

11/620.826

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



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

**Mémoire de fin d'études**  
**pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

---

**Etude du comportement des diélectriques sous contraintes.**

---

Présenté par :  
**NADJEM Abdelkader**  
**YASSAD Mousâab**

Sous la direction de : *Dr. Boudefel Amar*

Mai 2014

# *Remerciements*

*Nous remercions vivement Mr. Boudefel A pour sa disponibilité tout au long de ce travail, nous les remercions encore pour son aide si précieux sur les plans conseils et orientations.*

*Nous tiens tout particulièrement à remercier les enseignants du département génie électrotechnique et automatique pour leur disponibilité et encouragement, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.*

*Nos reconnaissances vont aussi à messieurs les membres de jury, pour l'honneur qu'ils auront fait en acceptant de juger ce travail.*

*Je dédie ce modeste mémoire de master à:*

*A mon frère : Kamel*



NADJEM Abdelkader

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes parents*

*A mes grands parents*

*A mon frère Sohayeb et ma sœur Khaoula.*

*Très chers amis, Classe de Réseaux électriques 2014, surtout mon ami*

*Kader.*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce  
travail.*

**YASSAD Mousâab**

# *Sommaire*

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduction général</b>   | <b>1</b>  |
| <b>Chapitre I : Système d'isolation</b>                                   |           |
| <b>Introduction</b>   | <b>2</b>  |
| <b>1.1 Les matériaux diélectriques</b>                                    | <b>2</b>  |
| 1.1.1 Définition  | 3         |
| 1.1.2 Caractéristiques électriques des isolants                           | 3         |
| <b>1.2. Rupture dans les diélectriques</b>                                | <b>12</b> |
| 1.2.1 Rupture dans les gaz  | 12        |
| 1.2.2 Rupture dans les liquides   | 12        |
| 1.2.3 Rupture dans les solides  | 13        |
| <b>1.3 Facteurs influençant les propriétés diélectriques de matériaux</b> | <b>14</b> |
| 1.3.1 Fréquence   | 14        |
| 1.3.2 Température   | 16        |
| 1.3.3 Humidité et autres impuretés  | 16        |
| 1.3.4 Structure physique et chimique                                      | 16        |
| 1.3.5 Intensité du champ alternatif .                                     | 17        |
| <b>1.4 Processus d'ionisation</b>   | <b>17</b> |
| 1.4.1 Ionisation par collision  | 18        |
| 1.4.2 Photo-Ionisation  | 18        |
| 1.4.3 Ionisation thermique  | 18        |
| 1.4.4 Ionisation par les atomes métastables                               | 19        |
| <b>1.5 : Avalanche électronique</b>                                       | <b>19</b> |
| <b>1.6 Utilisations des matériaux isolants</b>                            | <b>20</b> |
| 1.6.1 Câbles électriques  | 20        |
| 1.6.2. Bobinages de machines  | 21        |
| 1.6.3 Condensateurs   | 21        |
| 1.6.4 Isolateurs  | 22        |
| 1.6.5 Appareillages haute tension   | 22        |
| <b>1.7 Diagnostic des câbles souterrains</b>                              | <b>23</b> |
| <b>1.8 Critères de la fonction d'isolation</b>                            | <b>24</b> |
| <b>Conclusion</b>   | <b>26</b> |

## Chapitre II : Les décharges partielles

|  |    |
|--|----|
| <b>Introduction</b>  | 27 |
| <b>2.1 Définitions</b>   | 28 |
| <b>2.2 Origines d'une décharge partielle</b>                       | 28 |
| <b>2.3 Classification</b>  | 31 |
| <b>2.4 Circuit équivalent des décharges partielles</b>             | 32 |
| 2.4.1 Décharges internes   | 32 |
| 2.4.2 Décharges couronnes  | 34 |
| <b>2.5 Loi de Paschen : Rappel théorique</b>                       | 35 |
| 2.5.1 Etablissement de la Loi de Paschen                           | 36 |
| 2.5.2 Premier coefficient de Townsend, définition:                 | 36 |
| 2.5.3 Deuxième coefficient de Townsend                             | 38 |
| <b>2.6. La loi de Paschen</b>                                      | 39 |
| 2.6.1. La loi de Paschen pour l'air                                | 40 |
| <b>2.7 Tension d'apparition de l'effet couronne</b>                | 41 |
| 2.7.1 Champ électrique critique (formule de peek)                  | 41 |
| 2.7.2 Tension de seuil d'apparition de l'effet couronne            | 43 |
| <b>2.8 Mécanisme de propagation</b>                                | 43 |
| 2.8.1 Propagation par ionisation                                   | 43 |
| 2.8.2 Propagation par force électrostatique                        | 44 |
| <b>2.9 Effets des DP</b>   | 45 |
| 2.9.1 : Effets d'un coup de foudre direct sur un réseau électrique | 46 |
| <b>2.10 Conséquences des décharges partielles</b>                  | 46 |
| 2.10.1 Destruction de l'isolation                                  | 47 |
| <b>2.11 Mesure de décharges partielles</b>                         | 48 |
| <b>Conclusion</b>  | 50 |

## Chapitre III: Mesures et résultats expérimentaux

|  |    |
|--|----|
| <b>Introduction</b>                          | 51 |
| <b>3.1 Claquage de l'air</b>                 | 52 |
| 3.1.1 Description du dispositif expérimental | 52 |
| 3.1.2 : Equipements                          | 53 |
| <b>3.2 Résultats et discussions</b>          | 56 |
| 3.2.1 Claquage en tension continue (DC)      | 57 |
| 3.2.2 Claquage en tension alternative (AC)   | 60 |
| <b>3.3 Interprétations</b>                   | 63 |

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| <b>Conclusion</b>                  | <b>64</b> |
| <b>Conclusion générale</b>         | <b>65</b> |
| <b>Références bibliographiques</b> | <b>66</b> |

## Introduction générale :

Les signaux transitoires générés par les systèmes électriques (de production transport, distribution et consommation) ont des origines très variées pouvant être considérés comme normaux ou matérialisant un défaut, tel est le cas des décharges partielles qui constituent une des causes les plus fréquentes de panne dans les systèmes électriques, 30% des pannes des systèmes électriques serait dues aux défauts d'isolation.

Les décharges partielles peuvent apparaître dans tous les chaînes de production-transport distribution, comme illustré, dans quelques exemples, et peuvent être dues à la fatigue et l'usure du matériel, humidité, problème de fabrication, etc.

Le taux élevé de pannes dues aux décharges partielles ainsi que la problématique complexe liée à la caractérisation des décharges partielles sont les arguments pour accorder une importance particulière à ce type de phénomènes transitoire.

Cependant, l'architecture d'analyse des signaux transitoires mis en place doit se baser sur une méthodologie générale applicable pour d'autres phénomènes transitoire rencontrés dans les systèmes électriques.

Généralement, les décharges partielles se manifestent par l'apparition de signaux transitoires très courts couvrant une large bande spectrale ainsi que d'une signature optique. Ce sont des effets qui sont à la base des techniques existantes de détection-localisation caractérisation de décharges partielles [1].

Le travail de ce mémoire est organisé en trois chapitres, comme suit:

- Dans le premier chapitre, nous allons présenter les propriétés des isolants, parfois appelés diélectriques et la théorie de la rupture électrique dans les isolants, aussi les facteurs influençant ces propriétés diélectriques.
- Le deuxième chapitre présente le phénomène de décharge partielle et leurs types nous allons présenter aussi les effets qui engendrent la dégradation irréversible des matériaux diélectriques.
- le troisième chapitre, portera des mesures et résultats expérimentaux du phénomène de calquage de l'air.
- Nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

# CHAPITRE I :

SYSTÈME D'ISOLATION : LES DIÉLECTRIQUES.

**Introduction :**

La caractérisation d'un matériau présente fréquemment un caractère de pluridisciplinarité. Selon leur application, on peut diviser les matériaux en : conducteurs et semi-conducteurs, diélectriques (ou électro- isolants) et magnétiques. Tout matériau est en général caractérisé par plusieurs constantes.

En pratique, on ne considère que les caractéristiques qui semblent les plus importantes pour une application donnée [2].

La partie qui a incité le plus d'attention et d'études dans les équipements électriques de haute tension est l'isolation. Elle est indispensable pour le bon fonctionnement de l'équipement, sa fonction principale est de garantir l'isolation électrique des éléments actifs. Sa fonction secondaire est de diffuser efficacement la chaleur produite par l'effet de Joule, afin de diminuer la température de fonctionnement et ainsi de prolonger la durée de vie des installations.

Une isolation en service est généralement exposée à une haute température, à une haute tension, à des vibrations et à d'autres actions d'ordre mécanique, ainsi que certaines conditions environnementales nocives. Ces contraintes peuvent agir ensemble ou individuellement pour dégrader les matériaux d'isolation. Par ailleurs, une isolation soumise à de hautes tensions peut se dégrader en raison de l'activité des décharges partielles. Dans ce qui suit, nous survolons quelques propriétés qui caractérisent les diélectriques [3].

Dans ce chapitre, nous examinons les propriétés des isolants, parfois appelés diélectriques et la théorie de la rupture électrique dans les isolants, aussi les Facteurs influençant ces propriétés diélectriques de matériaux.

**1.1 Les matériaux diélectriques :**

La conception et le fonctionnement de l'équipement électrique dépend des matériaux disponibles. Ainsi, les propriétés des isolants jouent un rôle crucial dans la construction des appareils électriques [3].

**1.1.1 Définition :**

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée :  $10^8$  à  $10^{16}$   $\Omega.m$ , car ils contiennent très peu d'électrons libres. 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 tension continue. Autrement dit, sa résistance en CC doit être infiniment grande. Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en HT continue. Le courant passant à travers un isolant en HT continue est également constant et est appelé courant résiduel. En HT alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif [4].

**1.1.2 Caractéristiques électriques des isolants :****a. La permittivité diélectrique (La constante diélectrique) :**

Un matériau isolant est un matériau diélectrique, c'est-à-dire, qui ne conduit pas ou très peu de courant électrique.

D'un point de vue électrique, il est caractérisé par sa permittivité.

Cette dernière caractéristique reflète l'intensité des mécanismes de polarisation dans le matériau.

Le phénomène de polarisation provient en général de l'orientation d'un dipôle électrique, induit ou permanent, en présence d'un champ appliqué.

Pour un diélectrique soumis à une tension continue, la densité de charge totale ( $D$ ) qui correspond normalement à la somme vectorielle de la densité sous vide ( $D_0$ ) et de la densité surfacique ( $D = \sigma_p \cdot n$ ) reliée à la polarisation due aux dipôles est exprimée par :

$$D = D_0 + P \quad (1.1)$$

Si on tient compte du fait que les matériaux utilisés en électrotechnique sont généralement des diélectriques linéaires, la polarisation  $P$  peut s'écrire donc comme :

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (1.2)$$

Où ( $\chi$ ) est la susceptibilité électrique du diélectrique et  $E$  est le champ électrique.

La densité de charge totale  $D$  devient alors :

$$D = D_0 + P = \epsilon_0 (1 + \chi) E = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (1.3)$$

$\epsilon_r$  : est appelée permittivité relative ou constante diélectrique du matériau. Ce paramètre quantifie l'importance des mécanismes de polarisation. Pour minimiser les pertes diélectriques dans les systèmes d'isolations, on cherche habituellement des matériaux de faible permittivité relative.

La rupture de l'isolation, dénommée claquage, peut être due à différents mécanismes tels que le claquage électromécanique, le claquage thermique ou par décharges.

Le claquage électromécanique est causé par la pression électrostatique exercée par les électrodes sur un isolant de faible épaisseur. Une pression importante entraîne une diminution de l'épaisseur de l'isolant et donc une augmentation du champ électrique, ce qui augmente encore la pression. Un emballement peut donc conduire à la rupture mécanique en compression du matériau. Cet effet est amplifié pour des températures élevées ou lors d'un échauffement du matériau mais reste cependant très rare dans les systèmes électrotechniques.

Le claquage thermique est dû à une forte conductivité électrique du matériau. Cet effet est généralement observé pour de fortes températures. La densité de courant occasionne ainsi plus de pertes et crée ainsi un échauffement par effet Joule. La conductivité augmente ainsi, créant un emballement thermique. Ce phénomène peut être observé dans les films minces de condensateur.

Le claquage par décharges est entraîné par la propagation d'une arborescence électrique. Les défauts dans l'isolant ou à l'interface isolant/électrode génèrent une cavité ou un renforcement du champ local.

Des courants impulsionnels sont observés et correspondent aux décharges partielles dans les cavités. Cet effet dégrade le matériau et une structure filamentaire ramifiée constituée de micro-canaux se forme : l'arborescence électrique.

La propagation des arborescences électriques ainsi que leur modélisation ont fait l'objet de nombreux travaux [5].

La permittivité absolue  $\epsilon$  est le produit de la permittivité relative  $\epsilon_r$  par la constante diélectrique du vide  $\epsilon_0$  :

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (1.4)$$

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

Pour l'air, les gaz et le vide,  $\epsilon_r = 1$ . Donc,  $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ .

Pour tous les autres isolants,  $\epsilon_r > 1$ .

Où  $\epsilon_r$  est la permittivité relative et  $\epsilon_0$  représente la permittivité du vide qui est égale à  $8,85 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ .

La capacitance d'un condensateur ne dépend pas seulement de sa forme ou de ses dimensions, mais aussi de la nature du diélectrique qui sépare ses plaques. Si l'on intercale un isolant tel que le verre, le papier ou le mica entre les plaques d'un condensateur, sa capacitance devient plus grande que si l'isolant est de l'air.

La permittivité diélectrique d'un isolant est le rapport entre la capacitance d'un condensateur construit avec cet isolant et la capacitance qu'il aurait si cet isolant était remplacé par le vide.

La permittivité diélectrique est donc une propriété de l'isolant même. Ainsi, la présence du papier qui a une constante diélectrique de l'ordre de 2,5 augmenterait de deux fois et demie la capacitance d'un condensateur auparavant isolé à l'air. Le tableau 1.1 donne les valeurs approximatives de la constante diélectrique  $\epsilon$  de quelques isolants usuels, ainsi que leur rigidité diélectrique [6].

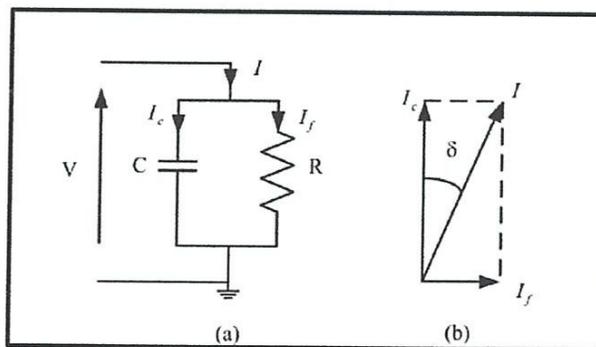
| Isolants       | Constante diélectrique | Rigidité diélectrique kV/mm |
|----------------|------------------------|-----------------------------|
| Le vide        | 1                      | Infinité                    |
| Air            | 1                      | 3                           |
| Papier         | 2,5                    | 6                           |
| Mylar          | 3                      | 400                         |
| Huile isolante | 2,2                    | 10                          |
| Caoutchouc     | 4                      | 12 à 20                     |
| Mica           | 7                      | 40 à 240                    |
| Verre          | 6                      | 100                         |
| Eau pure       | 80                     | -                           |

Tableau 1.1 : propriétés des isolants.

**b. Facteur de dissipation :**

Le facteur de dissipation aussi appelé  $\tan(\delta)$  quantifie les pertes diélectriques qui sont généralement fonction de la présence de contaminants susceptibles d'être ionisés. La mesure de ce facteur constitue un outil commode pour l'évaluation de la qualité de l'isolation à haute tension.

Une isolation est souvent représentée par le circuit équivalent de la Figure 1.1. Ce dernier est constitué d'une résistance modélisant les pertes dans le diélectrique, en parallèle avec une capacité.



**Figure 1.1 : a) Circuit équivalent b) Diagramme de Fresnel.**

Le facteur de dissipation  $\tan(\delta)$  est défini comme le rapport du courant de fuite ( $I_f$ ) sur le courant de charge ( $I_c$ ).

$$\tan(\delta) = \frac{I_f}{I_c} = \frac{1}{\omega RC} \quad (1.5)$$

En termes de propriétés du diélectrique, dans le cas simple où une isolation peut être représentée par un circuit tel que celui illustré à la Figure 1.1a, le facteur de dissipation peut être écrit sous la forme (Bartnikas et Srivastava, 2003) :

$$\tan(\delta) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon'} \quad (1.6)$$

Où :

$\sigma$ : La conductivité du diélectrique [ $(\Omega \cdot m)^{-1}$ ],

$\omega$ : La pulsation de la tension appliquée [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$\epsilon'$ : La partie réelle de la permittivité complexe [ $\text{Fm}^{-1}$ ],

$\epsilon''$ : La partie imaginaire de la permittivité complexe [ $\text{Fm}^{-1}$ ].

La puissance des pertes dissipées dans le diélectrique est proportionnelle au  $\tan(\delta)$ , c'est pourquoi il est important de choisir pour une isolation, un matériau à faible facteur de dissipation [3].

### c. La rigidité diélectrique - phénomène de claquage :

La rupture diélectrique ou claquage électrique (ou encore electrical breakdown) est un phénomène commun aux diélectriques qui perdent leur propriété isolante, ce qui se traduit par l'apparition brutale d'un courant lors de l'application d'une tension donnée pendant un temps donné. L'équivalent mécanique pourrait être illustré par la rupture d'une poutre soumise à une contrainte. Les défauts présents dans les matériaux lors de leur élaboration sont souvent pointés du doigt comme précurseurs du claquage [7], on définit la rigidité diélectrique de l'isolant par la valeur maximale de champ électrique (champ critique  $E_c$ ) qui peut soutenir avant de claquer, au-dessous de cette valeur, toutes les mesures effectuées sont des mesures non destructrices [28].

La rigidité diélectrique est une propriété d'un matériau isolant qui caractérise sa qualité à s'opposer à la décharge disruptive. Elle peut être définie comme la contrainte électrique maximale que peut supporter une isolation. Elle est analogue à la résistance à la rupture d'un matériau en mécanique. La rupture ou le claquage électrique n'est pas régi par la tension seule. Elle dépend du champ électrique, tout comme la contrainte normale dans une poutre en traction qui n'est pas uniquement fonction de la force appliquée, mais fonction de la force par unité de section transversale.

Le champ électrique ( $E$ ) [ $\text{kV mm}^{-1}$ ] dans une géométrie d'électrodes parallèles est donné par :

$$E = \frac{V}{d} \quad (1.7)$$

Où  $V$  et  $d$  sont respectivement la tension et la distance entre les électrodes.

Si la tension appliquée est augmentée progressivement, il y aura une tension à laquelle la rupture électrique se produira, c'est-à-dire, au cours de laquelle une étincelle transitera entre les deux électrodes. À l'aide de l'équation (1.7), on pourra alors calculer la rigidité diélectrique ou le champ disruptif du matériau isolant.

Afin d'élucider ce phénomène, considérons un isolant mis entre deux armatures planes, connectées à une source de tension variable (voir Figure 1.2). Lorsque la tension est nulle, les électrons du diélectrique décrivent une orbite circulaire autour des noyaux. Au fur et à mesure que la tension appliquée augmente, cette trajectoire devient plus elliptique sous l'effet de l'attraction et du repoussement des électrons par les armatures positive et négative respectivement. Cependant, l'isolant ne peut supporter des tensions croissantes indéfiniment.

À une certaine tension limite, cette force exercée dans le diélectrique devient capable d'arracher des électrons du cortège électronique. Le matériau qui était presque dépourvu d'électrons libres devient rempli d'électrons arrachés et prend un caractère de conducteur.

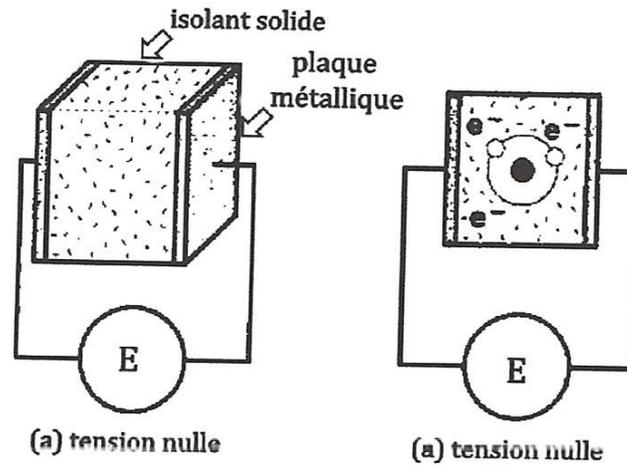
Plusieurs facteurs physiques, électriques et chimiques influencent la résistance à la rupture électrique des matériaux isolants. Parmi ces facteurs, on peut citer : la température, la pression, la présence d'humidité ou de contaminants, la géométrie, le volume d'isolant, etc. En pratique, il est important de noter que ces paramètres n'agissent jamais seuls. Ce qui rend ainsi leur analyse plus complexe.

Le calcul des champs de rupture est d'une importance considérable pour l'ingénierie des équipements haute tension [3].

La fonction principale d'un diélectrique est d'empêcher le passage du courant lorsqu'on le soumet à une tension électrique. Cependant, ce diélectrique ne peut supporter des tensions croissant indéfiniment ; à une certaine tension, il se produit un phénomène de claquage où la substance perd ses propriétés isolantes.

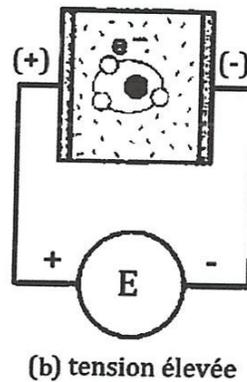
Afin d'expliquer ce phénomène, considérons un isolant solide placé entre deux plaques métalliques, raccordées à une source de tension variable.

Lorsque la tension est nulle, les électrons tournant autour des noyaux de chaque atome d'isolant suivent une orbite circulaire (Fig. 1.2 a).



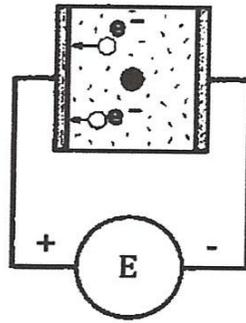
**Figure 1.2 (a) : un isolant placé entre deux plaques métalliques.**

À mesure que la tension augmente, ces électrons sont attirés vers la plaque positive et repoussés par la plaque négative de sorte que l'orbite décrite tend à s'aplatir et à prendre la forme d'une ellipse, (Fig. 1.2 b).



**Figure 1.2 (b) : Le déplacement des électrons.**

Si l'on continue à augmenter la tension, la force d'attraction devient assez grande pour arracher les électrons de leur orbite autour du noyau (Fig. 1.2 c). Le même phénomène se produit pour des centaines de milliards d'atomes, si bien que l'isolant qui était presque dépourvu d'électrons libres se trouve maintenant rempli d'électrons détachés comme dans le cas d'un conducteur. Il se produit alors un court-circuit entre les plaques et l'isolant se détruit.



(c) tension de claquage

*Figure 1.2 (c) : La libération des électrons.*

La tension de claquage requise pour provoquer cette avalanche d'électrons dépend de la nature de l'isolant et de son épaisseur. Le rapport entre la tension de claquage et l'épaisseur de l'isolant s'appelle rigidité diélectrique.

Elle est exprimée généralement en kV/mm ou en MV/m [5].

#### **d. La résistivité électrique :**

Lorsque l'on applique une tension à un isolant, aussi bon soit-il, on provoque la circulation d'un très faible courant, dont une partie passe à travers son volume et une autre passe en surface. La résistivité surfacique varie beaucoup avec l'humidité et la propreté de la surface par contre, la résistivité volumique, habituellement exprimée en térahom-mètre ( $10^{12}\Omega\cdot\text{m}$ ) est assez constante. Ces résistivités prennent une importance capitale lorsque les isolants sont soumis à des tensions très élevées comme dans le cas des bornes de transformateurs de lignes à haute tension.

elles ont la propriété de caloripporteur et de lubrifiant contre l'oxydation des conducteurs, elles ont aussi l'avantage de se régénérer si une rupture survient. Les huiles fortement purifiées ont des tenues diélectriques qui peuvent atteindre  $100 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ . Cependant, cette tenue supérieure s'affaiblit avec la présence de contaminants tels que des gouttelettes d'eau, des impuretés ou des bulles gazeuses. Ces facteurs augmentent la possibilité de l'activation des décharges partielles.

L'expérimentation a montré que la dégradation des huiles isolantes est hautement dépendante de la température. Selon la qualité des huiles, le processus de dégradation peut s'enclencher même à des conditions opératoires normales avec des températures supérieures à  $60^\circ\text{C}$ . Aussi on peut ajouter que la quantité de gaz dissous ainsi que la mobilité des ions et des électrons (conséquence de l'abaissement de la densité et de la viscosité de l'huile) augmentent avec la température, déclenchant ainsi des décharges partielles et des réactions chimiques avec le milieu ambiant ce qui peut conduire au claquage.

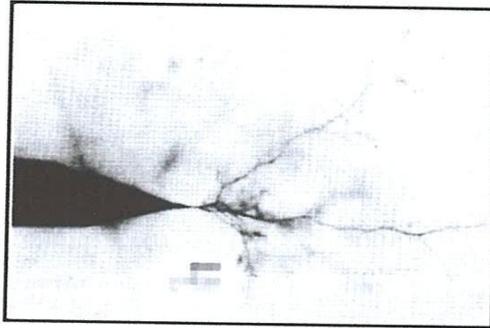
### 1.2.3 Rupture dans les solides :

Les matériaux solides isolants sont souvent présents dans les équipements électriques. Ils sont généralement constitués de polymères organiques tels que les résines d'époxy, le polyéthylène, le papier, etc. Ils ont de bonnes propriétés diélectriques, pouvant atteindre  $1000 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ , leur rigidité est la meilleure qui soit. Mais la présence de défauts tels que des impuretés, des cavités gazeuses ou des aspérités condamne de façon très remarquable cette tenue électrique.

Le claquage des diélectriques solides est un phénomène destructif, complexe qui implique plusieurs mécanismes de dégradation (électronique, thermique et mécanique). Il modifie de façon irréversible la structure du matériau. Comme pour les gaz et les liquides, la rupture diélectrique des solides se rattache à plusieurs paramètres, physiques, électriques et chimiques tels que la géométrie et la structure des échantillons, les paramètres environnants (température, contraintes mécaniques), ainsi que la procédure d'application de la tension.

Dans la plupart des cas, la rupture va survenir le long d'une surface, ou encore être causée par la carbonisation et l'érosion du matériau dues à des décharges partielles dans

des cavités gazeuses ou encore se propager à partir d'un défaut suivant une structure arborescente appelée arbre électrique. La Figure 1.4 illustre la propagation d'un arbre électrique dans le polyéthylène.



*Figure 1.4 : Propagation d'un arbre électrique dans le polyéthylène [3].*

### 1.3 Facteurs influençant les propriétés diélectriques de matériaux :

La permittivité et le facteur de dissipation diélectriques mesurés d'un matériau sont affectés par divers paramètres physiques externes ou internes tels que fréquence, température, intensité du champ électrique, rayonnements ionisants, humidité et chimique.....

#### 1.3.1 Fréquence :

En général, les propriétés diélectriques des matériaux varient considérablement avec la fréquence du champ électrique appliquée. L'apparition des pertes diélectriques peut être expliquée comme suit: aux très basses fréquences, la polarisation suit le champ alternatif, ce qui fait que sa contribution à la constante diélectrique est maximale et les pertes n'apparaissent pas. Aux fréquences très élevées, le champ alterne trop vite pour que la polarisation puisse augmenter et il n'y a aucune contribution à la constante diélectrique aucune énergie n'est perdue dans le milieu. Mais quelque part entre ces deux extrêmes, la polarisation commence à prendre du retard par rapport au champ électrique d'où dissipation de l'énergie. Le facteur de pertes atteint une valeur maximale à une fréquence  $f_m$ , liée au temps de relaxation caractéristique par la relation:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_m} = \frac{1}{\omega_m} \quad (1.9)$$

L'équation typique décrivant ce modèle simple de relaxation diélectrique est l'équation de dispersion de Debye

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} - j \frac{(\varepsilon_s + \varepsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}. \quad (1.10)$$

L'équation de Debye peut être écrite sous différentes formes selon la caractéristique expérimentales cherchée.

Plusieurs types de polarisation peuvent être décrits qualitativement de la même manière et c'est pourquoi, dans la plupart des cas, on peut appliquer l'équation de Debye.

Il faut cependant rappeler que cette équation a été établie spécifiquement pour le cas de la relaxation dipolaire. L'inconvénient de ce modèle est qu'il ne considère qu'un seul temps de relaxation et omet les interactions moléculaires alors que les diélectriques dipolaires réels correspondent rarement à ce modèle. De ce fait, on ne peut pas toujours décrire le phénomène de relaxation à l'aide de cette équation simple de Debye, car bien souvent les diélectriques se caractérisent par plusieurs temps de relaxation, comme c'est le cas par exemple des substances macromoléculaires, et des composites. Cole-Cole, Davidson-Cole ainsi que d'autres chercheurs ont proposé des modifications de l'équation de Debye en y introduisant des exposants empiriques menant à une augmentation du nombre de temps de relaxation pris en considération.

Néanmoins, toutes ces tentatives de description des phénomènes de dispersion et de relaxation diélectrique n'expliquent pas la complexité des phénomènes et relation s'observés pour un grand nombre de corps solides, surtout dans le spectre des basses fréquences. Il semble que les processus résultant des interactions entre plusieurs molécules chargées et responsables de la polarisation du diélectrique, jouent un rôle fondamental. Par conséquent, la description des mécanismes physiques (à l'échelle microscopique) impliqués dans les propriétés diélectriques des matériaux demeure toujours ouverte. Et la dépendance exponentielle du courant  $i(t)$  ou de la polarisation du temps, ne sont pas les seules descriptions possibles de ce problème. Déjà au début du siècle

dernier, une loi exponentielle, connue sous le nom de loi de Curie- von Schweidler, avait été proposée:

$$i(t) \sim t^{-n} \quad (1.11)$$

Certains auteurs, en particulier R.M. Hill, A.K. Jonscher et L.A. Dissado, ont remarqué que cette loi possède un caractère universel. Ces auteurs ont présenté un modèle universel d'interactions de plusieurs corps, en passant du domaine du temps au domaine de la fréquence, pour obtenir des équations légèrement différentes pour des intervalles de basses et hautes fréquences.

### 1.3.2 Température :

L'amplitude d'un matériau diélectrique à de la température. Par conséquent, les fréquences correspondant aux maximum de l'indice de pertes (et ainsi à ceux du facteur de dissipation diélectrique) varient avec la température. Il s'ensuit que le coefficient de température de l'indice de pertes peut être positif ou négatif selon la position du maximum de l'indice de pertes par rapport à la température de mesure.

### 1.3.3 Humidité et autres impuretés :

Le degré de polarisation est augmenté par l'absorption d'eau ou la formation d'une pellicule d'eau à la surface du diélectrique, ce qui affecte la permittivité, le facteur de dissipation et la conductivité en courant continu. Le conditionnement des éprouvettes est, de ce fait, d'une importance capitale et la régulation du degré d'humidité, tant avant que pendant l'essai, est indispensable pour l'interprétation correcte des résultats d'essai.

Le degré de polarisation dépend aussi des impuretés introduites par contamination physique ou par des ingrédients chimiques, par exemple solvants ou plastifiants. Par conséquent, on doit s'assurer que le matériau à essayer n'est pas affecté ou ne l'est que de façon connue par les opérations de prélèvement d'éprouvettes ou bien par des traitements appliqués ensuite, par exemple à des températures élevées.

### 1.3.4 Structure physique et chimique :

La direction du vecteur de polarisation du champ électromagnétique par rapport à la structure de l'éprouvette exerce une forte influence sur le résultat de mesure. Des résultats de mesure différents peuvent être obtenus à cause du manque d'homogénéité (comme

dans les stratifiés) ou de l'anisotropie, par exemple dans le cas des cristaux, sauf si toutes les mesures sur les éprouvettes sont effectuées en étant rapportées de la même façon à une caractéristique indentifiable du matériau.

Des éprouvettes ayant la même composition chimique mais de structures chimiques différentes comme des résines durcissables soumises à des conditions différentes de durcissement ou de polymères polymérisés à des degrés différents donneront également des résultats différents.

### 1.3.5 Intensité du champ alternatif :

Généralement la permittivité et le facteur de dissipation diélectrique ne dépendent pas de l'intensité du champ tant qu'aucune décharge partielle ne se produit dans le diélectrique.

Toutefois dans le cas des matériaux ferroélectriques, un effet de variation en fonction du champ peut encore être observable aux fréquences inférieures du spectre hyperfréquence, mais il disparaît rapidement lorsque la fréquence croît [2].

### 1.4 Processus d'ionisation :

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.

On donne énergies d'ionisation de quelques gaz dans le tableau 1.2.

| Molécules        | $W_i$ (<br>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 1.2 : Les énergies d'ionisation de quelques gaz.

**1.4.1 Ionisation par collision :**

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

$$\text{Avec } W_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.12)$$

$m$ : Masse de la particule

$v$ : vitesse de la particule

\* Si  $W_c \geq W_i \rightarrow$  ionisation de l'atome ;



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.

**1.4.2 Photo-Ionisation :**

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

\* Si  $W_p \geq W_i \rightarrow$  photon-ionisation



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

\* Si  $W_p$  légèrement inférieur à  $W_i \rightarrow$  photon-excitation.

**1.4.3 Ionisation thermique :**

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

\* Si  $W_{th} \geq W_i \rightarrow$  ionisation



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

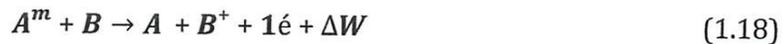
\* Si  $W_{th}$  légèrement inférieur à  $W_i \rightarrow$  excitation



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.

#### 1.4.4 Ionisation par les atomes métastables :

Un métastable  $A^m$  est un atome excité qui garde assez long temps 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 [4].

### 1.5 : Avalanche électronique :

Nous considérons un gaz où un électron libre (électron germe) est soumis à un champ électrique  $E$ . Sous l'action de la force électrostatique  $E q F = (q \text{ étant la charge en Coulomb et } E \text{ le champ électrique})$ , il est accéléré et acquiert une certaine énergie. Si cette énergie est suffisamment grande, l'électron peut ioniser les atomes (ou les molécules) du gaz lorsqu'il entre en collision avec eux pour créer de nouveaux électrons libres. Ce phénomène d'ionisation est opposé au phénomène d'attachement des électrons par les molécules du gaz [26].

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

1. Electron primaire: crée par ionisation grâce à des agents naturels tels que les rayonnements cosmiques et la radioactivité de la terre.
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  $A_1$  et  $A_2$  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 [8].

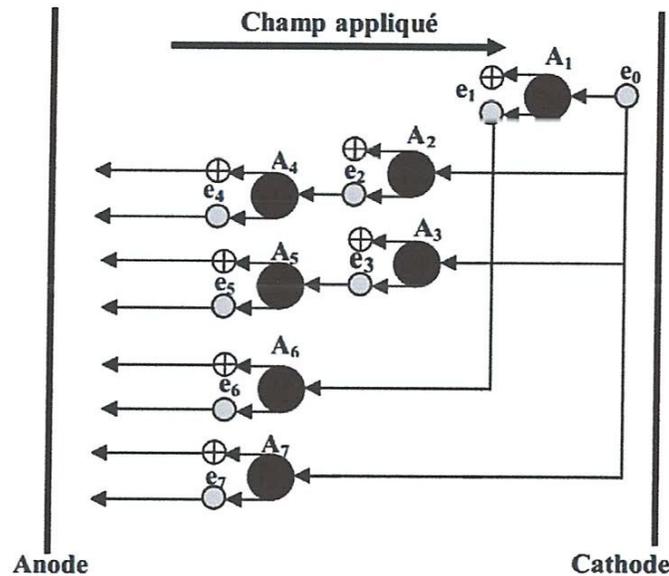


Fig.1.5 : Avalanche électronique par ionisation.

## 1.6 Utilisations des matériaux isolants :

On peut utiliser les isolants dans plusieurs composants et appareillages électriques.

### 1.6.1 Câbles électriques :

Un câble est constitué d'une âme conductrice métallique (Cu ou Al) recouvert d'un isolant, d'un écran et d'un revêtement extérieur, complété si besoin est par une gaine d'étanchéité par une armure.

L'enveloppe isolante (thermoplastique et élastomères) :

- PVC : Polychlorure de vinyle
- PE : Polyéthylène
- PR : Polyéthylène réticulé
- EPR : Ethylène

- Caoutchouc silicone

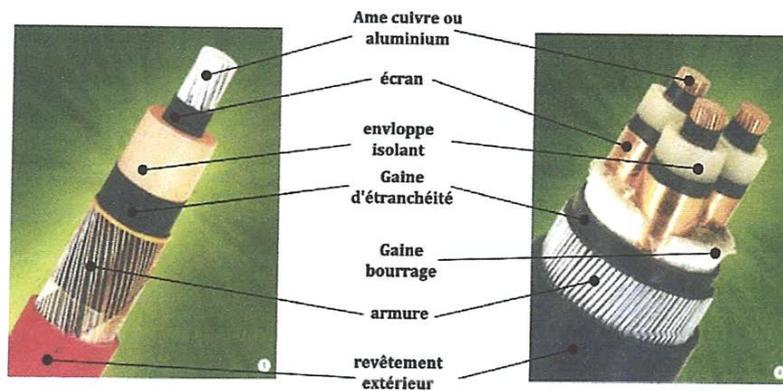


Fig.1.6 : Les différentes matières utilisées pour l'isolation d'un câble.

### 1.6.2. Bobinages de machines :

- *Basse tension* : fils conducteurs émaillés
- *Haute tension* : barres conductrices isolées par du papier, mica, verre, bakélite, résine (enrobage, imprégnation).

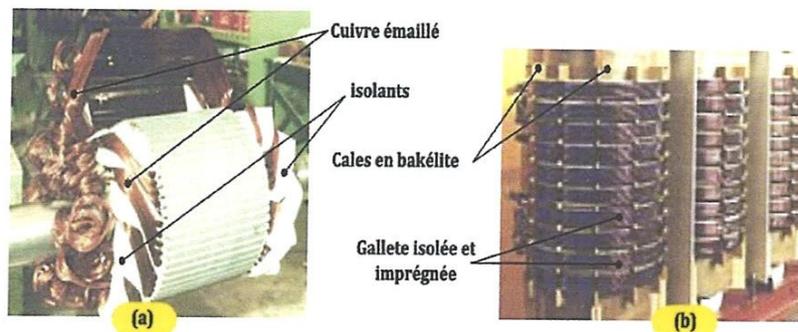
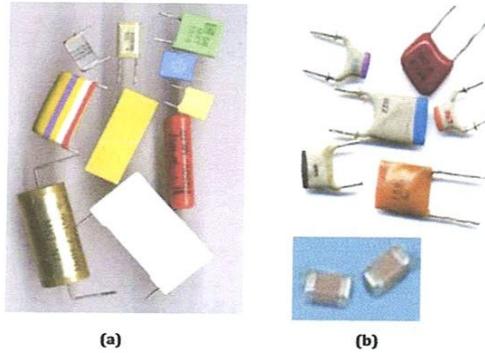


Fig.1.7 (a) : rotor bobiné de moteur asynchrone (b) : transformateur triphasé.

### 1.6.3 Condensateurs :

Schématiquement, un condensateur est formé d'un diélectrique ( $\epsilon_r > 1$ ) serré entre deux électrodes.

Les diélectriques isolants utilisés sont suivant les technologies en céramique, papier, verre mica ou plastique.

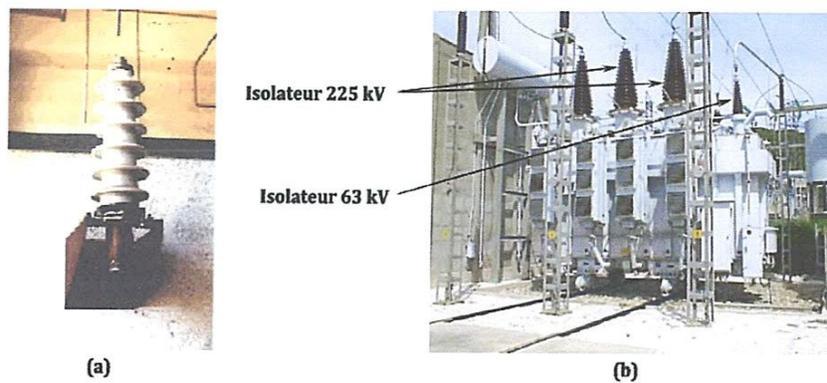


**Fig.1.8 (a) : condensateur plastique. (b) , condensateur céramique.**

#### 1.6.4 Isolateurs :

Ils sont en verre ou en porcelaine et sont utilisés pour isoler :

- Les bornes de sortie des appareillages haute tension (sectionneur, disjoncteur, transformateur, matériel roulant...).
- Les câbles haute tension des pylônes de transport d'énergie électrique.



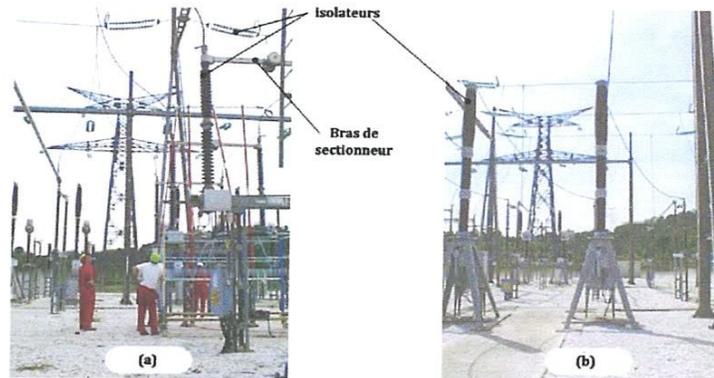
**Fig.1.9 (a) : Isolateur de tramway. (b) : transformateur 225/63 kV immergé dans l'huile.**

#### 1.6.5 Appareillages haute tension :

L'isolement interne est renforcé par un isolant supplémentaire :

- Solide : résine, élastomère (électronique haute tension).

- Liquide : huile minérale, askarel (interdit depuis 1986) dans les transformateurs de puissance.
- Gaz : SF<sub>6</sub> dans les disjoncteurs hauts tension [9].



*Fig.1.10 (a) : sectionneur 63kV. (b) : disjoncteur 63 kV au SF<sub>6</sub>.*

### 1.7 Diagnostic des câbles souterrains :

Une grande majorité des pannes et des coupures d'électricité sont dues à des défauts des câbles souterrains. Les origines de ces défauts sont variées et peuvent se scinder en 5 classes.

1. Influences externes : dommages mécaniques, réactions chimiques, . . . sont tant d'attaques externes contre lesquelles les couches de protection du câble sont censées résister.
2. Défauts de production : on observe fréquemment l'inclusion de cavités, d'impuretés dans l'isolant des câbles lors de leur production.
3. Application incorrecte : sous estimation du courant maximal, de la tension, de la résistance thermique de l'environnement, . . .
4. Installation incorrecte : un travail bâclé des ouvriers responsables de la pose du câble n'est qu'un exemple parmi d'autres.
5. Vieillesse de l'isolation.

La durée de vie d'un câble n'est donc jamais illimitée. Tôt ou tard se pose la question de son remplacement ou du moins de sa maintenance. Naïvement, on pourrait imaginer remplacer un câble souterrain après un certain nombre d'années de service (par exemple T

= 30 ans). Cette solution est loin d'être optimale car la durée de vie effective d'un câble concorde rarement avec T.

Dès lors, on est parfois amené à remplacer du matériel trop tôt si celui-ci n'a pas encore atteint ses derniers retranchements. Dans d'autres cas par contre, on le remplace trop tard (lorsqu'une panne est déjà apparue).

Les exploitants actuels de réseaux se concentrent plutôt sur la gestion des ressources afin de réduire les coûts, de retarder les investissements et d'optimiser la gestion technique tout en maintenant un haut niveau de fiabilité et de qualité. Cette philosophie les a menés à définir la notion de Maintenance Basée sur la Condition.

Ce type de maintenance s'organise en fonction de l'état du matériel et en exige par conséquent un diagnostic en temps réel.

Dans le cas des câbles de moyenne tension, la Maintenance Basée sur la Condition permet de remplacer un câble devenu obsolète au moment opportun, i.e. assez tôt pour éviter une panne mais pas trop tôt ! Pour que ce soit possible, il convient de détecter toute apparition d'indices révélateurs de l'état (et donc du stade de vieillissement) du câble concerné. Nous verrons que la plupart des défauts d'isolation se manifestent par des décharges partielles. Aussi comprenons-nous directement tout l'intérêt de mesurer l'activité de ces décharges pour évaluer la qualité de l'isolant d'un câble [10].

### 1.8 Critères de la fonction d'isolation :

Il en existe plusieurs types. Les plus répandues sont les lignes bifilaires (composées de deux fils parallèles) et les câbles coaxiaux, où le signal est transporté par un fil central, entouré d'une gaine métallique servant de référence de tension (de masse) [24].

Les matériaux isolants utilisés en électrotechnique répondent à un cahier de charges incluant, entre autres, la fiabilité de la fonction d'isolation en environnement sévère (humidité, température,...). La température est l'un des principaux facteurs de vieillissement des isolants (Loi d'Arrhenius). On définit ainsi la capacité thermique du matériau. Les classes thermiques établissent la tolérance du matériau selon les plages de températures de fonctionnement. En outre, il existe d'autres types de contraintes

liées aux paramètres de fonctionnement. Ainsi, sous contraintes combinées, de nombreuses lois existent.

La prise en compte des effets de DP est établie par une loi, qui évalue la durée de vie [11].

Les conducteurs sont isolés avec du papier, du coton, du bois, du PVC, du caoutchouc, des thermoplastiques ...

Une fois la machine construite, on l'étuve afin de supprimer l'humidité puis on l'imprègne avec des vernis ou des résines, suit éventuellement une phase de cuisson.

Les différents isolants répondent à un cahier des charges incluant la valeur de la tension électrique à supporter, la température de fonctionnement, les contraintes fonctionnelles et d'agencement de l'isolant dans la machine. Tous les facteurs de vieillissement thermique, électrique, mécanique et environnementaux ont un impact sur la durée de vie de tout type de machine, mais l'importance de l'un vis-à-vis des autres varie avec le type de machine et les conditions d'utilisation. C'est la qualité de ses isolants qui fait la qualité d'une machine, c'est par vieillissement puis destruction par claquage (amorçage d'un arc à travers l'isolant) que prend fin la vie d'une machine électrique.

La norme admet que pour les petites machines basse tension bobinées en vrac, la dégradation est essentiellement due à l'effet de la température et de l'environnement ; les machines de moyennes à grandes dimensions, utilisant des enroulements préformés sont également affectés par la température et l'environnement, mais les contraintes électriques et mécaniques peuvent également constituer un facteur de vieillissement important [12].

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons vu un aperçu sur les propriétés diélectriques des matériaux tel que la permittivité diélectrique, le Facteur de dissipation, La rigidité diélectrique et la résistivité (ou la conductivité) électrique, ils apparaissent comme des paramètres importants pour caractériser les matériaux diélectriques et le domaine d'application des isolants.

Également, nous avons présenté la théorie de la rupture électrique dans les isolants, aussi les Facteurs influençant ces propriétés diélectriques de matériaux.

Dans le prochain chapitre nous présenterons le phénomène de décharge partielle et leurs types, nous allons présenter aussi les effets qui engendrent la dégradation irréversible des matériaux diélectriques.

# CHAPITRE II :

## LES DÉCHARGES PARTIELLES.

**Introduction:**

Les réseaux de distribution et de transport de l'énergie électrique sont constitués de lignes aériennes, de câbles souterrains et de postes. Depuis 1994, la plupart des compagnies d'électricité ont d'ailleurs pris la décision de ne plus établir de nouvelles liaisons aériennes en deçà de 150 kV. A terme donc, tout le réseau de distribution et progressivement celui de répartition se fera en câbles souterrains. Certes, les investissements liés à l'installation de nouveaux câbles sont parfois prohibitifs. Mais en contrepartie, leur impact environnemental et esthétique est bien moindre que celui des lignes aériennes. Dans cette optique, les câbles souterrains ont pris et prendront encore une ampleur certaine.

Malheureusement, tout câble électrique possède son talon d'Achille qui n'est autre que son isolation. La figure 2.1 illustre la constitution typique d'un câble monophasé. D'un point de vue purement technique, on peut distinguer deux types de câbles ; ceux isolés au papier imprégné (câble PILC) et ceux isolés au polyéthylène réticulé (câble XLPE). Inéluctablement, l'isolant agencé autour du conducteur d'un câble (figure 2.1) vieillit et se dégrade au cours du temps. La destruction, partielle ou complète de cet isolant, implique un effort de maintenance du câble ou pire encore son remplacement.

Les câbles doivent donc faire l'objet d'un diagnostic régulier ayant pour principale mission de vérifier la qualité de leur isolation. A cet égard, la mesure de décharges partielles est une technique qui a prouvé toute son efficacité depuis de nombreuses années [10].



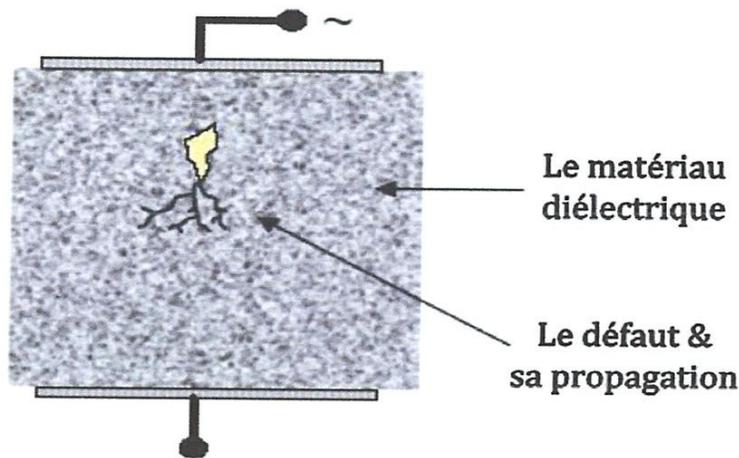
**Fig. 2.1 : Constitution d'un câble souterrain isolé au polyéthylène réticulé.**  
**Légende : (1) âme conductrice, (2) couche semi-conductrice interne, (3) isolant au polyéthylène réticulé, (4) couche semi-conductrice externe, (5) écran conducteur, (6) protection au PVC.**

## 2.1 Définitions :

Dans le domaine du génie électrique, une décharge partielle (DP) est un amorçage électrique localisé dans la partie isolante d'un système électrique qui ne court-circuite pas entièrement l'isolation (solide ou liquide). Celles-ci apparaissent, en général, sous l'application d'une haute tension [13].

Les décharges partielles (DP) apparaissent, en général, sous l'application d'une tension élevée. Elles provoquent la dégradation du matériau et peuvent conduire au claquage de l'isolant ou du diélectrique.

Les décharges partielles (DP) sont des décharges électriques qui apparaissent dans les diélectriques solides, liquides ou gazeux présentant des défauts (cavité décollement,...) dès qu'une tension suffisante est appliquée. Ces décharges correspondent à une rupture des gaz occlus dans les défauts, et elles sont appelées "partielles" car elles ne court-circuitent pas l'ensemble de l'isolation. [14].



*Fig.2.2 : Décharge partielle dans un diélectrique [15].*

## 2.2 Origines d'une décharge partielle :

L'isolation d'un câble souterrain n'est jamais parfaite. Non seulement, on y trouve des défauts qui dérivent directement de la production du câble mais en outre, l'isolation vieillit inéluctablement.

Lorsqu'un câble est en service, son isolation est le siège de contraintes thermiques, électriques, mécaniques et enfin de contraintes liées à l'environnement. Au cours du temps, ces diverses charges (Tableau 2.1) engendrent des modifications irréversibles de l'isolant. On parle généralement d'un vieillissement intrinsèque du câble concerné, au cours duquel l'isolation se dégrade de façon homogène.

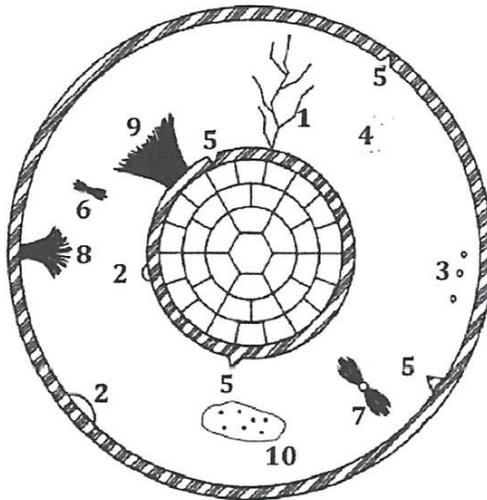
| Thermique             | Electrique         | Environnement   | Mécanique     |
|-----------------------|--------------------|-----------------|---------------|
| -Température maximale | - Tension (AC, DC) | - Gaz (air, O2) | - Flexion     |
| -Température ambiante | - Courant          | - Humidité      | - Traction    |
| -Gradient thermique   | - Fréquence        | - Eau           | - Compression |
| - Cycle thermique     | - Impulsions       | - Corrosion     | - Torsion     |
| - ...                 | - ...              | - ...           | - Vibrations  |
|                       |                    |                 | - ...         |

**Tab. 2.1 : Facteurs affectant, au cours du temps, l'isolation d'un câble souterrain.**

Par ailleurs, le vieillissement prématuré des câbles peut provenir de contaminants (particules étrangères), de défauts, de protubérances ou de vides qui apparaissent dans l'isolant lors de la production, du transport ou de l'installation du câble. Initialement, ces imperfections constituent des défauts ponctuels ou localisés de l'isolant. Par contre au cours du temps, elles peuvent s'aggraver et se propager progressivement au sein de l'isolation lorsque le câble est en service. In fine, elles peuvent même impliquer la destruction complète de l'isolant.

La figure 2.3 illustre un ensemble d'imperfections susceptibles de se manifester dans un câble monophasé.

câble monophasé



1. Arbrescence électrique
2. Vide à l'interface
3. Vide dans l'isolant
4. Contaminant
5. Protubérance dans le semi-conducteur
6. Décharge à partir d'un contaminant
7. Décharge à partir d'un vide
8. Décharge à partir de l'isolant
9. Décharge à partir du conducteur
10. Humidité

**Fig. 2.3 : Imperfections dans un câble monophasé.**

En particulier, remarquons que les jonctions ou joints entre câbles sont souvent le siège d'un nombre important de défauts. En effet, ces joints thermo rétractables sont réalisés *in situ* et manuellement. On ne peut donc y éviter la présence de multiples imperfections. Il en résulte notamment que l'activité des décharges partielles est souvent prépondérante au niveau de ces jonctions. Nous devons par conséquent examiner ces accessoires lors de l'analyse des décharges partielles.

Toutes ces imperfections constituent des sites particulièrement propices aux décharges partielles. Pour le comprendre, prenons l'exemple d'une cavité (remplie d'air) malheureusement présente dans l'isolant. Typiquement, celle-ci constitue un point faible pour deux raisons.

- D'une part, la rigidité diélectrique de l'air est plus faible que celle de l'isolant (polyéthylène réticulé ou papier imprégné). Or, rappelons que cette rigidité s'exprime sous la forme d'un champ électrique au-delà duquel le diélectrique concerné perd ses propriétés isolantes.

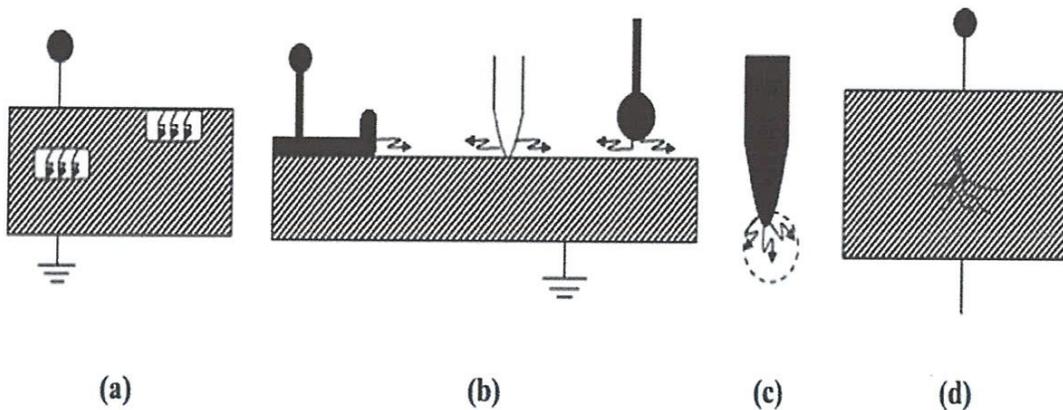
- D'autre part, la permittivité diélectrique relative de l'air vaut  $\epsilon_r \approx 1$ . Par conservation du déplacement électrique ( $\epsilon_{r,\text{air}} * E_{,\text{air}} = \epsilon_{r,\text{isolant}} * E_{,\text{isolant}}$ ), le champ

électrique est amplifiée par le ratio  $\frac{\epsilon_r.\text{isolant}}{\epsilon_r.\text{air}}$  au niveau de la cavité lorsque le câble est sous tension.

En d'autres termes, les contraintes électriques sont accrues au niveau des imperfections qui, en outre, résistent moins bien que l'isolant. Par conséquent, les décharges partielles apparaissent inévitablement au sein de ces défauts d'isolation. C'est d'ailleurs l'a tout l'intérêt de l'étude des DP puisque celles-ci révèlent la présence d'imperfections dans l'isolant du câble et en reflètent donc indirectement la qualité [10].

### 2.3 Classification :

Plusieurs classes de décharges partielles ont été proposées. Suivant leur localisation, on divise les DP en quatre groupes (figure 2.4) :



**Figure 2.4 : Types des décharges partielles : a : interne, b : de surface, c : couronne, d : en arborescence.**

**1. Décharges internes :** Le champ électrique dans une cavité dépend de sa forme (plate ou sphérique) et de la constante diélectrique du solide isolant qui l'entoure [25].

Ces décharges apparaissent à l'intérieur du matériau isolant, aux endroits où la rigidité diélectrique est faible, par exemple dans une cavité dans un solide ou une bulle dans un liquide (Figure 2.4 -a).

**2. Décharges de surface:** elles se manifestent lorsqu'un champ tangentiel important existe à la surface d'un diélectrique (Figure 2.4-b).

**3. Décharges couronnes :** elles prennent naissance au niveau des points où le champ électrique est renforcé. La décharge est restreinte à une zone réduite entourant la pointe (Figure 2.4-c).

**4. Décharges en arborescence :** elles se produisent suite à un défaut dans l'isolant. Une croissance des différentes branches de l'arborescence produira des conditions propices pour l'apparition d'autres DP (Figure 2.4-d).

Dans les modules IGBT, les deux types de décharges observées le plus souvent sont les décharges dans les cavités et les décharges couronnes.

## 2.4 Circuit équivalent des décharges partielles :

### 2.4.1 Décharges internes :

Le comportement des décharges internes peut être présenté par le circuit équivalent composé de 3 condensateurs notés a, b et c (Figure 2.5).

- c : la capacité de la cavité, qui est en parallèle avec un éclateur. Lorsque la tension de claquage de la cavité est atteinte, l'éclateur se met en court-circuit.

- b : la capacité du diélectrique sans DP en série avec la cavité.

- a : la capacité équivalente de l'isolant en parallèle avec a et b. Cette capacité correspond à la partie saine de l'isolant.

-  $V_a$  : la tension appliquée aux bornes du diélectrique.

-  $V_c$  : la tension aux bornes de la cavité.

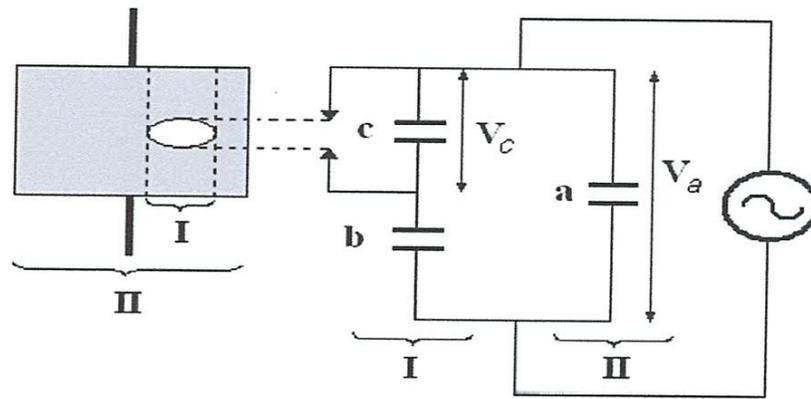


Figure 2.5 : Modèle classique des capacités équivalentes d'un diélectrique avec une cavité interne.

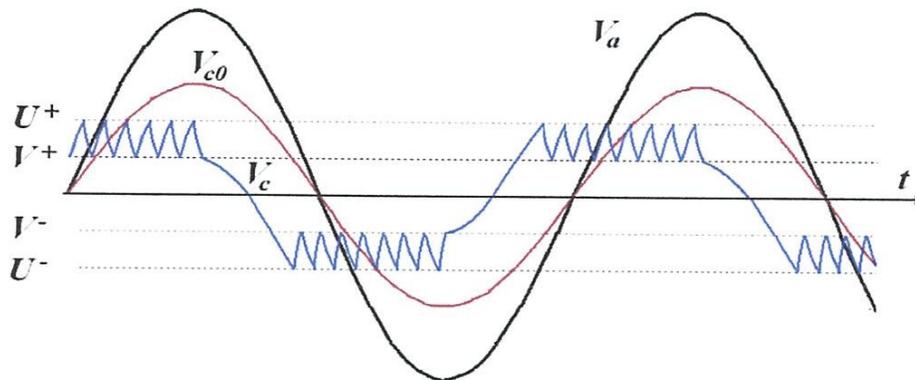


Figure 2.6 : Réurrence des DP dans une cavité.

Dans l'hypothèse où il n'y a pas de claquage dans le condensateur c, si une tension alternative  $V_a$  est appliquée sur le diélectrique, une tension  $V_{c0}$  apparaît à travers la cavité.

$$V_{c0} = \frac{b}{c+b} V \tag{2.1}$$

Lorsque la tension dans la cavité ( $V_c$ ) dépasse une certaine valeur critique  $U^+$  (tension d'ignition), une décharge partielle apparaît.  $V_c$  chute à une valeur d'extinction  $U^-$  et la décharge disparaît. Cette chute de tension se produit sur une durée très courte (quelque nanosecondes) par rapport à la période de la tension sinusoïdale

appliquée (50Hz). Ensuite, la tension aux bornes de la cavité augmente à nouveau, et s'effondre lorsque la valeur  $U^*$  est atteinte, une nouvelle décharge se produit. Ce phénomène perdure jusqu'à ce que la tension appliquée  $V_a$  n'augmente plus (phase  $\varphi=90^\circ$ ). Le même phénomène se produit pendant l'alternance négative (arrêt des décharges à  $270^\circ$ ) avec des seuils d'apparition et d'extinction de décharges à  $U^-$  et  $V^-$ . Ces décharges dans la cavité produisent des impulsions de courant rapides (quelques nanosecondes) dans l'échantillon et le circuit externe (Figure 2.6).

#### 2.4.2 Décharges couronnes :

La décharge couronne représente l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité dans un gaz au voisinage d'un conducteur de faible rayon de courbure les électrodes étant soumises à une différence de potentiel élevée. On désigne sous le nom d'électrode active celle qui possède le plus petit rayon de courbure, la décharge étant positive ou négative suivant que cette électrode joue le rôle d'anode ou de cathode.

Le phénomène fondamental est toujours la dissociation des atomes ou molécules en électrons et ions positifs.

Les charges de signe opposé à celui du conducteur sont instantanément attirées vers lui et neutralisées alors que les charges de même signe sont repoussées. Si l'électrode active est anode, les ions positifs sont repoussés et traversent l'espace entre les deux électrodes. Pour une électrode active cathode, comme les électrons s'attachent très rapidement aux atomes ou molécules neutres, des ions négatifs sont formés et tout se passe comme si des ions de même polarité que l'émetteur étaient émis sous l'effet de l'ionisation [16].

L'effet de couronne se produit sur tous les conducteurs et lignes soumis à une haute tension. Dès que le champ électrique à la surface du conducteur devient suffisamment grand.

En configuration pointe-plan des décharges de types couronnes peuvent se produire. Leurs signatures diffèrent de celles dans les cavités. Le circuit équivalent d'une décharge couronne est présenté par la (Figure 2.7-a). Lorsque la tension appliquée  $V_a$  dépasse une certaine valeur critique  $U^*$  (seuil d'apparition des décharges), l'ionisation se produit et le phénomène de décharge couronne se manifeste. Ceci se répète jusqu'à ce

que la tension appliquée  $V_a$  devienne inférieure au seuil de décharge  $V^+$  (Figure 2.7-b). Le même phénomène se produit pendant l'alternance négative. Les distributions de décharges sont centrées sur  $90^\circ$  et  $270^\circ$  pendant une alternance.

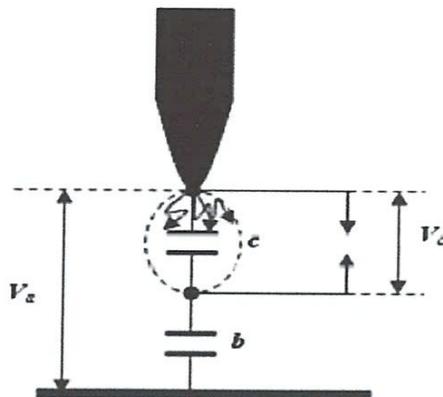


Figure 2.7-a : Circuit équivalent des décharges couronnes.

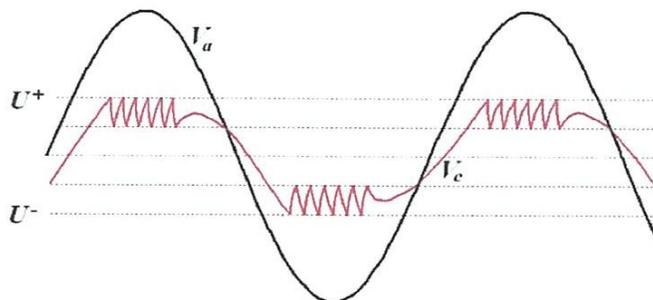


Figure 2.7-b : récurrence des décharges couronnes [14].

## 2.5 Loi de Paschen : Rappel théorique

Nous rappelons dans cette partie les bases théoriques nécessaires à notre étude. Pour déterminer la tension d'initiation d'une décharge, une description simple des phénomènes physiques mis en jeu conduit à la loi de Paschen utilisée comme

approximation théorique. Ensuite, nous allons présenter les facteurs qui influent sur cette loi ainsi que son domaine de validité.

### 2.5.1 Etablissement de la Loi de Paschen :

Pour décrire une décharge électrique dans les conditions de Townsend, il est nécessaire d'introduire deux coefficients : le premier coefficient de Townsend  $\alpha$  traduisant l'effet d'avalanche et le deuxième coefficient de Townsend  $\gamma$  traduisant l'émission secondaire d'électrons à la cathode.

### 2.5.2 Premier coefficient de Townsend, définition :

Le premier coefficient de Townsend  $\alpha$  peut être défini par la quantité d'électrons  $dn$  créés au cours d'une avalanche électronique par une quantité  $n$  d'électrons se déplaçant sur une longueur  $dx$ , soit:

$$dn = \alpha n dx \quad \text{ou} \quad n = \exp(\alpha x) \quad (2.2)$$

Le coefficient  $\alpha$  décrit le processus d'avalanche caractérisée par les ionisations successives et la création d'électrons. Dans l'expression (2.2), si un électron est créé par un seul électron originel, c'est que ce dernier a parcouru une distance égale au  $lpm$  ( $\lambda$ ). On retrouve donc :

$$\alpha = 1/\lambda \quad (2.3)$$

Alors, un électron libéré à la cathode (ayant une énergie suffisante pour ioniser les molécules) se traduit par l'arrivée de  $e^{\alpha d}$  électrons au niveau de l'anode, créant ainsi une avalanche électronique, et simultanément des  $(e^{\alpha d} - 1)$  ions au niveau de la cathode.

Deux hypothèses permettent de trouver une expression simple pour  $\alpha$ . Ces hypothèses bien que très fortes, permettent d'avoir une expression de  $\alpha$  très proche de la valeur calculée rigoureusement :

1. L'électron ionisant démarre entre deux collisions avec une vitesse dont la composante dans la direction du champ est nulle. Cela signifie qu'il perd toute son énergie cinétique gagnée grâce au champ électrique, au profit de l'atome ou de la molécule à chaque collision.

2. La probabilité d'ionisation par collision vaut 1 tant que l'énergie cinétique de l'électron est supérieure ou égale à l'énergie d'ionisation de l'atome.

Selon ces deux hypothèses, un électron va ioniser un atome au cours d'une collision quand son énergie cinétique, gagnée pendant son parcours libre, est égale à l'énergie d'ionisation  $eVi$  de l'atome. Si  $\lambda i$  est le parcours libre de l'électron dans la direction du champ électrique alors,

$$eE\lambda i \geq eVi \quad (2.4)$$

Où  $E$  est la valeur du champ électrique uniforme, qui ne varie pas pendant le temps et  $e$  est la charge de l'électron. Ce qui conduit à :

$$E\lambda i \geq Vi \quad (2.5)$$

Le libre parcours minimal qui donne naissance à une ionisation selon les hypothèses précédentes est donc :

$$\lambda i = \frac{Vi}{E} \quad (2.6)$$

La probabilité qu'un libre parcours soit supérieur ou égal à  $\lambda i$  est déterminée par la fonction de distribution des libres parcours ; dans ces conditions le nombre de libres parcours  $n$ , parcourus par une particule par unité de longueur, supérieurs ou égaux à  $\lambda i$  est donné par :

$$n = n_0 \exp\left(\frac{-\lambda i}{\lambda m}\right) \quad (2.7)$$

$n_0$  est le nombre total de libres parcours, parcourus par cette particule par unité de longueur, et  $\lambda m$  est le libre parcours moyen (soit  $n_0 \lambda m = 1$ ). La probabilité pour qu'un libre parcours soit supérieur à  $\lambda i$  est donc :

$$\frac{n}{n_0} = \exp\left(\frac{-\lambda i}{\lambda m}\right) \quad (2.8)$$

$n$  représentant le nombre de libres parcours parcourus par une particule par unité de longueur et à l'origine d'une ionisation, c'est donc également le nombre d'électrons créés par avalanche par unité de longueur, ce qui correspond à la définition du premier coefficient de Townsend. On peut donc écrire :

$$\alpha = n_0 \exp\left(-\frac{\lambda i}{\lambda m}\right) \quad (2.9)$$

$$\text{Soit } \alpha = \frac{1}{\lambda m} n_0 \exp\left(-\frac{\lambda i}{\lambda m}\right) \quad (2.10)$$

Or, il a été démontré que  $\lambda m$  est proportionnel à  $T/p$ . Donc  $1/\lambda m = Ap$  où  $A$  est une constante qui dépend de la température  $T$ . En substituant cette valeur et celle de  $\lambda i$  d'après l'équation (2.6) il arrive :

$$\alpha = Ap \exp\left(-\frac{ApVi}{E}\right) = Ap \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) \quad (2.11)$$

où  $B = AVi$  alors l'équation (2.11) s'écrit :

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) \quad (2.12)$$

### 2.5.3 Deuxième coefficient de Townsend :

Les ions étant aussi soumis à l'action du champ électrique, ils sont accélérés et viennent bombarder la cathode. L'émission d'électrons à la cathode, dite "émission secondaire" correspond au deuxième coefficient de Townsend ( $\gamma$ ) qui est le nombre d'électrons secondaires émis par ions incidents. Ce coefficient dépend de la densité du gaz de l'énergie acquise par les ions, autrement dit du champ réduit, mais également de la nature des électrodes. Il y a donc  $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$  électrons secondaires créés par bombardement ionique à la cathode.

Les mécanismes d'ionisation et d'émission secondaire entretiennent la décharge elle est auto-entretenu ou autonome, lorsque la condition de claquage de Townsend définie par la relation:

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \text{ avec } e^{\alpha d} \gg 1 \quad (2.13)$$

La relation (2.13) traduit le fait que chaque électron présent à la cathode est un électron issu de l'émission secondaire, la création d'électrons ne nécessite donc plus d'agent extérieur. L'équation (2.13) peut s'écrire sous la forme :

$$\alpha d = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (2.14)$$

$\frac{\alpha}{p}$  étant une fonction de  $\frac{E}{p}$ , cette relation devient :

$$\alpha d = A p d e^{-\frac{B}{E/p}} = \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (2.15)$$

## 2.6. La loi de Paschen :

On peut déduire des équations précédentes une relation qui lie la valeur de la tension de claquage à la pression du gaz et à la distance inter électrodes pour obtenir la relation connue et dite « la loi de Paschen ». Cette loi indique que la tension d'apparition d'un arc électrique dans un gaz est une fonction non linéaire du produit  $pd$  (pression x distance):

$$V_c = f(p d) = \frac{B p d}{C + \ln(p d)} \quad \text{avec} \quad C = \ln \left( \frac{A}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right) \quad (2.16)$$

$p$ : pression du gaz,  $d$ : distance entre les électrodes,  $A$  et  $B$  sont déterminés expérimentalement, pour chaque gaz et sont considérés constants sur un domaine de champ réduit  $E/p$ .

| Gaz              | A<br>(Torr <sup>-1</sup> .cm <sup>-1</sup> ) | B<br>(V.Torr <sup>-1</sup> .cm <sup>-1</sup> ) | Domaine de validité de $E/p$<br>(V.Torr <sup>-1</sup> .cm <sup>-1</sup> ) |
|------------------|--|--|---|
| 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   |
| H <sub>2</sub> O | 13   | 290  | 150-1000  |
| HCl              | 25   | 380  | 200-1000  |
| He               | 3  | 34   | 20-150  |
| Ne               | 4  | 100  | 100-400   |
| Ar               | 14   | 180  | 100-600   |
| Kr               | 17   | 240  | 100-1000  |
| Xe               | 26   | 350  | 200-800   |

Tableau 2.3 : Valeurs des constantes A et B pour divers gaz.

En complément, la Figure 2.8.a montre la variation du champ d'amorçage avec la distance inter électrodes pour quelques gaz rencontrés dans des applications industrielles.

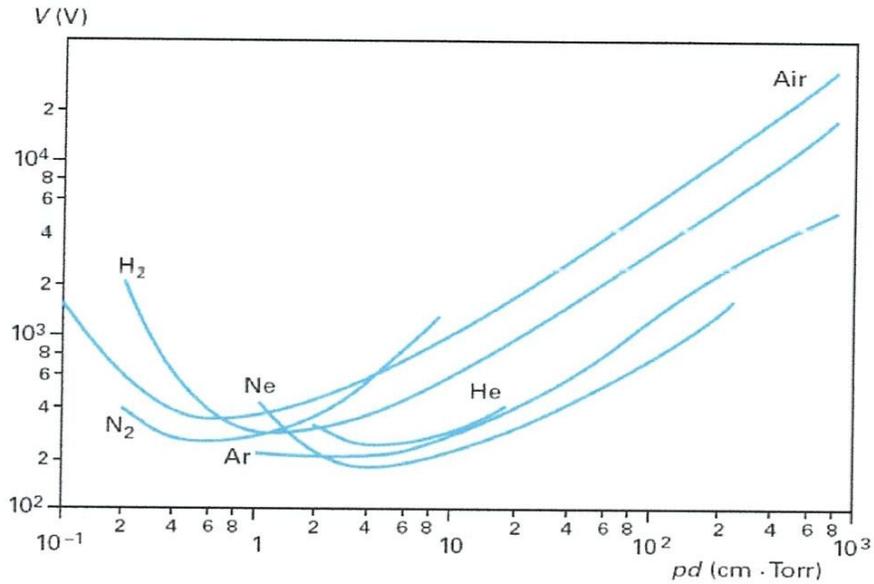


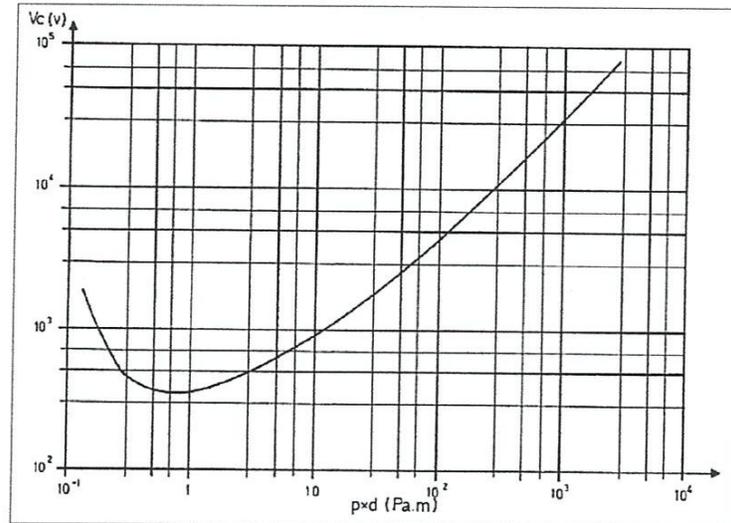
Figure 2.8.a) : Courbe de paschen pour quelques gaz [17].

### 2.6.1. La loi de Paschen pour l'air :

La tenue en tension dans les gaz change en fonction de la pression suivant la loi de Paschen.

Cette loi n'est valable que pour une température constante et pour des champs électriques inférieurs à 100 kV/cm.

Si on considère un gaz soumis à un champ électrique entre 2 électrodes planes métalliques, on obtient pour la tension de claquage  $V_c$  une relation qui est une fonction du produit ( $pd$ ).



**Figure 2.8.b) : Courbe de paschen pour l'air à 20°C.**

La courbe présente un minimum de la tension de claquage pour une valeur particulière du produit ( $pd$ ). Cette tension  $V_c(\min)$  est comprise entre 100 V et 500 V pour la plupart des gaz purs : Elle correspond à la valeur de  $E / p$  où la capacité d'ionisation des électrons est maximum, avec  $(E / p)_{\min} = B$ ,  $E$  étant le champ électrique auquel le gaz est soumis entre les 2 électrodes [18].

## 2.7 Tension d'apparition de l'effet couronne :

### 2.7.1 Champ électrique critique (formule de Peek) :

Pour évaluer le seuil de l'effet couronne à la surface de l'anode, Peek, en s'inspirant de la théorie de Townsend proposée en 1920, a suggéré pour la première fois une loi empirique établie en géométrie cylindrique dans l'air ambiant, et en tension alternative. Cette équation est appelée depuis la loi de Peek.

$$E_c = E_0 \delta m_1 m_2 \left( 1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta} r} \right) \quad (2.17)$$

Avec :  $E_0 = 30 \text{ kV/cm}$  : Valeur de crête du champ électrique en condition normales.

$r$  : Rayon du conducteur en cm.

$m_1$  : Coefficient qui tient compte de l'état de surface du conducteur (l'irrégularité géométrique du conducteur).

$m_1 = 1$ : Pour un conducteur idéal, parfaitement lisse.

$m_1 = 0.9$ : Pour un conducteur normal.

$m_1 = 0.8$ : Pour un conducteur présentant des arrêtes vives.

$m_2$ : Pour Coefficient qui prend en considération l'influence de la pollution des conducteurs.

$m_2 = 0.9$ : Pour un conducteur de propriété technique.

$m_2 = 0.3$ : Pour un conducteur frottement pollue.

Souvent le produit ( $m_1 m_2$ ) est remplacé par un seul coefficient :  $m$ .

$\delta$ : Densité de l'air.

$$\delta = \frac{p}{p_0} \frac{273+t_0}{273+t} \quad (2.18)$$

$$p_0 = 760 \text{ mmHg}, \quad t_0 = 25^\circ\text{C}$$

Le terme  $(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta} r})$  : est appelé correction de peek, il tient compte du fait que plus le rayon du conducteur est petit plus il est difficile d'ioniser loin de ce conducteur.

Cette difficulté d'ioniser est due au fait que le champ électrique décroît très rapidement en s'éloignant du conducteur. Depuis de nombreuses formules empiriques et semi- empiriques du champ seuil de l'effet couronne ont été établies par divers auteurs. Dans tous les cas, l'expression du seuil  $E_c$  est donnée sous la forme générale suivante.

$$E_s = f(1 + \frac{G}{r^B}) \quad (2.19)$$

Avec :

$E_s$  : Champ seuil d'apparition de la décharge.

$G$ ,  $B$  et  $f$  : Des constantes qui diffèrent d'un auteur à l'autre, elles dépendent de la géométrie de l'électrode et de la densité du gaz.

$r_0^B$  : Rayon du conducteur de l'électrode active.

### 2.7.2 Tension de seuil d'apparition de l'effet couronne :

Il est intéressant de connaître  $U_c$ , (tension d'apparition de l'effet couronne) que  $E_c$  (champ critique d'apparition de l'effet couronne), ainsi on aura : [23]

$$U_c = E_0 \delta m_1 m_2 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}}\right) \cdot r \frac{2h}{r} \quad (2.20)$$

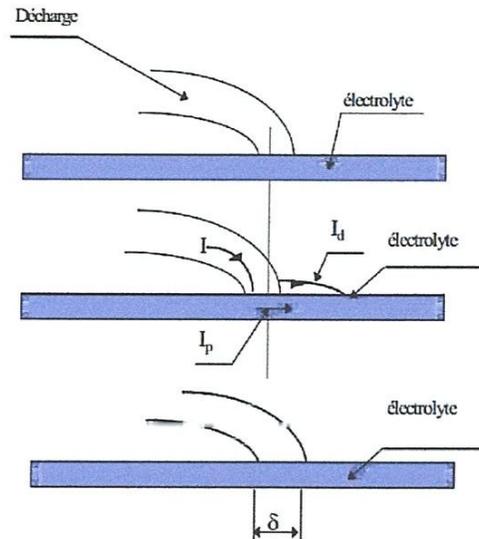
## 2.8 Mécanisme de propagation :

### 2.8.1 Propagation par ionisation :

Le mécanisme d'élongation basé sur l'ionisation et le déplacement discontinu du pied de la décharge. Selon Wilkins, la probabilité d'ionisation dans la région précédant l'avant pied de la décharge est grande, étant donné que la température ainsi que le potentiel, sont élevés dans cette région.

Si l'ionisation est suffisante, alors il y a circulation d'un courant électrique, la conductivité du nouveau trajet du courant va augmenter avec celui-ci, tandis que celle du trajet précédent dans l'électrolyte reste constante (figure 2.9). Par conséquent le courant total change progressivement de trajet, entraînant ainsi une élongation  $\delta$  de la décharge.

Wilkins parle d'ionisation, de passage de courant et de l'existence d'un champ au pied de la décharge sans évoquer le claquage de l'air. Sous le nom d'ionisation, il considère en réalité une rupture diélectrique progressive.



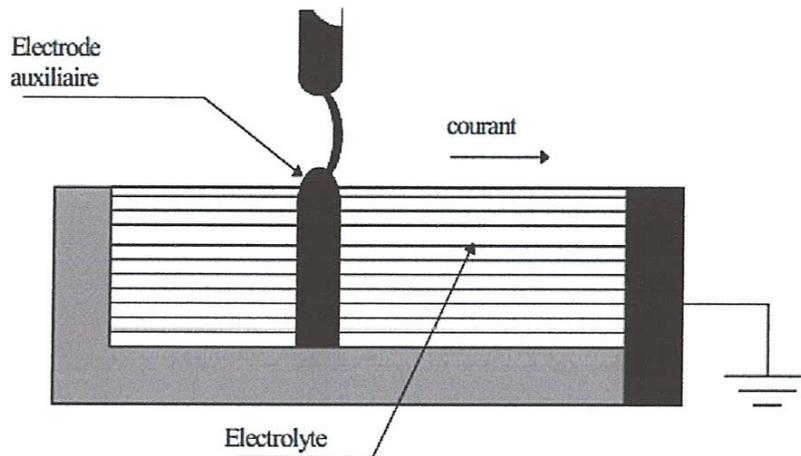
**Figure 2.9 : Mécanisme de propagation par ionisation.**

### 2.8.2 Propagation par force électrostatique :

A partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, l'existence d'une force électrostatique s'exerçant sur la décharge, responsable du déplacement de l'arc.

Cette force était due à la dissymétrie de la distribution du potentiel, elle même causée par le passage du courant dans le liquide couvrant la surface isolante. Cette force va provoquer la courbure de la décharge vers l'électrode de masse (figure 2.10). Une fois les conditions critiques satisfaites, la décharge se déplacera alors vers l'électrode de masse.

D'après l'auteur, l'existence de cette force implique en effet, que l'on considère la décharge comme un élément de circuit doué d'une certaine auto-consistance macroscopique et susceptible de s'étirer de façon plus ou moins élastique.



**Figure 2.10 : Courbure de la décharge dans la direction de l'écoulement du courant mettant en évidence l'existence d'une force.**

Dans une analyse critique sur les différents mécanismes de propagation de la décharge présents dans la littérature, on ne pouvant pas identifier un phénomène élémentaire de rupture diélectrique d'un intervalle gazeux sur le trajet du contournement, au sens de la physique de la décharge, a du se ramener à une approche plus globale du phénomène, à savoir le mécanisme de la propagation par ionisation progressive. Ainsi, on a déduit que l'augmentation du degré d'ionisation à l'intérieur de la décharge et le démarrage des processus d'ionisation devant elle, sont les facteurs responsables de l'allongement et du changement que subit la décharge, dans ses aspects et ses états dynamiques [19].

## 2.9 Effets des DP :

La présence de DP constitue un mécanisme de dégradation, et leur détection constitue une méthode de diagnostic très utilisée. L'effet des DP est variable selon leur intensité et le milieu où elles se déroulent. La décharge partielle est souvent accompagnée d'une génération de gaz (formation de cavités dans le solide), de nouvelles espèces atomiques et moléculaires excitées, de radicaux qui peuvent générer à leur tour des

acides attaquant les matériaux. Elles produisent également une érosion mécanique, une carbonisation des surfaces par bombardement d'ions, une élévation de température très localisée. Ces effets engendrent une dégradation irréversible des matériaux diélectriques, en particulier dans le cas des solides, et donc une diminution de la durée de vie de l'ensemble du système électrique [13].

### 2.9.1 : Effets d'un coup de foudre direct sur un réseau électrique :

Lorsqu'un coup de foudre frappe un conducteur d'une ligne, tout se passe comme si l'arc en retour se comportait comme un courant injecté dans le conducteur. Ce courant se répartit par moitié de part et d'autre du point d'impact, et chacune de ces moitiés va se propager le long du conducteur. Les lois de propagation des ondes mobiles enseignent qu'à toute onde de courant est nécessairement associé une onde de tension, et réciproquement. Dans le cas d'un foudroiement direct d'un conducteur d'une ligne aérienne, compte tenu des fortes intensités des courants de foudre, l'onde de tension associée se caractérise par des amplitudes considérables, de l'ordre de quelques MV.

Aucune isolation économiquement acceptable ne peut supporter de pareilles surtensions : dans le cas des lignes, ce sont les chaînes d'isolateurs, auxquelles sont suspendus les conducteurs, qui constituent les points d'isolement les plus faibles, de sorte qu'un amorçage va inévitablement se produire au niveau de la première chaîne rencontrée par l'onde de tension. Cet amorçage est une violente étincelle, qui n'est autre chose qu'un canal ionisé conducteur, et par lequel va pouvoir passer le courant d'arc en retour, puis un intense courant alimenté par le réseau : ce courant que l'on désigne par « courant de suite », est en fait un courant de court-circuit, et le seul moyen dont on dispose pour l'éliminer est l'ouverture des disjoncteurs aux deux extrémités de la ligne [20].

### 2.10 Conséquences des décharges partielles :

Les décharges partielles conduisent à une dégradation des matériels sous l'action de diverses contraintes :

- Contrainte thermique générée localement par la décharge qui peut entraîner un farinage puis une carbonisation de l'isolant.

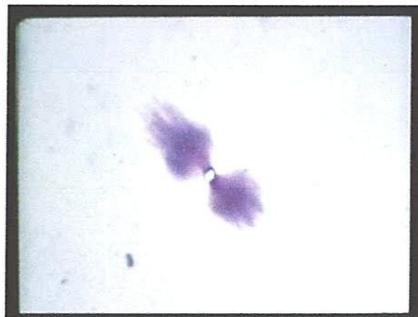
- Contrainte chimique due aux produits de dégradation générés par la décharge (ozone, oxydes d'azote et acide nitrique notamment).
- Erosion mécanique due au bombardement par des espèces chargées et aux attaques acides.

Ces contraintes provoquent une dégradation du matériau isolant les parties sous tension. Lorsque l'isolant est trop abîmé, un arc électrique complet se produit entre deux phases ou entre une phase et le neutre, on dit alors qu'il y a amorçage. En général, cet amorçage conduit à la mort du matériel [21].

Le phénomène de décharges partielles crée localement à la fois une érosion et une oxydation de l'isolant (par réactions chimiques). Une décharge partielle entraîne donc un vieillissement local qui a de grandes chances de s'étendre en fonction du temps. Il est même admis à ce jour que le phénomène de décharges partielles peut entraîner la destruction du matériel après un certain temps d'usage.

### 2.10.1 Destruction de l'isolation :

La détection de l'activité des DP est d'un intérêt capital pour prévenir toute dégradation d'un isolant. La figure 2.5 illustre un site de DP, photographié grâce à un microscope. Une décharge partielle y a créé une arborescence électrique.



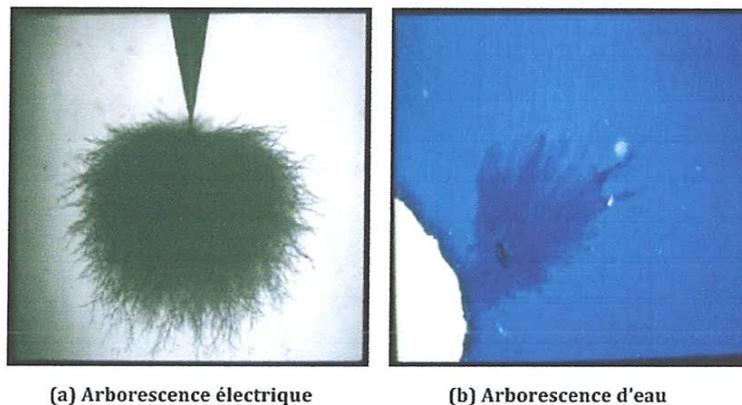
**Fig. 2.11 : Une décharge partielle a entraîné une arborescence électrique.**

Une arborescence électrique est un réseau de fins canaux carbonisés qui se propagent relativement vite dans l'isolation et qui finissent par la détruire. Autre ennemi juré des câbles extrudés et de leurs accessoires (joints) : l'arborescence d'eau (figure 2.10.b). En soi, une arborescence d'eau n'engendre pas de décharges partielles. Par contre, elle provoque

localement un accroissement du champ électrique, donnant lieu avec le temps à une arborescence électrique. Cette dernière est alors responsable des nombreuses décharges partielles associées à ce type d'imperfection.

Enfin, nous devons noter que les décharges partielles n'engendrent pas systématiquement la destruction de l'isolation du câble. En effet, certaines sources de DP peuvent être actives pendant des années sans pour autant causer de dommages catastrophiques. Néanmoins, quelle que soit la situation, le suivi de l'activité des DP nous renseignera avec intérêt sur l'état d'un isolant.

En guise de conclusion, nous pouvons dire que les décharges partielles sont d'une part un symptôme (signe précurseur) de la dégradation d'un isolant mais sont également responsables de cette dégradation.



*Fig. 2.12 : Destruction d'un matériau isolant [10].*

### 2.11 Mesure de décharges partielles :

L'isolation des câbles en service subit l'action d'un champ électrique alternatif à la fréquence du réseau. Toute imperfection de cet isolant peut dès lors être le siège de petites décharges, appelées Décharges Partielles (DP), si le champ électrique y dépasse une valeur seuil. Par définition, une décharge partielle ne court-circuite jamais l'entièreté de l'isolation d'un câble. Il s'agit plutôt d'une décharge localisée au niveau d'un défaut d'isolation, décharge qui témoigne indirectement de l'état de dégradation de cet isolant. Pour cette raison, la mesure de DP a déjà prouvé toute son efficacité dans le cadre du diagnostic des câbles souterrains.

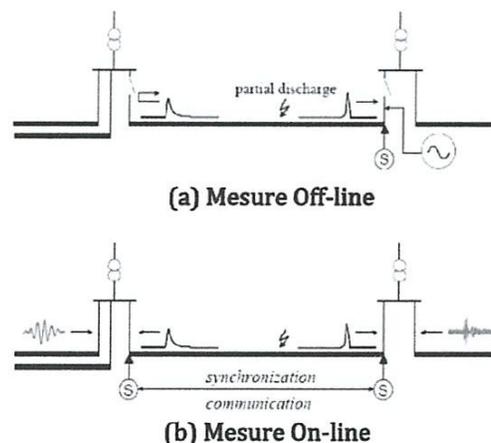
Les décharges partielles induisent des pulsations électriques Haute Fréquence (HF) dans les conducteurs d'un câble (écran conducteur et âme centrale représentées à la fig.2.1).

Ces pulses vont ensuite se propager vers les deux extrémités du câble. C'est d'ailleurs à cet endroit qu'il convient de les détecter, comme le préconise la figure 2.13.

A priori, on peut envisager de mesurer ces pulsations HF de deux façons fondamentalement différentes (fig. 2.13).

– **Mesure Off-line.** Elle consiste à déconnecter le câble du réseau et à le tester off-line (lorsqu'il n'est pas en service). Un générateur extérieur est utilisé pour mettre sous tension le câble à tester. Cette méthode sera exposée, de façon plus approfondie, dans la suite de ce travail.

– **Mesure On-line.** Dans ce cas, le câble n'est pas déconnecté du réseau. Il reste donc en service lors de son diagnostic. Cette méthode jouit de nombreux avantages vis-à-vis de la mesure off-line — tels que la possibilité de suivre en continu l'état d'un câble ou encore la possibilité de réaliser ces mesures sans interrompre la puissance que ce câble transite — . En contrepartie, son application est beaucoup plus difficile car de nombreux parasites polluent les mesures réalisées.



**Fig. 2.13 : Deux façons de mesurer une décharge partielle [10].**

**Conclusion :**

Les décharges partielles sont des phénomènes très connus qui se produisent dans les appareils à haute tension à cause de ses défauts d'isolation. Une fois apparaître, ces phénomènes peuvent endommager ou pire détruire le système.

Dans ce chapitre nous avons en particulier présenté les fondements théoriques permettant de déboucher sur la loi de Paschen et rappelé les expressions correctives apportées à cette loi, aussi nous avons énoncé les notions de base des classes de décharges partielles et leurs localisations.

Dans le prochain chapitre nous présenterons des mesures de la tension de claquage de l'air, pour différentes configuration et différentes distances inter électrodes.

# CHAPITRE III :

MESURES ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.

**Introduction :**

Dans les conditions usuelles, le milieu gazeux ne permet pas la conduction de l'électricité. Soumis à un champ électrique faible, un gaz pur est un isolant parfait

Le caractère d'isolement électrique tient au fait qu'un gaz ne contient pas suffisamment de particules chargées libres (électrons ou ions positifs) qui puissent assurer la conduction. Les gaz sont de bons isolants en ce qui concerne l'empêchement du claquage électrique entre autres dans les circuits de haute tension et dans les lignes de transmission.

Des électrons libres et des ions positifs ou négatifs peuvent apparaître si l'on soumet le gaz à un champ électrique de forte intensité ou à des températures suffisamment élevées, si on le soumet à un bombardement de particules ou encore s'il est soumis à un champ électromagnétique très intense.

Lorsque l'ionisation est assez importante, le gaz devenu plasma, est un fluide très conducteur [27].

La nécessité de transporter l'énergie électrique à des grandes distances et avec des quantités de plus en plus importantes rend l'utilisation de la haute tension une obligation.

Cependant, le besoin à des tensions élevées n'est pas limité au transport de l'énergie mais s'étale aussi aux autres domaines de la physique tels que les accélérateurs de particules, l'éclairage, les tubes cathodiques et d'autres applications d'ingénierie.

Le domaine de la haute tension est défini comme étant le domaine des champs élevés. La non cohérence entre l'application et la définition provient du fait que, d'une part, c'est le champ électrique qui est la grandeur d'action, on trouve par exemple la rigidité diélectrique, la force électrique, et d'autre part, il est possible de réaliser des champs élevés à partir des tensions relativement faibles.

Le domaine des champs élevés est particulièrement important en raison des phénomènes complexes qui peuvent surgir et dont l'action est subie par le matériau.

Ce dernier doit dans ce cas faire face aux différentes contraintes exercées et de ce fait le choix et le dimensionnement du matériau ainsi que la compréhension de la nature des

contraintes est alors une nécessité pour tout ingénieur ou praticien des systèmes électriques.

Dans ce chapitre, nous donnons tout d'abord une description du dispositif expérimental ainsi que des protocoles expérimentaux suivis.

L'application de la haute tension dans le grand transport d'énergie électrique est la plus courante, mais l'ingénieur électricien utilise ce savoir-faire dans de nombreux autres domaines [22].

Nous présentons ensuite l'impact de la variation des différents paramètres sur la tension de claquage de l'air et finalement nous tenterons d'expliquer ces résultats à l'aide de la physique des décharges.

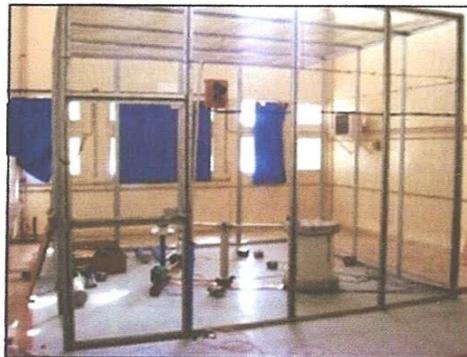
### 3.1 Claquage de l'air :

#### 3.1.1 Description du dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental est représenté dans les figures 3.1.a, 3.1.b et 3.1.c

##### a- Cage de faraday :

La cage de faraday est une enceinte utilisée pour protéger des nuisances électriques et subsidiairement électromagnétiques extérieurs ou inversement empêche un appareillage de polluer son environnement. La cage de faraday est souvent utilisée lorsque l'on désire effectuer des mesures précises en électronique ou en électricité. En haute tension la cage sert également pour la protection des personnes.



*Figure 3.1.a): Photographie globale du banc d'essai (cage de faraday).*

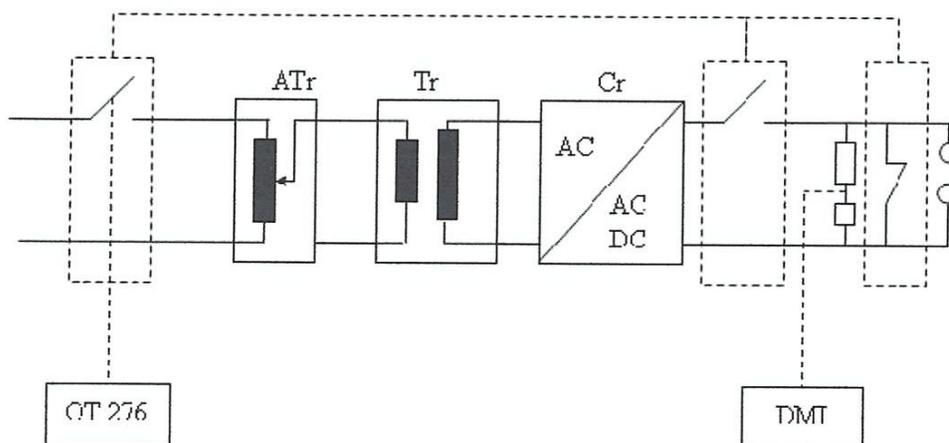
**b- Eclateur de mesure :**

Lieu de test des échantillons d'arc. Les électrodes sont placées dans une cellule étanche, qui est constituée par un tube transparent, on peut visualiser les décharges électriques dans l'espace inter électrodes.



*Figure 3.1.b): Photographie du lieu de test des échantillons d'arc.*

**c- Schéma global:**



*Figure 3.1.c): Schéma global.*

**3.1.2 : Equipements :**

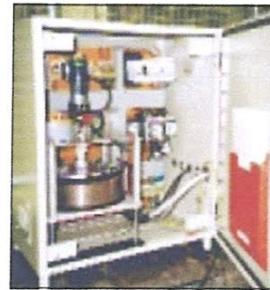
Pour cette étude, nous avons utilisé un ensemble des équipements pour les techniques de haute tension, le tableau suivant présente ces derniers.

**Transformateur monophasé :**

Le transformateur est utilisé pour le mode AC et DC, Tension relative : 2220 /100 KV/200V, Puissance relative : 5 KVA, continu, 10 KV, 1heure.

**Autotransformateur :**

On utilise l'autotransformateur pour régler la tension côté haut tension de 0 à 100 KV, Alimentation d'énergie : 230 V/ 22 A (33,43 A), Tension secondaire : 0... 230 V, Puissance relative : 5 KVA (7.5, 10 KVA) continu, Fréquence: 50/60 Hz, Poids: 80 Kg (255Kg, 260 Kg)

**Diode Haute Tension :**

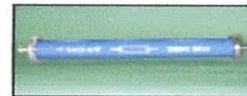
Utilisée pour la configuration en mode DC. Elle se compose d'une résistance de protection et une diode haute tension.



Résistance protectrice : 100 K $\Omega$

**Resistance :**

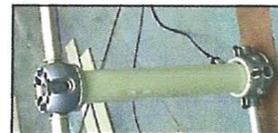
En mode DC, elle est utilisée comme une résistance de décharge Resistance : 2400 K $\Omega$

**Condensateur de lissage :**

Pour la configuration DC, il est utilisé comme condensateur de lissage. Capacité : 25000pF

**Capacité de mesure :**

Utilise en mode AC. Capacité : 100pF

**Resistance de mesure :**

Utilise en mode DC. Resistance : 280 M $\Omega$

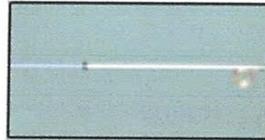


**Interrupteur de mise à terre :**

C'est un interrupteur à distance, qui peut être utilisé pour la mise à la terre de la construction HT.

**La perche de décharge :**

C'est une tige de décharge manuelle de tous les composants du montage expérimentale.

**Tapis pour la mise à la terre :**

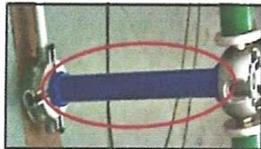
Tapis en cuivre pour la mise à la terre des appareils HT connectés.

**Electrode :**

Utilisée avec l'interrupteur de mise à la terre pour réduire l'intensité de la décharge couronne. Diamètre : 300 mm

**Support isolant :**

C'est un composant d'isolation. Max. AC (100 KV), Max. DC (140 KV).

**Barre de connexion:**

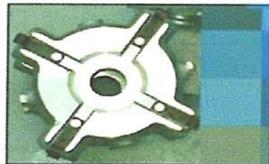
C'est un élément conducteur pour la liaison (tube en aluminium).

**Point de connexion :**

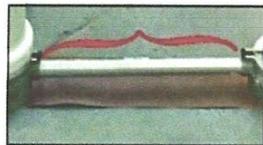
C'est un élément conducteur utilisé pour la connexion. Quatre composants peuvent être reliés horizontalement et deux dans la position verticale.

**Support de base :**

C'est un élément conducteur utilisé pour le montage des barres d'espacement.

**Barre d'espacement :**

Elle est utilisée pour la connexion mécanique et électrique au niveau du sol.



**SEK AC :**

Elément secondaire du diviseur de tension AC, connectée directement à la DMI.

**SEK DC :**

Elément secondaire du diviseur de tension DC, connectée directement à la DMI.

**MK BNC :**

C'est un Câble coaxial avec fiches BNC utilisé pour connecter la deuxième partie de diviseurs HT à des instruments de mesure.

**Un ensemble d'électrodes :**

Des électrodes supplémentaires à utilisé dans les différentes géométries.

**Unité de commande :**

Elle est utilisée pour : le contrôle et la régulation du transformateur (courant et tension), le réglage de la distance entre les électrodes, et la commande de l'interrupteur de mise à la terre.

**La DMI 551 :**

La DMI (Digital Measuring Instrument) est l'outil de réception et affichage des mesures, réglable suivant le mode de test AC ou DC.



*Tableau 3.1: Equipements (plateforme Haute tension) [22].*

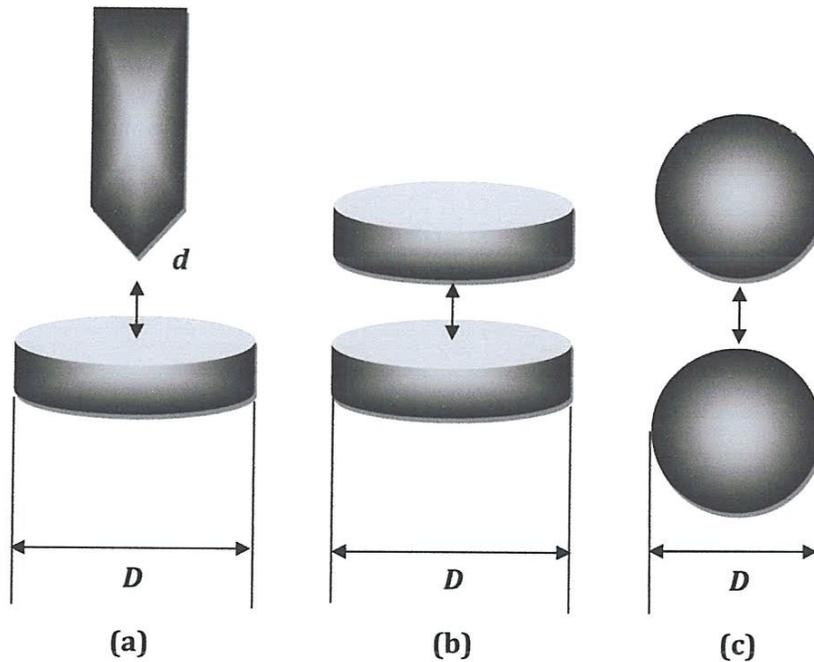
**3.2 Résultats et discussions :**

Les différentes configurations des électrodes utilisées sont montrées sur la figure 3.2. Ces configurations sont les suivantes : a) Pointe/Plan, b) Plan/Plan, c) Sphère/Sphère.

Afin d'étudier l'influence de la variation de la géométrie des électrodes sur les valeurs de la tension de claquage, les mêmes conditions expérimentales ont été appliquées sur ces différentes configurations.

Quelle que soit la configuration d'électrodes utilisée, la distance inter électrodes variée de 4.5mm à 22.5 mm, sous une température et une pression constantes, ( $T=20^\circ$  et  $p=1\text{bar}$ ).

Le réglage de cette distance est fait manuellement en respectant toutes les consignes de sécurité.



$d$  : la distance inter électrodes,  $D$  : diamètre de la géométrie.

**Figure 3.2 : Les électrodes expérimentales utilisées.**

### 3.2.1 Claquage en tension continue (DC) :

L'ensemble du dispositif de mesure de tension du claquage apparaissant en tension continue est montré sur les Figures suivantes 3.3 et 3.4 :

Le Transformateur monophasé peut délivrer une tension 100 KV, pour l'obtention de la tension continue on utilise des diodes montées en série.

Le réglage de la tension est réalisé par un autotransformateur pour obtenir la tension côté haut tension de 0 à 100 KV, les deux tensions (continue et alternative) sont en général rapportées à la pression normalisée de 760 mm Hg et à la température de  $20^\circ$ .

La tension de claquage est mesurée par la DMI (Digital Measuring Instrument), est l'outil de réception et affichage des mesures, réglable suivant le mode de test AC ou DC).

Le contrôle et la régulation du transformateur (courant et tension) est réalisé par une unité de commande.

Le changement de polarités est obtenu en inversant le sens des diodes pour les essais en tension continue.

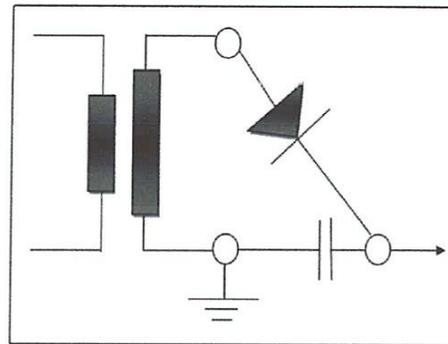


Figure 3.3 : montage expérimental, (tension continue). Figure 3.4 : Montage DC.

- Configuration point-plan :

Le tableau suivant présente la tension de claquage  $V_c$  mesurée en polarité positive et négative.

La configuration d'électrodes utilisée est Point-Plan, la distance entre les deux électrodes peut varier de 4.5 à 22.5 mm.

Dans cette configuration d'électrodes la tension de claquage  $V_c$  mesurée représente la tension nécessaire pour que le streamer puisse se propager de la pointe jusqu'au plan.

| d (mm)                 | 4.5  | 9    | 13.5  | 18    | 22.5  |
|------------------------|------|------|-------|-------|-------|
| $V_c$ (KV) polarité(+) | 8.84 | 9.75 | 14.96 | 19.97 | 22.73 |
| $V_c$ (KV) polarité(-) | 8.99 | 14.6 | 25.4  | 34.1  | 37.4  |

Tableau 3.2 a): la tension de claquage pour des électrodes pointe-plan.

- **Configuration plan-plan :**

Les tensions de claquage  $V_c$  de l'air sont présentées sur le tableau suivant, la configuration d'électrodes utilisée est Plan-plan.

La distance entre les deux électrodes variées de 4.5 à 22.5 mm.

|                              |              |              |              |              |              |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>d (mm)</b>                | <b>4.5</b>   | <b>9</b>     | <b>13.5</b>  | <b>18</b>    | <b>22.5</b>  |
| <b><math>V_c</math> (KV)</b> | <b>12.50</b> | <b>25.13</b> | <b>36.51</b> | <b>48.16</b> | <b>59.04</b> |

*Tableau 3.2 b): la tension de claquage pour des électrodes plan-plan.*

- **Configuration sphère-sphère :**

Les électrodes sont constituées de deux sphères de diamètre 50 mm. Des sphères en inox.

La configuration d'électrodes utilisée est sphère-sphère, la distance variée de 4.5 à 22.5 mm. Les décharges dans l'espace inter électrodes peuvent être observées à travers deux hublots de la cellule.

|                              |              |              |              |              |              |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>d (mm)</b>                | <b>4.5</b>   | <b>9</b>     | <b>13.5</b>  | <b>18</b>    | <b>22.5</b>  |
| <b><math>V_c</math> (KV)</b> | <b>15.17</b> | <b>27.71</b> | <b>39.89</b> | <b>52.10</b> | <b>62.08</b> |

*Tableau 3.2 c): la tension de claquage pour des électrodes sphère-sphère.*

La Figure 3.5 présente la variation de la tension (continue) de claquage en fonction de la distance inter électrodes sous température constante  $T=20^\circ$  pour les 3 configurations proposées au Figure 3.2.

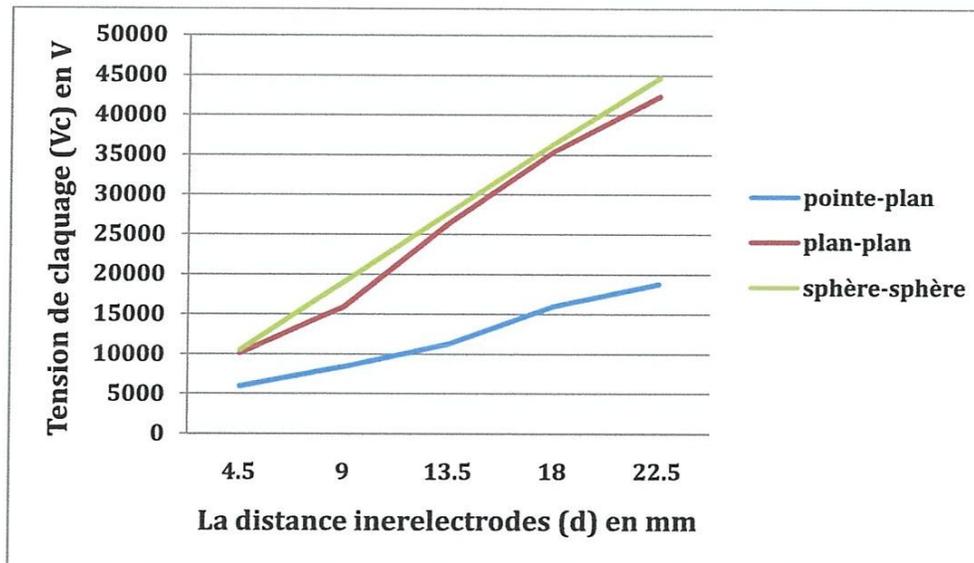
- Configuration sphère-sphère :

La tension de claquage  $V_c$  est mesurée dans la configuration sphère-sphère avec une distance entre les deux électrodes sphériques est 4.5 à 22.5 mm.

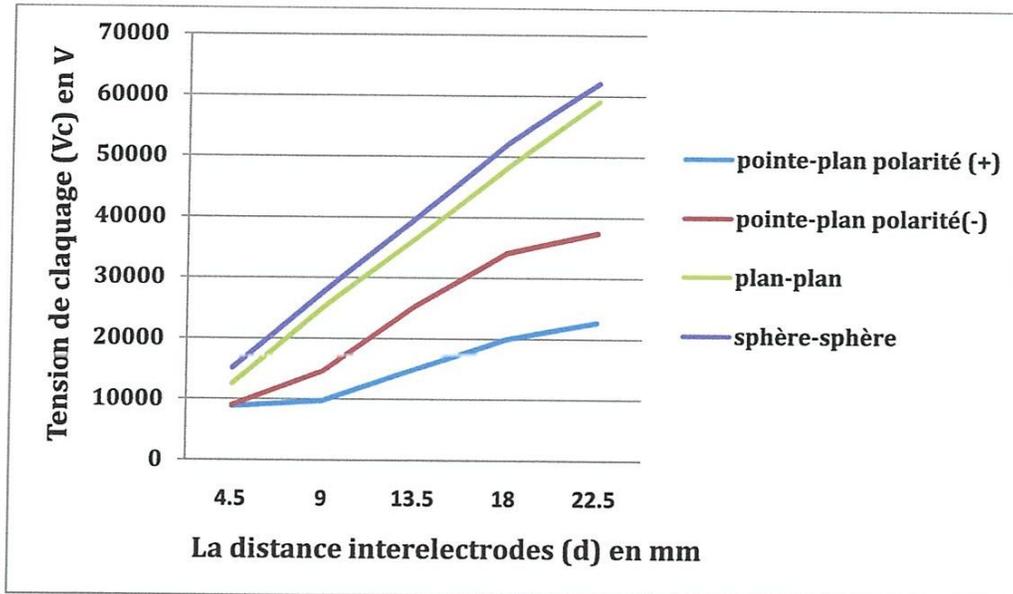
|            |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| d (mm)     | 4.5   | 9     | 13.5  | 18    | 22.5  |
| $V_c$ (KV) | 10.53 | 19.04 | 27.81 | 36.41 | 44.65 |

*Tableau 3.3 c): la tension de claquage pour des électrodes sphère-sphère.*

La Figure 3.8 présente la variation de la tension (**alternative**) de claquage en fonction de la distance inter électrodes sous température constante  $T=20^\circ$  pour les 3 configurations proposées au Figure 3.2.



*Figure 3.8 : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter électrodes pour différentes configurations d'électrodes.*



*Figure 3.5 : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance interélectrodes pour différentes configurations d'électrodes.*

### 3.2.2 Claquage en tension alternative (AC) :

En appliquant un champ alternatif au gaz, alors le comportement du système dépend de la distance inter électrodes et de la fréquence de la tension d'alimentation.

Le système de dispositif des essais de rupture diélectrique de l'air sous une tension alternative comprend les éléments présentés aux figures 3.6 et 3.7.

Le Transformateur monophasé peut délivrer une tension 100 KV, pour l'obtention de la tension continue on utilise des diodes montées en série.

Le réglage de la tension est réalisé par un autotransformateur pour obtenir la tension côté haut tension de 0 à 100 KV.

La tension de claquage est mesurée par la DMI (Digital Measuring Instrument), est l'outil de réception et affichage des mesures, réglable suivant le mode de test AC ou DC).

Le contrôle et la régulation du transformateur (courant et tension) est réalisé par une unité de commande.

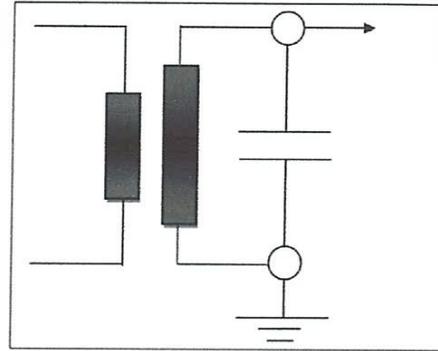
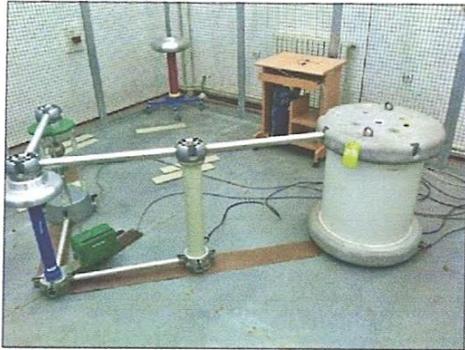


Figure 3.6 : montage expérimental, (tension alternative). Figure 3.7 : Montage AC.

- **Configuration pointe-plan :**

Le tableau suivant présente la tension de claquage  $V_c$  mesurée pour une configuration d'électrodes Point-Plan, la distance entre les deux électrodes peut varier de 4.5 à 22.5 mm.

Dans cette configuration d'électrodes la tension de claquage  $V_c$  mesurée représente la tension nécessaire pour que l'air devienne conducteur de la pointe jusqu'au plan.

|                              |             |             |              |              |              |
|------------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>d (mm)</b>                | <b>4.5</b>  | <b>9</b>    | <b>13.5</b>  | <b>18</b>    | <b>22.5</b>  |
| <b><math>V_c</math> (KV)</b> | <b>5.95</b> | <b>8.41</b> | <b>11.32</b> | <b>15.99</b> | <b>18.78</b> |

Tableau 3.3 a): la tension de claquage pour des électrodes pointe-plan.

- **Configuration plan-plan :**

Les tensions de claquage  $V_c$  de l'air sont présentées sur le tableau suivant, la configuration d'électrodes utilisée est Plan-plan.

La distance entre les deux électrodes peut varier de 4.5 à 22.5 mm.

|                              |              |              |              |              |              |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>d (mm)</b>                | <b>4.5</b>   | <b>9</b>     | <b>13.5</b>  | <b>18</b>    | <b>22.5</b>  |
| <b><math>V_c</math> (KV)</b> | <b>10.10</b> | <b>15.93</b> | <b>26.50</b> | <b>35.44</b> | <b>42.29</b> |

Tableau 3.3 b): la tension de claquage pour des électrodes plan-plan.

### 3.3 Interprétations :

- **Toutes les configurations des électrodes (pointe-plan, plan-plan et sphère-sphère) :**

Comme énoncé précédemment, la tension correspondant au claquage est déterminée à l'instant où le courant augmente de façon brutale.

Les valeurs relevées pour chacune des mesures seront étudiées en terme de tension de claquage, c'est-à-dire selon l'épaisseur de diélectrique déposée.

La première observation sur la comparaison des mesures réalisées pour différentes géométries, les tensions de claquage sont plus élevées pour les plus grandes distances inter électrodes, parce qu'il y a peu d'ionisation et le claquage devient difficile.

- **Configuration des électrodes non identiques (pointe-plan) :**

Dans ce cas (situation pointe/plan), lorsque le rayon de courbure d'une des électrodes est très faible (situation trouvée dans des géométries pointe/plan) le renforcement du champ électrique au niveau de l'électrode de faible rayon est très important, "L'effet de pointe" vient du fait que le champ électrique est plus fort au voisinage d'une pointe conductrice chargée. Tous les phénomènes d'ionisation (ionisation due au champ intense) sont donc plus importants au voisinage d'une pointe.

- **Configuration des électrodes identiques (plan-plan et sphère-sphère) :**

Pour la configuration identiques des électrodes (plan-plan et sphère-sphère) nous avons besoins d'une grande tension afin d'effectue le claquage de l'air, l'uniformité du champ dépend de la surface équidistante des électrodes celle-ci est plus étendue pour des électrodes planes que pour des électrodes sphériques.

Nous retrouvons bien ainsi que, le développement d'une décharge dépend tout d'abord de la répartition du champ.

- **La polarité (tension continue) :**

La tension continue de claquage en polarité négative est plus grande qu'en polarité positive.

- **La polarité (tension alternative) :**

Dans le cas d'une tension alternative, les mécanismes élémentaires sont alternativement les mêmes que pour les décharges positives ou négatives, à condition que les charges d'espace aient pu se neutraliser dans le milieu avant l'inversion de la polarité.

- **Les tensions : continue et alternative :**

Les tensions continues de claquage de l'air sont plus élevées par rapport à celles mesurées en tensions alternatives pour toutes les différentes géométries.

- **Minimum de la courbe de paschen :**

On ne peut pas obtenir du minimum de la courbe de paschen quelque soit la diminution de la distance inter électrodes, pour établir une courbe de Paschen il faut faire varier largement le paramètre Pd (donc diminuer la pression).

**Conclusion :**

Les gaz sont des "diélectriques" dans le sens d'isolants électriques, et sont employés pour empêcher l'écoulement du courant, durant l'avalanche électronique les électrons rapides sont absorbés par l'anode, tandis que les ions positifs moins rapides forment dans le gaz une charge d'espace, la taille de la charge d'espace dépend de la pression du gaz.

Dans ce chapitre, on a effectué des mesures de la tension de claquage de l'air, pour différentes configuration et différentes distances inter électrodes.

On a souhaité utilisé d'autres gaz mais malheureusement la manipe n'est pas équipée d'enceinte permettant de varier la pression et le diélectrique.

## **Conclusion générale :**

Ce travail nous a permis de mesurer la tension de claquage de l'air en fonction de la distance inter électrodes et pour différentes configurations des électrodes, nous avons obtenu des résultats logiques mais ils restent incomplets en raison de l'absence de quelques appareils de commande et de mesure.

### ***En perspectives :***

Pour avoir une validité des résultats et minimiser les erreurs il faut placer la cellule dans un banc expérimental, ce banc est constitué d'une étuve climatique, une enceinte basse pression contenant deux électrodes est placée à l'intérieur de cette étuve.

L'une des électrodes est fixée sur un axe solidaire d'une vis micrométrique permettant de régler la distance inter électrodes  $d$ .

Ce banc permet de balayer des plages de température, varier la pression et ajuster le taux d'humidité relative.

Les consignes pour le conditionnement de l'atmosphère de l'étuve sont fixées à l'aide d'un ordinateur et régulées dans l'enceinte de basse pression à l'aide des vannes, deux pompes connectées en parallèle et fonctionnant simultanément en fonction de la température permettent l'obtention de niveaux de pression à température ambiante, la lecture du niveau de pression se fait à l'aide d'un manomètre.

La température à l'intérieur de l'enceinte est mesurée à l'aide du thermocouple, la régulation du degré d'humidité, tant avant que pendant l'essai, est indispensable pour l'interprétation correcte des résultats d'essai.

Enfin nous proposons aux responsables du laboratoire "LGEG" d'équiper la manipe "HT" par ce banc expérimental pour enrichir et varier les mesures effectuées.

**Références  
bibliographiques.**

- [1] Bertrand GOTTIN «*Analyse multi-capteurs de signaux transitoires issus de systèmes électriques*», thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Grenoble, Octobre. 2010.
- [2] Med Abdelhafid BOUHAMLA «*Caractérisation des matériaux de construction par les méthodes électriques cas des inclusions dans les pates pures*», mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de magistère en génie civil, université Mantouri de Constantine.
- [3] Boujemâa DANOUJ «*Caractérisation des signatures de décharges partielles en utilisant une nouvelle génération de coupleurs piézoélectriques*», thèse de Doctorat Ph.D. École de technologie supérieure université du Québec, Septembre. 2012.
- [4] Abdelkader NADJEM, Zoubir MECHERI, Ahlem MENAIAIA «*Étude comparative entre les conducteurs et les isolants dans les réseaux électriques*», Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme en Licence Académique, Université 8Mai 1945 – Guelma, Juin 2012.
- [5] Théodore WILDI et Gilbert SYBILLE «*Electrotechnique*», 4<sup>ème</sup> édition.
- [6] Fouzia MEBARKI «*Caractérisation des propriétés diélectriques de matériaux composites à base de polyéthylène téréphtalate recyclé*», mémoire l'obtention de la maîtrise en génie mécanique m. Inge, université du Québec, Juin. 2012.
- [7] Cédric SIRE «*Propriétés électriques à l'échelle nanométrique des diélectriques dans les structures MIM et MOS*», thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université Joseph Fourier, Grenoble I, Septembre 2009.
- [8] A. Tilmatine «*TECHNIQUES DE LA HAUTE TENSION*», cours donné à l'université DJILLALI LIABES.
- [9] Michel STOLIDI «*Matériaux en Electrotechnique*», IUFM AIX-MARSEILLE, CAPET et PLP2 Electrotechnique.
- [10] Pierre LEBAS «*Diagnostic des câbles souterrains par détection de décharges partielles*», travail de fin d'études en vue de l'obtention du grade d'ingénieur civil électromécanicien (mécatronique-productique), Faculté des Sciences Appliquées - Université de Liège, Année académique 2007–2008.

- [11] Flavien KOLIATENE «*Contribution a l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique*», thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse, Janvier. 2009.
- [12] Claude CHEVASSU «*MACHINES ÉLECTRIQUES : Cours et Problèmes*», Ecole nationale supérieure maritime. Octobre. 2011.
- [13] Lucian CALIAP «*Etude de l'optimisation des isolants d'un point de vue diélectrique pour les contraintes du GIS* », thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Grenoble, Septembre 2010.
- [14] Anh Tho VU THI «*Etude de l'origine des décharges partielles sur des substrats céramiques enrobés*», thèse de Doctorat Université de Grenoble, Août 2006.
- [15] Mezari NAOUEL «*Diagnostic des transformateurs de puissances* », mémoire de magister en électrotechnique, université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- [16] Bassem KHADDOUR «*Modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée*», thèse pour obtenir le grade de docteur de l'INPG, institut national polytechnique de Grenoble, Novembre. 2006.
- [17] Elyse SILI «*Etude et caractérisation des décharges partielles et du vieillissement du polyimide en environnement aéronautique* », thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse, Décembre. 2012.
- [18] Jean-François AFFOLTER «*Haute Tension*», école d'ingénieurs du canton de Vaud, Octobre. 2000.
- [19] Nabila DHAHBI ep. MEGRICHE «*Modélisation Dynamique des Décharges sur les Surfaces d'Isolateurs Pollués sous Différentes Formes de Tension: Elaboration d'un Critère Analytique de Propagation*», thèse de doctorat, université de Lyon, Mars 1992.
- [20] Rachidi FARHAD «*La foudre et ses effets électromagnétiques*», note de cours, École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL-DE-LRE, 2004.

- [21] Gaétan VIVIEN «*DÉTECTION ULTRASONORE DE DÉCHARGES PARTIELLES DANS LES TRANSFORMATEURS*», rapport de stage, Grenoble. Aout. 2004.
- [22] M. KACHI M.REMADNIA A. LEMZADMI «*Techniques de Haute Tension*», TRAVAUX PRATIQUES, université 8 mai 1945 Guelma. 2010.
- [23] KADI Hocine «*Influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension* », mémoire de magister en électrotechnique, Université MOULOUD MAMERA TIZI-OUZOU.
- [24] G. CHAGNON «*Cours de Génie Electrique*», Université Paris VI-Jussieu, Année 2003-2004.
- [25] Vincent BOUCHER «*Etude du vieillissement de matériaux hautes températures pour machines tournantes et définition de méthodes d'essais accélérées*», thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'université de Grenoble, Octobre 2010.
- [26] Ngoc Minh NGUYEN «*Caractérisation de matériaux écologiques en vue du remplacement du SF6 dans les systèmes d'isolation moyenne tension*», thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Grenoble, Août. 2006.
- [27] Leyla ZEGHICHI «*Etude D'une Décharge Electrique par la Méthode De Monte Carlo*», mémoire de magister en physique des rayonnements, université de Batna.
- [28] Nacim CHARROUF «*Caractérisation Electrique des Diélectriques à Faible Permittivité*», mémoire pour l'obtention du diplôme de magister en microélectronique, université de Batna, Année universitaire 2007-2008.