromécanique"

A ceux-ci, il faut ajouter d'autres phénomènes secondaires liés à des défauts de jeunesse introduits lors de la fabrication, à des défauts apparaissant dans le temps (vieillesse) dans le volume (cavités gazeuses ou impuretés) ou à la surface du matériau, au mode opératoire et aux conditions expérimentales. Dans ces cas, on parle de claquage par ionisation (décharges partielles) et de claquage par vieillissement.

### **III.3.2. Claquage électrique**

Des idées récentes, on peut distinguer 2 groupes de théories de claquage électrique: les théories de claquage intrinsèque et les théories de claquage par avalanches. Pour le 1er groupe, c'est l'intensité du champ pour laquelle apparaît une instabilité du courant électronique dans le diélectrique qui correspond au champ critique provoquant le claquage intrinsèque. Pour le 2ème groupe, on admet comme critère de claquage l'intensité du champ électrique pour laquelle le processus de multiplication d'électrons dans le diélectrique atteint des proportions inadmissibles ; le matériau cesse d'être diélectrique et devient conducteur.

#### **III.3.2.1. Claquage électrique intrinsèque**

Les théories de claquage électrique intrinsèque considèrent un champ électrique uniforme appliqué à un diélectrique de dimensions infinies. L'influence des électrodes sur le mécanisme de claquage ainsi que l'épaisseur du diélectrique ne sont pas prises en considération. Ces hypothèses conduisent à déterminer le comportement de chaque électron pris singulièrement dans un champ électrique à l'état d'équilibre et dont la perturbation conditionne le claquage du diélectrique. D'après Fröhlich (1937) et von Hippel (1938) , seuls les électrons situés dans la bande de conduction prennent part dans le mécanisme de claquage. Ces électrons peuvent provenir d'absorption de rayonnement d'énergie importante ou des perturbations du réseau cristallin ou encore être des électrons de valence issus d'atomes (impuretés) excités pouvant être ionisés par l'énergie thermique.

La théorie de claquage intrinsèque de Fröhlich est l'une des plus simples théories de claquage. La détermination de la tenue diélectrique selon cette théorie consiste à analyser le comportement d'électrons pris singulièrement dans un champ électrique intense. On admet que la densité d'électrons de conduction dans le diélectrique est si faible que leur mouvement est seulement imposé par le champ électrique extérieur et l'action du réseau cristallin du diélectrique.



### III.3.2.2. Claquage électrique par avalanches

Les théories de claquage par avalanche suppose que l'augmentation du courant de conduction électronique est continue jusqu'à l'instant où le diélectrique commence pratiquement à conduire contrairement aux théories de claquage intrinsèque où on considère que l'augmentation du nombre d'électrons de conduction dans le diélectrique, comme un accident (évènement) brutal prenant cependant naissance dans des conditions d'équilibre.

Il existe plusieurs théories de claquage par avalanche. Ces théories sont liées à la manière d'initiation de l'avalanche électronique et au critère de claquage considéré.

L'une des premières théories de ce type fût la théorie de Zener (1934) qui considère le phénomène d'émission d'électrons selon un tunnel, d'une bande de valence à une bande de conduction du diélectrique. Le courant de tunnel électronique de Zener est intense et croît avec l'intensité du champ dans le diélectrique. Comme critère d'instabilité, on considère la valeur du champ pour laquelle la probabilité  $p$  d'apparition du phénomène tunnel augmente de 100 fois. Selon Zener

$$p = \frac{Eqm}{h} \exp \left[ \frac{mW_p}{Eqh^2} \right] \quad (\text{III.30})$$

Avec :

$E$  - intensité du champ

$q$  - charge élémentaire d'un électron

$a$  - constante caractéristique du réseau cristallin du diélectrique

$h$  - constante de PLANCK

$m$  - masse de l'électron

$W_p$  - largeur du domaine interdit du diélectrique (intervalle énergétique entre la bande de valence et la bande de conduction).

Les valeurs de  $E_0$  (rigidité diélectrique) des diélectriques cristallins calculées selon la théorie de Zener correspondent généralement aux données expérimentales. Cependant, cette théorie ne donne pas d'explication physique du mécanisme de claquage; de même qu'elle omet de donner plusieurs dépendances de  $E$  en fonction de paramètres caractéristiques du diélectrique.

Une autre théorie (Straton, 1961) considère l'initiation de l'avalanche par un électron émis par la cathode. Cette avalanche conduit au claquage du diélectrique, si le nombre d'électrons sera suffisamment important, de manière à ce que le diélectrique commence à conduire. Comme à chaque collision ionisante naît un électron, cette condition conduit donc au fait, que le nombre de



chocs électroniques ionisants (nombre de générations) soit suffisamment élevé. En considérant certaines hypothèses arbitraires, on arrive à la conclusion, qu'il faut 40 générations électroniques dans l'avalanche pour remplir cette condition. C'est de là que provient le nom de cette théorie: théorie des 40 générations ; ce qui correspond à environ  $10^{12}$  électrons (soit  $240 \approx 10^{12}$ ). Selon cette théorie :

$$E_0 = E''_{c0} [\ln(\alpha_n d / 40)]^{-1} \quad (\text{III.31})$$

Où :

$E''_{c0}$  - rigidité diélectrique caractéristique d'un diélectrique donné, dépendant de la température T analogue au cas de la rigidité diélectrique d'après le mécanisme de claquage intrinsèque.

$\alpha_n$  - facteur d'ionisation par chocs électroniques

d - épaisseur du diélectrique

D'après F. Forlani et N. Minnaja (1969), le claquage est provoqué par la multiplication des émissions de courant de la cathode lors de l'évolution de l'avalanche. En supposant que le courant d'émission électronique de la cathode est déterminé par l'équation de Fowler – Nordheim.

$$j_k = j_0 \exp \left[ -8\pi (2m^*)^{-1/2} (2hqE)^{-1} \phi^{3/2} \right] \quad (\text{III.32})$$

On obtient :

$$E_0 = E''_{c0} d^{-1/2} \quad (\text{III.33})$$

#### III.3.3. Claquage thermique

En présence d'un champ électrique, l'existence de porteurs de charge dans un matériau isolant implique celle d'un courant de conduction pouvant conduire à l'échauffement de cet isolant par effet joule. A cette source de chaleur, il faut ajouter celle due aux phénomènes de relaxation présents dans le diélectrique lorsque ce dernier est soumis à un champ alternatif. Ce qui engendre des mécanismes de pertes qui contribuent à leur tour à l'échauffement.

Si la quantité de chaleur n'est pas évacuée aussi rapidement qu'elle est produite, la température de l'échantillon augmente dans le temps à une vitesse plus ou moins grande, selon que la tension appliquée est plus ou moins importante. Le claquage thermique a lieu alors quand une accumulation importante de chaleur se produit et que la température du matériau atteint une valeur critique  $T_c$ , au-delà de laquelle le courant croît très rapidement, entraînant sa rupture totale.

L'équilibre entre la dissipation thermique et l'énergie prise au champ est décrit par l'équation différentielle suivante

$$\sigma E^2 = C_v \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(k \text{grad} T) \quad (\text{III.34})$$

Avec :

$\sigma$  - conductivité électrique

$C_v$  - capacité thermique

$k$  - conductivité thermique

Il est difficile d'obtenir une solution générale de cette équation vu que  $\sigma$ ,  $C_v$  et  $k$  sont aussi fonction de la température. Cependant, des solutions approximatives et simplifiées ont été proposées par certains auteurs pour la détermination de la tension de claquage. Celle proposée par Coelho pour les matériaux de faible épaisseur (contrairement aux autres solutions qui supposent que le matériau est plutôt d'épaisseur suffisamment grande), paraît la plus proche pour le claquage de film polypropylène (épaisseur = 15  $\mu\text{m}$ ).

Nous retenons les relations:

$$V_c = \left( \frac{dy}{e \sigma_0 \lambda} \right)^{1/2} \quad (\text{III.35})$$

Et

$$J_c = \left( \frac{e \sigma_0 y}{\lambda d} \right)^{1/2} \quad (\text{III.36})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{V}{k T_0^2} \quad (\text{III.37})$$

$V$  - énergie d'activation

$k$  - constante de BOLTZMANN

$T_0$  - température ambiante en K

$e$  - charge de l'électron

$V_c$  - tension de claquage

$J_c$  - densité de courant de claquage

$d$  - épaisseur de l'échantillon

$\gamma$  - coefficient de transfert thermique

$\sigma_0$  - conductivité à champ faible

Le calcul, sur cette base, des rigidités diélectriques des matériaux et la comparaison aux valeurs expérimentales, constituent généralement le seul moyen de vérifier si le claquage est de nature thermique. Il est évident qu'une observation directe de la variation de la température du matériau dans le temps et dans l'espace et celle de son entourage immédiat, sera le meilleur moyen de le détecter. Ceci n'est pas facile à réaliser sur le plan pratique, surtout s'il s'agit de travailler sur de petits éléments. L'utilisation de caméras infrarouge permet de suivre l'évolution de la température du matériau jusqu'au claquage.

Le claquage thermique dans les polymères est généralement évoqué, quand des essais sont effectués à haute température, où la conductivité devient importante. Mais dans ce cas, ce mécanisme n'est pas toujours simple à mettre en évidence, du fait des modifications physiques et structurales que peut introduire la température sur le matériau, et qui ont une influence directe sur la rigidité diélectrique.

#### **III.3.4. Claquage électromécanique**

Le claquage électromécanique dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques de l'échantillon. Il résulte de la conjugaison de contraintes mécanique et électrique. En effet, quand un matériau est soumis à un champ électrique, la pression électrostatique due aux attractions coulombiennes mutuelles des électrodes tend à réduire son épaisseur par déformation mécanique. Si cette pression est suffisante pour causer une déformation considérable, le champ se trouve renforcé et provoque le claquage du matériau. Dans ces conditions, la pression exercée sur l'échantillon est:

$$P = \frac{1}{2} \varepsilon \left( \frac{V}{d_0} \right)^2 \quad (\text{III.38})$$

$V$  : étant la tension appliquée et  $d_0$  l'épaisseur initiale de l'échantillon.

A l'équilibre, cette pression sera égale à la réaction élastique du matériau et on aura :



$$\frac{1}{2} \varepsilon \left( \frac{V}{d_0} \right)^2 = Y \ln \left( \frac{d_0}{d} \right) \quad (\text{III.39})$$

D'où :

$$V = d \left( \frac{2}{\varepsilon} Y \ln \left( \frac{d_0}{d} \right) \right)^{1/2} \quad (\text{III.40})$$

$Y$  est le module d'YOUNG (ou d'élasticité) du matériau et  $d$  son épaisseur après compression. Cette relation admet un maximum pour :

$$\frac{d}{d_0} = \exp \left( -\frac{1}{2} \right) = 0,6 \quad (\text{III.41})$$

Au-dessus de cette valeur, aucun état stable ne peut exister et toute augmentation de  $V$  conduit directement à une instabilité mécanique qui entraîne la rupture de l'échantillon. Dans ces conditions, le champ critique  $E_c$  et la rigidité apparente  $E_a$ , seront respectivement :

$$E_c = \frac{V_c}{d} = \left( \frac{Y}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (\text{III.42})$$

$$E_a = \frac{V_c}{d_0} = \frac{d}{d_0} E_c = 0,6 \left( \frac{Y}{\varepsilon} \right)^{1/2}$$

Les caractéristiques mécaniques d'un matériau, jouent donc un rôle important sur sa rigidité. De ce fait, pour les polymères et pour l'isolation solide d'une façon générale, le claquage électromécanique figure parmi les principaux mécanismes susceptibles de conduire au claquage. Ceci est d'autant plus avancé, quand les essais sont effectués à haute température, où la rigidité mécanique du diélectrique devient plus faible.

Les premiers travaux dans ce sens, ont été effectués par Stark et Garton (auxquels revient d'ailleurs cette théorie) sur du polyéthylène dont les caractéristiques mécaniques ont été modifiées par irradiation.



### **III.3.5. Claquage par Décharges partielles**

Il est connu depuis de nombreuses années que les décharges partielles affectent gravement les isolants solides. Elles prennent naissance aux bords des électrodes ou dans des inclusions ou cavités gazeuses que peut renfermer le matériau dès que la tension appliquée atteint la tension seuil correspondant au minimum de Paschen du gaz en présence (air ou autres). Leur action peut conduire à des transformations chimiques radicales (scission de la liaison moléculaire sous l'effet du bombardement électronique et ionique, échauffement local, création de radicaux,...) entraînant la dégradation du matériau voire sa défaillance, à la suite de l'un des processus suivants:

- Propagation à travers le matériau de canaux microscopiques (arborescence)
- Echauffement cumulatif par les décharges
- Cheminement superficiel ou contournement.

De nombreux travaux ont été effectués sur les mécanismes de claquage par décharges à court et à long terme. Dans le polyéthylène, on montre que la surface interne de la cavité est d'abord érodée par les décharges. La vitesse d'érosion augmente rapidement lorsque le champ électrique, supérieur à la valeur critique, continue à croître ; les décharges se concentrent et forment des creux profonds. Comme les décharges continuent, les creux atteignent une profondeur critique au-delà de laquelle des canaux fins partant de ces creux, se propagent à travers le matériau et causent des défauts.

Le mécanisme est tel que l'énergie libérée augmente avec la longueur du canal. Ainsi, la profondeur critique du creux est atteinte quand l'énergie libérée est suffisante pour causer la destruction rapide du matériau. Il arrive que la chaleur libérée par la décharge soit suffisante pour carboniser le canal, donc le court-circuiter et empêcher ainsi d'autres claquages. Ce cas est plus fréquent dans les isolations à papier imprégné que dans les matériaux plastiques [25].

### **III.4. Conclusion**

D'une façon générale, la tension d'amorçage des décharges dans les isolants est beaucoup moins importante que la tension nécessaire pour causer un claquage rapide ; ainsi on pourrait s'attendre à ce que la durée de vie du matériau soit à même d'être prédite avec assez de précision d'après des mesures indiquant les taux d'érosion, ou de détérioration chimique, au cours d'essais de durée relativement courte

## *Conclusion générale*

### ***Conclusion générale***

Cette étude nous a permis d'approfondir nos connaissances en premier lieu sur les types et les propriétés des matériaux isolants solides et les isolants gazeux et en second point sur les aspects physiques conduisant aux développements des décharges électriques à l'échelle microscopique et macroscopique dans ces différents isolants.

L'étude des différentes caractéristiques en particulier celles diélectriques a montré et confirmé l'avantage d'utilisation du gaz SF<sub>6</sub> dans de nombreuses applications en moyenne et haute tension, cependant la réduction des effets néfastes que provoque ce gaz est assurée par son utilisation avec d'autres gaz pour former un mélange gazeux, tout en gardant les mêmes performances diélectriques du SF<sub>6</sub> pur avec le minimum des effets négatifs.

Le SF<sub>6</sub> a pour inconvénient majeur de présenter un potentiel de réchauffement global (PRG ou GWP pour « Global Warming Potential ») de 23 900 (relativement au CO<sub>2</sub> sur 100 ans) et une durée de séjour dans l'atmosphère de 3 200 ans, ce qui le place parmi les gaz à fort pouvoir d'effet de serre.

Des mélanges de SF<sub>6</sub> et d'azote sont utilisés pour limiter l'impact du SF<sub>6</sub> sur l'environnement. En effet, l'ajout de SF<sub>6</sub> à hauteur de 10 à 20% volumiques permet d'améliorer significativement la rigidité diélectrique de l'azote.

Il existe d'autres alternatives prometteuses d'un point de vue caractéristiques électriques et PRG, comme le trifluoroiodométhane (CF<sub>3</sub>I) . En effet, le CF<sub>3</sub>I présente une rigidité diélectrique supérieure à celle du SF<sub>6</sub> et ce, aussi bien en champ homogène qu'en champ divergent, pour un PRG inférieur à 5 et une durée de séjour dans l'atmosphère de 0,005 année.

La modélisation des phénomènes de claquage, claquage des isolations gazeuses, initiation de la décharge électrique, et le claquage des isolations solides, fait sortir l'influence de quelques paramètres liés soit aux conditions climatiques environnementales, soit celles liées aux géométries et aux défauts de fabrication des isolants donc il s'agit de leur pureté.

Cette influence directement ou indirectement sur l'état d'isolement d'un diélectrique, peut nous aider de faire la sélection des bons isolants à partir de leurs caractéristiques électriques.

## *Références bibliographiques*



***Références bibliographiques***

- [1] [http://www.univ-sab.dz/fsi/L'air et ses propriétés](http://www.univ-sab.dz/fsi/L'air%20et%20ses%20propriétés).
- [2] J. M. Meek and J. D. Craggs, "Electrical breakdown of gases", Clarendon, oxford, 1953.
- [3] Encyclopédie des gaz de Air liquide, fiche de données de sécurité, 2005.
- [4] N. Azzi, "Contribution à l'étude théorique du claquage électrique dans les mélanges de Gaz électronégatifs", Thèse de doctorat, université Paul Sabatier de Toulouse, 1987.
- [5] J. Lewis et Al, "Prebreakdown and Breakdown Phenomena along PMMA surface in Vacuum and nitrogen gas stressed by 60 Hz voltage", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol.19, p. 512-518, 1984.
- [6] F. Kuffel, W S Zaengl and I Kuffel, "High voltage engineering fundamentals",
- [7]. C. L. Wadhwa, "High voltage engineering", Second edition published by new age International, New Delhi, 2007.
- [8] T. Nitta and Y. Shbuya, "Electrical breakdown of long gaps in sulphur hexafluoride", IEEE Trans. Power Apparatus and System, Vol. 90, N°3, p.1065-1071, 1971.
- [9] Complément facultatif. le Cahier technique n°188 du groupe Schneider Electric : Propriétés et utilisations du SF<sub>6</sub> dans les appareils MT et HT.
- [10] J.D. Mantilla, N. Gariboldi, S. Grob, "Investigation of the insulation performance of a new gas mixture with extremely low GWP", IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2014.
- [11] S. XIAO, "Research on Insulation Performance of SF<sub>6</sub> Substitute CF<sub>3</sub>I/CO<sub>2</sub> under Power Frequency Voltage and the Influence of Micro-moisture on CF<sub>3</sub>I", these de doctorate university Toulouse, 2016.
- [12] New Energy and industrial technology organization (NEDO) report, "Feasibility of study on application of SF<sub>6</sub> alternative gas (CF<sub>3</sub>I) to the market of electric equipment for power transmission, transformation and substation system (FY2004)", 2005.
- [13] M. Taki, D. Maekawa, H. Odaka, H. Mizoguchi and S. Yanabu, "Interruption Capability of CF<sub>3</sub>I Gas as Substitution Candidate for SF<sub>6</sub> Gas", IEEE Trans, Dielectr. Electr. Insult. Vol.14, N°2, April 2006.
- [14] S. XIAO, "Research on Insulation Performance of SF<sub>6</sub> Substitute CF<sub>3</sub>I/CO<sub>2</sub> under Power Frequency Voltage and the Influence of Micro-moisture on CF<sub>3</sub>I", these de doctorate university Toulouse, 2016.

- [15] H. Kasuya, Y. Kawamura, H. Mizoguchi, "Interruption capability and decomposed gas density of CF<sub>3</sub>I as a substitute for SF<sub>6</sub> gas", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume 17, August 2010.
- [16] <http://www.univ-sab.dz/fsi/Chapitre7> : diélectriques solides.
- [16] D. Kind, H. Karner, "High –Voltage Insulation Technology", textbook for electr. engineers Transl. from the German by Y. Narayana Rao. Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg, 1985.
- [17] J .M. George, "Verres pour l'isolement électrique", technique de l'ingénieur, Réf : D2325 v2, 2016.
- [18] K. Djedjiga, " Modélisation de la rupture diélectrique dans les céramiques à haute teneur en alumine soumises à des contraintes électrique", Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012.
- [19] A. Anton, J. L. Steinle, "Micas et produits micacés", technique de l'ingénieur, Réf : D2360 v1, 1997.
- [20] D.B. Sirdeshmukh, L. Sirdeshmukh, K.G. Subhadra, "Micro- and Macro-Properties of Solids, Thermal, Mechanical and Dielectric Properties", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [21] M. Hairour, "Etude diélectrique d'une isolation hybride gaz-solide pour appareillage haute tension", Thèse de doctorat, universités Montpellier II, 2007.
- [22] F. Beloucif, "Analyse et prédiction des seuils d'apparition des décharges couronnes dans les gaz isolants en haute tension", Thèse de doctorat, université de 8 mai 1945 – Guelma, 2017.
- [23] S. Han, J.S. Jung and H.S. Kim, "Influence of gas temperature on electrical breakdown in cylindrical electrodes", Journal of the Korean physics society, Vol.42, February 2003.
- [24] S. Han, J.S. Jung and H.S. Kim, "Influence of gas temperature on electrical breakdown in cylindrical electrodes", Journal of the Korean physics society, Vol.42, February 2003.
- [25] M. L. Coulibaly, "Caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces gaz/solide – Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale", Thèse de doctorat, université de Toulouse, 2007.