

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA – BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie électrique



# *MEMOIRE DE FIN D'ETUDES*

**Présenté par :**

**Mr. BOUSLIMANE Houssam**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

*Spécialité : Réseaux électriques*

**Thème**

**Caractérisation de certains isolants utilisés dans les  
équipements électriques**

**Soutenu le 13/10/2021, Devant le jury composé de :**

**Président : Mr. YAHIAOUI**

**Examinatrice : Mlle. ROUHA**

**Encadreur : Mr. OUATAH**

**2020-2021**

## Remerciements

Mes remerciements vont premièrement à dieux le tout puissant.

Je tiens à également a exprimé toute ma gratitude à mon encadreur monsieur OUATAH pour son dévouement et sa disponibilité durant toute la période de la réalisation de ce mémoire et par son omni présence avec ses précieuses conseils et remarques.

Mes remerciements aussi à tous les enseignants du département génie électrique qui ont contribué à notre formation surtout monsieur ATROUNE Salah qui n'a ménagé aucuns efforts et soutiens à mon encontre et à mon égard durant toute la période de mes études et la préparation de ce mémoire.

En fin, je remercie mon amis AMMARI Zidane pour son accompagnement pendant toute cette période et BELAGGOUN Chakib pour son soutien psychologique et ses encouragements.

## Dédicaces

*Je dédie ce mémoire à toute ma famille, en particulier mes deux parents ainsi que mes sœurs et à tous mes amis surtout Zidane, Chakib et Mohand akli.*

*Houssam*

# Table des Matières

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les isolants utilisées dans les équipements électriques</b> .....	<b>4</b>
I.1. Introduction .....	5
I.2. Isolants électriques, concepts et définitions .....	5
I.3. Diélectriques gazeux .....	6
I.3.1. Décharge électrique dans les gaz .....	6
I.3.2. L'avalanche électrique .....	6
I.3.3. Théorie de Townsend .....	7
I.3.3.1. Mécanisme de claquage .....	7
I.3.3.2. Critère de claquage .....	7
I.3.4. Théorie de canal (streamer) .....	8
I.3.4.1. Mécanisme de claquage .....	8
I.3.4.2. Types de streamers .....	10
I.3.4.3. Critère de claquage .....	11
I.3.5. Courbes de Paschen .....	11
I.3.6. Domaines d'application des diélectriques gazeux .....	12
I.4. Diélectriques liquides .....	13
I.4.1. Rigidité diélectrique des liquides .....	14
I.4.2. Phénomène de pré-claquage et claquage .....	14
I.4.2.1. Phénomènes de génération et de propagation des streamers .....	14
I.4.2.2. Processus de claquage dans les liquides .....	14
I.4.3. Claquage dans les diélectriques liquides .....	15
I.4.3.1. Théories électroniques .....	15
I.4.3.2. Théories des bulles .....	15
I.4.3.3. Mécanisme thermique .....	16
I.4.3.4. Mécanisme de cavitation .....	16
I.4.3.5. Mécanisme de claquage par pont .....	17
I.4.4. Domaine d'application des diélectriques liquides .....	18
I.5. Diélectriques solides .....	18
I.5.1. Différentes structures d'un matériau solide .....	18
I.5.1.1. Structure cristalline .....	18
I.5.1.2. Structure amorphe .....	18

I.5.1.3. Structure semi- cristalline .....	19
I.5.2. Polarisation des diélectriques solides .....	19
I.5.3. Différents types de polarisation .....	19
I.5.3.1. Polarisation électronique .....	19
I.5.3.2. Polarisation ionique (ou atomique) .....	19
I.5.3.3. Polarisation dipolaire ou d'orientation .....	20
I.5.3.4. Polarisation interfaciale .....	20
I.5.4. Claquage des diélectriques solides .....	21
I.5.4.1. Claquage thermique .....	22
I.5.4.2. Claquage d'origine électronique .....	22
I.5.4.3. Claquage intrinsèque .....	22
I.5.4.4. Claquage par avalanche .....	22
I.5.4.5. Claquage associé au volume libre .....	23
I.5.4.6. Claquage électromécanique .....	23
I.5.5. Domaine d'application des diélectriques solides .....	24
I.6. Conclusion .....	24
<b>Chapitre II : Description du dispositif expérimental .....</b>	<b>25</b>
II.1. Introduction .....	26
II.2. Dispositif expérimental .....	26
II.2.1. Source d'alimentation .....	27
II.2.2. Cellule d'essai .....	28
II.2.3. Appareils de mesure .....	29
II.3. Matériaux utilisés .....	30
II.3.1. Diélectriques gazeux : l'air .....	30
II.3.2. Diélectriques liquide : l'huile borak 22 .....	30
II.3.3. Diélectriques solide : polyéthylène .....	31
II.4. Protocole expérimental .....	31
II.4.1. Essais dans l'air .....	31
II.4.2. Essais sur l'huile borak 22 .....	32
II.4.3. Essais sur diélectrique « air-film en polyéthylène-air » .....	32
II.5. Correction des résultats suivant les conditions atmosphériques .....	33
II.6. Conclusion .....	34
<b>Chapitre III : Résultats et discussions .....</b>	<b>35</b>
III.1. Introduction .....	36
III.2. Résultats expérimentaux et discussions .....	36

III.2.1. Influence de la distance inter-électrode sur la tension de claquage .....	36
III.2.2. Influence de la forme de l'électrode haute tension sur la tension de claquage .....	43
III.2.3. Influence de la vitesse de la rampe de tension sur la tension de claquage de l'air	44
III.2.4. Influence de la position de la barrière sur la tension de claquage de l'air .....	46
III.3. Conclusion .....	47
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>48</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>50</b>

# Liste des Figures

## Chapitre I : Généralités sur les isolants utilisées dans les équipements électriques

**Figure I.1** : Accélération de l'électron.

**Figure I.2** : Ionisation par collision.

**Figure I.3** : Avalanche électronique.

**Figure I.4** : Création d'une avalanche.

**Figure I.5** : Propagation des avalanches.

**Figure I.6** : Représentation schématique du processus de développement d'un streamer positif.

**Figure I.7** : Représentation schématique du processus de développement d'un streamer négatif.

**Figure I.8** : Courbe de Paschen pour différents gaz.

**Figure I.9** : Illustration des différents types de polarisation.

**Figure I.10** : Différents types de claquage des isolants solides.

**Figure I.11** : Schéma descriptif de l'avalanche

## Chapitre II : Description du dispositif expérimental

**Figure II.1** : Schéma du dispositif expérimental utilisé.

**Figure II.2** : Photo de la source basse tension SG1.

**Figure II.3** : Photo de la source haute tension.

**Figure II.4** : Cellule d'essais avec des électrodes planes.

**Figure II.5** : Configurations d'électrodes utilisées.

**Figure II.6** : Photo du voltmètre de crête.

**Figure II.7** : Photo du voltmètre électrostatique du laboratoire haut tension.

**Figure II.8** : Echantillon du film en polyéthylène.

**Figure II.9**: Influence de la position de la barrière isolante sur les tensions de claquage de l'air.

### Chapitre III : Résultats et discussions

**Figure III.1 :** Influence de la distance inter-électrode sur la tension de claquage de l'air en géométrie plan-plan.

**Figure III.2 :** Influence de la distance inter-électrode sur la tension de claquage de l'air en géométrie sphère-plan.

**Figure III.3 :** Influence de la distance inter-électrode sur la tension de claquage de l'air en géométrie pointe-plan.

**Figure III.4 :** Influence de la distance inter-électrode sur la tension de claquage de l'huile en géométrie pointe-plan.

**Figure III.5 :** Photos des arcs électriques dans l'huile borak 22.

**Figure III.6 :** Influence de la distance inter-électrode sur la tension de claquage d'un espace d'air avec barrière.

**Figure III.7 :** Photo d'un claquage dans espace d'air avec barrière solide en géométrie pointe-plan.

**Figure III.8 :** Perforations au niveau du diélectrique solide « film en polyéthylène ».

**Figure III.9 :** Influence de l'insertion d'une barrière solide dans un espace d'air sur la tension de claquage.

**Figure III.10 :** Influence de la forme de l'électrode HT sur la tension de claquage de l'air.

**Figure III.11 :** Influence de la vitesse de la rampe de tension sur la tension de claquage de l'air.

**Figure III.12 :** Tension de claquage de l'air en fonction de la distance inter-électrodes pour les cinq vitesses de rampe de la tension appliquée.

**Figure III.13 :** Influence de la position du film en PE sur la tension de claquage de l'air en géométrie pointe-plan.

## Liste des Tableaux

**Tableau. I.1 :** Différents diélectriques liquides

# **Introduction générale**

# Introduction générale

Les matériaux jouent un rôle prépondérant dans la réalisation du matériel électrique et les matériaux isolants sont parmi ceux dont le choix et l'emploi posent les problèmes les plus délicats à résoudre dans la conception, la réalisation et l'exploitation des systèmes électriques. Ces systèmes d'isolation peuvent être composés des trois états de la matière : solide, liquide et gazeux.

Les diélectriques, à l'état solide, liquide ou gazeux, font l'objet d'un intérêt dans diverses applications industrielles. Ils sont caractérisés par leurs propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques.

Les isolants sont utilisés pour :

- ✓ Assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés,
- ✓ Protéger les personnes des risques d'électrocution et les équipements des risques de court-circuit,
- ✓ Supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre.

La valeur du champ maximum juste avant un claquage définit la rigidité diélectrique d'un matériau, cette valeur est différente en tension alternative qu'en tension continue. L'étude de la rigidité diélectrique et du champ électrique au niveau des isolations est très importante dans l'engineering haut tension. En effet, plus la tension est élevée, plus le champ électrique augmente. Les distances d'isolation nécessaires sont alors importantes et le matériel encombrant, donc cher. Par conséquent, Il faut utiliser au mieux les systèmes d'isolation afin de réduire la taille des appareils, mais sans pour autant en diminuer la qualité.

L'air en tant que diélectrique, est largement rencontré comme isolation entre électrodes dans la technique des hautes tensions. Ces électrodes peuvent être soit les parties métalliques sous tension de différents appareillages, transformateurs, disjoncteurs, ...etc., soit aussi des conducteurs de lignes aériennes ou des bornes haute tension dans les laboratoires d'essais.

Dans certaines applications l'air ne suffit pas en tant qu'isolation pour supporter les contraintes du champ électrique. Dans ce cas, l'insertion d'une barrière solide semble la solution la plus adéquate pour renforcer la rigidité diélectrique du milieu. En électrotechnique, les principales applications des barrières isolantes concernent leur insertion entre les contacts des disjoncteurs à gaz, l'interrupteur haute tension, les bornes de traversées, les transformateurs et les actionneurs.

## Introduction générale

---

Les diélectriques liquides ; un autre type de diélectrique ; sont beaucoup plus utilisés dans des applications électrotechniques et électroniques de puissance. La particularité de ce type d'isolant, comme les huiles diélectriques, est qu'en plus de leur fonction principale qui est l'isolation électrique, ils assurent d'autres fonctions qui peuvent être secondaires mais importantes dans les équipements électriques à savoir : le refroidissement par l'absorption de la chaleur dégagée par les éléments sous tension, l'extinction des arcs électriques, l'élimination des décharges partielles, ..., etc.

En haute tension, les éléments de base des isolations sont des isolants solides. Ils comportent en plus par rapport aux autres isolants, la particularité d'assurer la rigidité mécanique des matériels électriques. De plus, L'une des causes du claquage des solides en général et en particulier les polymères composites sont les charges électriques, qui sont injectées par les électrodes ou proviennent par dissociation de particules dans le volume du matériau. Nous entendons par charge d'espace, l'ensemble des charges électriques positives ou négatives, piégées dans un diélectrique, ce qui inclut les charges de surface et de volume.

Dans cette étude, nous nous intéresserons à la mesure de la tension de claquage. Le présent manuscrit comporte trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous décrivons dans un premier temps les phénomènes de décharges dans les diélectriques gazeux, solides et liquides, puis les principaux mécanismes de claquage de ces diélectriques. Nous abordons par la suite les domaines d'application de chaque matériau.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des dispositifs expérimentaux utilisés pour la mesure de la tension de claquage pour les différents matériaux (l'air, l'huile borak 22 et l'air avec une barrière en polyéthylène).

Dans le troisième chapitre, nous présentons et analysons les résultats expérimentaux de mesure de la tenue diélectrique des diélectriques précédents pour différentes configurations d'électrodes. L'influence des divers paramètres sur la tenue diélectrique est également traitée. Enfin, nous terminons notre manuscrit par une conclusion générale.

# **Chapitre I : Généralités sur les isolants utilisés dans les équipements électriques**

## I.1. Introduction

Les composants et systèmes du génie électrique intègrent nécessairement des éléments d'isolation électrique entre des parties portées à des potentiels différents ou dans un souci de protection des biens et des personnes. Ces systèmes d'isolation peuvent être composés des trois états de la matière (gazeux, liquide et solide). Un matériau est diélectrique s'il ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. Autrement dit, c'est un milieu qui ne peut pas conduire le courant électrique. À ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique.

La fonction principale d'un isolant est d'empêcher le passage du courant lorsqu'on le soumet à un champ électrique. Cette fonction est primordiale du fait qu'elle est l'une des conditions fondamentales du fonctionnement des matériels de production, de transport et de distribution d'énergie électrique.

Dans ce chapitre, nous donnons quelques définitions du phénomène de claquage et ses aspects généraux qui sont communs à tous les types de matériaux isolants. Il est utile de rappeler d'abord un certain nombre de concepts liés à l'isolant et l'isolation.

## I.2. Isolants électriques, concepts et définitions

### a. Isolant [1]

Un isolant est une substance dont la conductivité est nulle, ou en pratique très faible. L'action d'isoler est le moyen d'empêcher la conduction électrique entre conducteurs soumis à des champs électriques. On peut considérer comme isolant, tous les matériaux dont la résistivité est supérieure à  $10^{10}\Omega/\text{cm}$ .

### b. Isolement [2]

On appelle isolement d'un ouvrage, appareil électrique, son aptitude à supporter les contraintes électriques appliquées à celui-ci (U, E, ...).

### c. Isolation [3]

C'est un système constitué par des matériaux isolants ou un assemblage de matériaux isolants à considérer avec les parties conductrices associées.

### d. Diélectrique [4]

Un diélectrique est défini comme un milieu matériel dans lequel les bandes de conduction et de valence sont séparés par une énergie supérieure à 5 eV. Le milieu matériel peut être constitué par un solide, un liquide ou un gaz.

### e. Isoler [5]

L'action d'isoler est le moyen d'empêcher la conduction entre conducteurs électriques soumis à des tensions différentes.

### f. Système d'isolation [6]

Un système d'isolation est constitué par des matériaux isolants ou un assemblage de matériaux isolants (isolations) à considérer, en liaison avec les parties conductrices associées. On peut classer les isolants en trois catégories : gazeux, liquides et solides.

### I.3. Diélectriques gazeux [7]

Les diélectriques ou les isolateurs de gaz sont largement utilisés dans les équipements électriques et les principaux isolants gazeux sont : l'air atmosphérique, l'azote, les gaz électronégatifs (SF<sub>6</sub>), l'hydrogène...etc. L'air et les gaz secs sont de bons isolants, ils ont des propriétés particulières :

- Rigidité diélectrique variable suivant la nature de gaz.
- Permittivité faible, les gaz sont auto-générateurs.
- Phénomène d'ionisation des gaz.
- Légers et non inflammables.

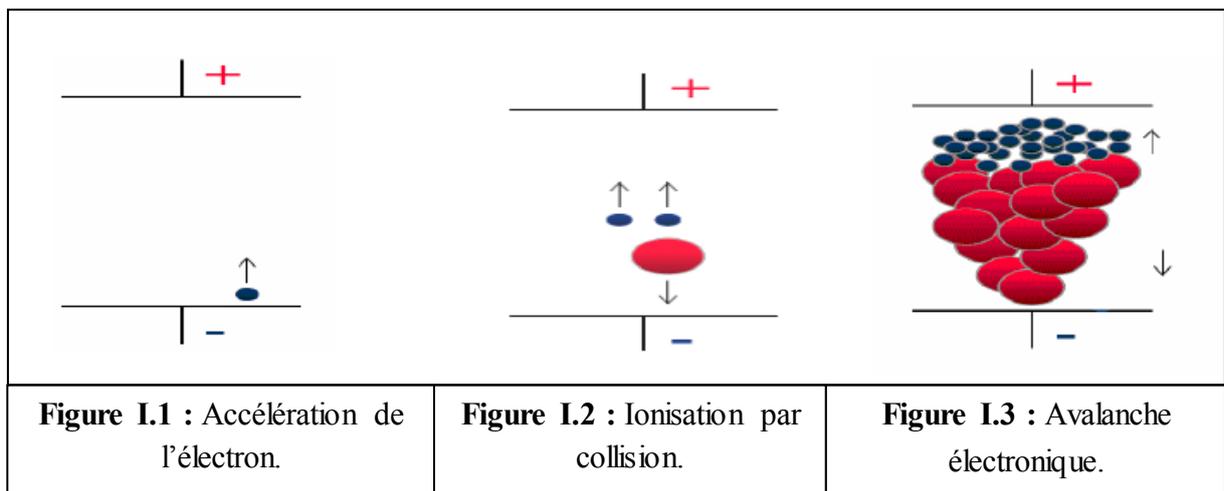
Les isolants gazeux sont assez fortement influencés par les facteurs d'environnement (la température et la pression). Ces deux grandeurs physiques, lorsqu'elles varient, modifient la densité des gaz. Le champ électrique de rupture des gaz isolants diminue avec la température et augmente avec la pression [8]. Le tableau ci-dessous résume les propriétés des isolants gazeux.

#### I.3.1. Décharge électrique dans les gaz

Un gaz est théoriquement un isolant parfait puisqu'il ne contient que des atomes ou des molécules neutres. Pour que l'initiation de la décharge disruptive se produise, il faut qu'au moins une particule chargée dite particule germe, généralement un électron, soit présent dans ce gaz. Dès lors que cet électron est créé, il est accéléré par le champ électrique appliqué et entre en collision avec les molécules neutres du gaz. Quand le champ est suffisant, cette charge, prend assez d'énergie pour ioniser une molécule et créer d'autres charges libres qui à leurs tours peuvent ioniser d'autres molécules. C'est l'effet d'avalanche électronique. Plusieurs avalanches peuvent ainsi être créées dans le gaz. Ces dernières peuvent conduire au claquage électrique suivant deux mécanismes : le mécanisme de Townsend ou le mécanisme de claquage par streamer [9].

#### I.3.2. L'avalanche électrique [10]

Considérons un système de deux électrodes planes et parallèles plongées dans un gaz isolant et entre lesquelles il y a un électron libre. Lorsqu'on applique une tension, l'électron est de plus en plus accéléré sous l'effet du champ électrique (figure I.1). Il parvient ainsi à gagner une énergie suffisante pour ioniser par collisions des particules neutres, donnant naissance à des ions positifs et à de nouveaux électrons (figure I.2). Ce phénomène est caractérisé par un coefficient  $\alpha$  appelé coefficient d'ionisation (ou premier coefficient de Townsend). Chaque électron nouvellement créé contribue à son tour, par ionisation par collisions au cours de son déplacement vers l'anode (électrode positive), à la création d'une avalanche électronique (figure I.3).



### I.3.3. Théorie de Townsend

#### I.3.3.1. Mécanisme de claquage [9,11]

Townsend définit deux coefficients, l'un concernant l'ionisation par choc dans l'air et l'autre l'ionisation superficielle caractérisée par une émission d'électrons à la cathode, le premier coefficient de Townsend ( $\alpha$ ) représente le nombre d'électrons libres par unité de longueur dans la direction du champ engendrés par l'ionisation par choc et le second coefficient de Townsend ( $\gamma$ ) représente le rapport du nombre d'électrons libérés de la cathode par émission secondaire sur le nombre d'ions positifs ayant bombardés la cathode. D'après Townsend les ions positifs de l'avalanche électronique vont vers la cathode (électrode négative). Si ces derniers ont une énergie suffisante, ils peuvent arracher des électrons par bombardement de la cathode qui vont venir renforcer l'avalanche. Lorsque l'intensité du champ électrique est suffisante, ce phénomène devient important. L'avalanche s'auto entretient et le claquage se produit même si la tension n'est plus appliquée.

#### I.3.3.2. Critère de claquage [12]

Le critère de claquage selon Townsend est alors défini comme la tension pour laquelle le courant devient infini [13]. Avant le claquage le courant  $i$  peut s'écrire :

$$i = \frac{i_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \dots\dots\dots (I.1)$$

Pour une distance critique  $d = d_c$ , telle que :

$$1 - \gamma(e^{\alpha d_c} - 1) = 0 \dots\dots\dots (I.2)$$

$$\gamma(e^{\alpha d_c} - 1) = 1 \dots\dots\dots (I.3)$$

Or comme :

$$e^{\alpha d_c} \gg 1 \dots\dots\dots (I.4)$$

On obtient :

$$\gamma e^{\alpha d_c} = 1 \dots\dots\dots (I.5)$$

Pour chaque valeur de  $E/P$ , on trouve une valeur de  $d_c$  et une tension de rupture diélectrique en champ uniforme :

$$V_c = E \cdot d_c \dots \dots \dots (I.6)$$

Ceci signifie également qu'une seule ionisation due à une cause extérieure peut générer un courant très intense. Ce dernier n'est limité que par la résistance de la source. La décharge est autonome.

Si la cathode ou le gaz ne sont pas irradiés, l'apparition du premier électron est due uniquement au rayonnement naturel ambiant (cosmique, nucléaire, lumineux...) en régime impulsif, le temps qui s'écoule entre l'application de  $V_c$  et l'apparition de l'électron germe est essentiellement aléatoire : il est appelé temps statistique. Le temps qui s'écoule entre l'instant d'apparition du premier électron et l'établissement du régime permanent s'appelle temps formatif. La somme de ces deux temps représente le temps de retard.

Pour  $V = V_c$  appelée tension de disruption ou de claquage, le critère de claquage s'écrit :

$$\gamma e^{\alpha d_c} = 1 \dots \dots \dots (I.7)$$

Si  $E$  n'est plus uniforme entre les électrodes,  $\alpha$  varie et le critère de claquage s'exprime par la relation :

$$\gamma \left( \int_0^{d_c} \alpha dx \right) = 1 \dots \dots \dots (I.8)$$

### I.3.4. Théorie de canal (streamer)

#### I.3.4.1. Mécanisme de claquage

Vers 1940, Craggs, Meek et Raether ont établi une théorie des streamers (ou théorie des décharges filamenteuses) complétées après par de nombreuses approches à caractères essentiellement expérimental.

Une avalanche initiée par un électron multiplie exponentiellement le nombre d'électrons en tête de cette avalanche. Ces électrons diffusent et la longueur de l'avalanche s'étend, entraînant une croissance du champ électrique induit par la charge d'espace. Pour une certaine valeur critique de cette longueur, le champ électrique induit devient comparable au champ électrique extérieurement appliqué. Dès lors, l'avalanche électronique se transforme en streamer [14].

Dans la théorie du Streamer, la présence d'une seule avalanche peut provoquer un claquage par l'intermédiaire d'un canal de plasma appelé Streamer. Les mécanismes de base de cette théorie sont :

- La création d'une avalanche primaire du type Townsend engendrée par un électron germe.
- Le renforcement du champ électrique local par la charge d'espace positive laissée par la première avalanche.
- La photo-ionisation du gaz à la tête de l'avalanche.
- La transition avalanche-Streamer lorsque le champ de charge d'espace devient de l'ordre de grandeur du champ électrique appliqué [10].

Un électron primaire se trouvant près de la cathode provoque une avalanche électronique primaire [15], l'avalanche primaire peut prendre naissance en un point quelconque de l'intervalle inter-électrodes pour une valeur critique du champ électrique. Cette avalanche est accompagnée de la création d'une charge d'espace. En effet, dans une avalanche, les électrons forment un nuage négatif qui progresse rapidement vers l'anode (électrode positive) alors que de l'autre côté, les ions positifs restent immobiles (la mobilité des électrons est 100 à 1000 fois supérieure à celle des ions). Le champ devient alors non uniforme et plus intense près des pôles de l'avalanche et surtout au voisinage du pôle positif (constitué par les ions positifs) qui joue le rôle d'une pointe conductrice [9].

Des électrons secondaires sont créés par photo-ionisation autour de la charge d'espace. Ces électrons provoquent en tête d'avalanche de petites avalanches secondaires figure I.4 (b). Le champ de la charge d'espace renforce le champ entre la tête de l'avalanche et la cathode et crée également une composante radiale.

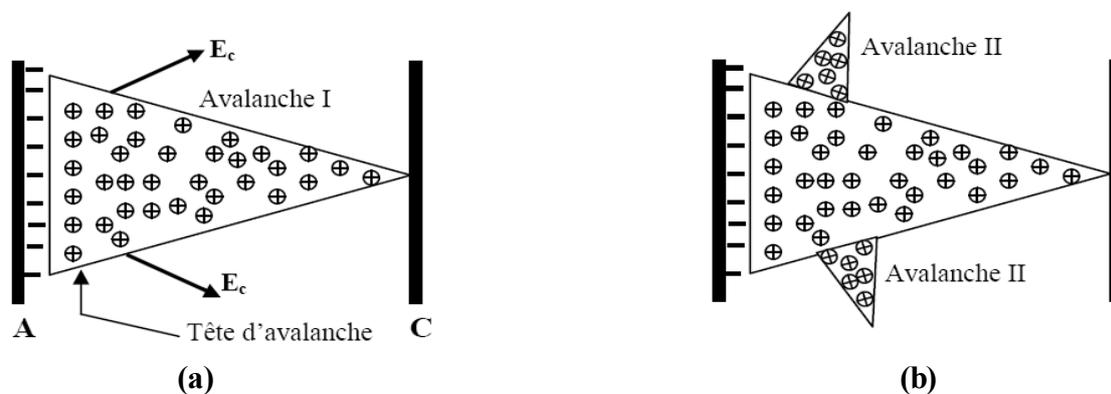


Figure I.4 : Création d'une avalanche.

La charge d'espace augmente en volume et devient un « streamer ». De nouvelles avalanches secondaires viennent s'ajouter à l'avalanche primaire et le streamer progresse figure I.5 (a). Quand il touche la cathode, à ce moment se produit le claquage figure I.5 (b) [16].

Le phénomène de streamers est caractérisé par un temps de retard de l'ordre de  $10^{-8}$  s, alors que la décharge de Townsend nécessite des temps de  $10^{-5}$  s pour entraîner un claquage [17]. Plus le produit  $Pd$  est grand, plus petite est la probabilité pour qu'une avalanche puisse parcourir la distance  $d$  [12].

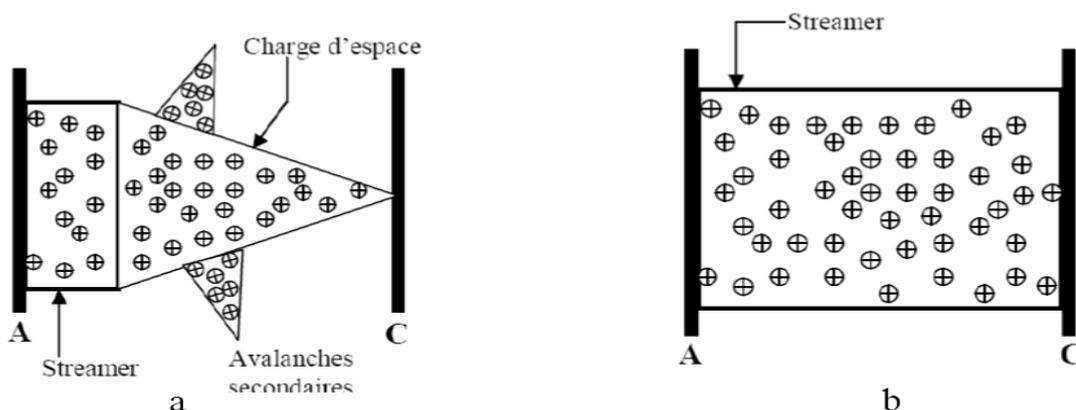
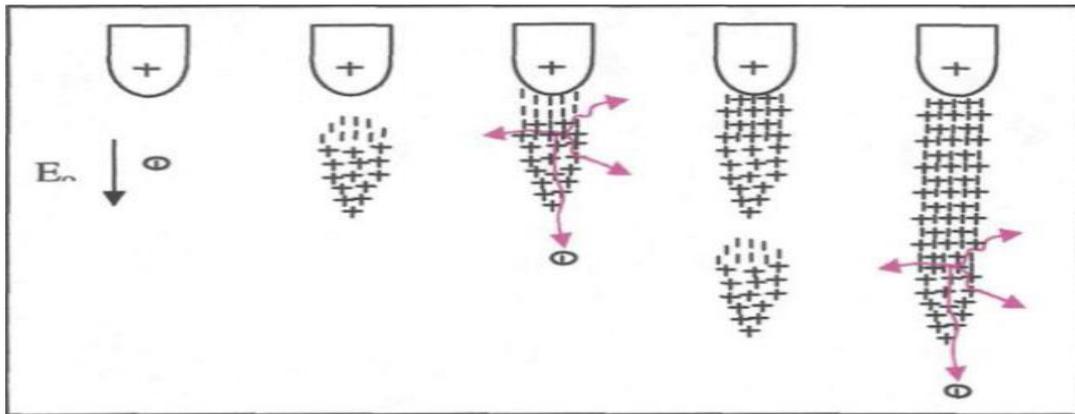


Figure I.5 : Propagation des avalanches.

### I.3.4.2. Types de streamers [18]

#### a. Streamer positifs

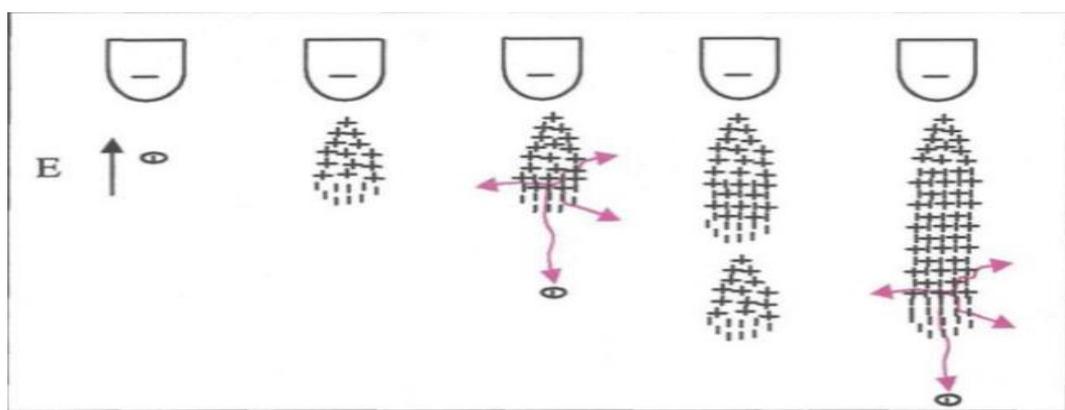
Les streamers positifs ont été beaucoup plus étudiés dans les investigations scientifiques que les streamers négatifs des différences fondamentales peuvent être notées dans leur développement. Dans le cas du streamer positif, l'avalanche primaire initiée par un électron germe amène la présence d'une charge d'espace positive près de la cathode et une injection d'électrons devant l'électrode positive comme le montre la figure ci-dessous.



**Figure I.6 :** Représentation schématique du processus de développement d'un streamer positif.

#### b. Streamer négatifs

Dans le cas du streamer négatif, les ions positifs créés par les avalanches secondaires viennent extraire des électrons de la cathode qui neutralisent les ions positifs et donnent au streamer un excédent de charges négatives.



**Figure I.7 :** Représentation schématique du processus de développement d'un streamer négatif.

A la différence du streamer positif où les avalanches se développent vers la tête du streamer, c'est-à-dire dans le sens où le champ de charge d'espace croît, les avalanches secondaires dans le streamer négatif se propagent vers l'anode, dans le sens où l'effet de la charge d'espace décroît rapidement [19].

### I.3.4.3. Critère de claquage

Plusieurs critères ont été proposés pour caractériser le claquage selon le mécanisme du Streamer. Meek [20] a déterminé l'équation suivante pour la rupture d'un intervalle en champ non uniforme :

$$\alpha_x \exp\left[\int_0^x \alpha dx\right] = k E_x \left(\frac{x}{\rho}\right) \dots\dots\dots (I.9)$$

L'indice  $x$  se rapporte à la position du front de l'avalanche.  $\alpha$  est le coefficient d'ionisation.  $x$  représente la longueur critique de l'avalanche,  $k$  est une constante caractéristique du gaz.  $E$  est le champ électrique et  $\rho$  est la masse volumique du gaz.

Raether [21] a proposé une relation semblable :

$$\int_0^x \alpha dx = k \dots\dots\dots (I.10)$$

Où  $k$  est une constante du gaz. Pour l'air atmosphérique, elle est voisine de 20.

Pedersen [22] a proposé la relation suivante pour l'air :

$$\alpha_x \exp\left[\int_0^x \alpha dx\right] = G(x, \rho) \dots\dots\dots (I.11)$$

Où  $G(x, \rho)$  est une fonction de la longueur critique de l'avalanche et de la masse volumique du gaz.

Pour le SF6, il a proposé la relation suivante :

$$\int_0^x (\alpha - \eta) dx = 18 \dots\dots\dots (I.12)$$

### I.3.5. Courbes de Paschen

La tension d'alimentation minimale pour déclencher la décharge est appelée tension de claquage. Il existe une relation qui lie la valeur de cette tension de claquage à la pression du gaz et de la distance inter-électrode (la loi de Paschen). Cette loi est habituellement représentée par la courbe caractéristique  $U_c = (p \cdot d)$ , où  $p$  est la pression et  $d$  la distance inter-électrode, et dépend de la nature du gaz introduit [23].

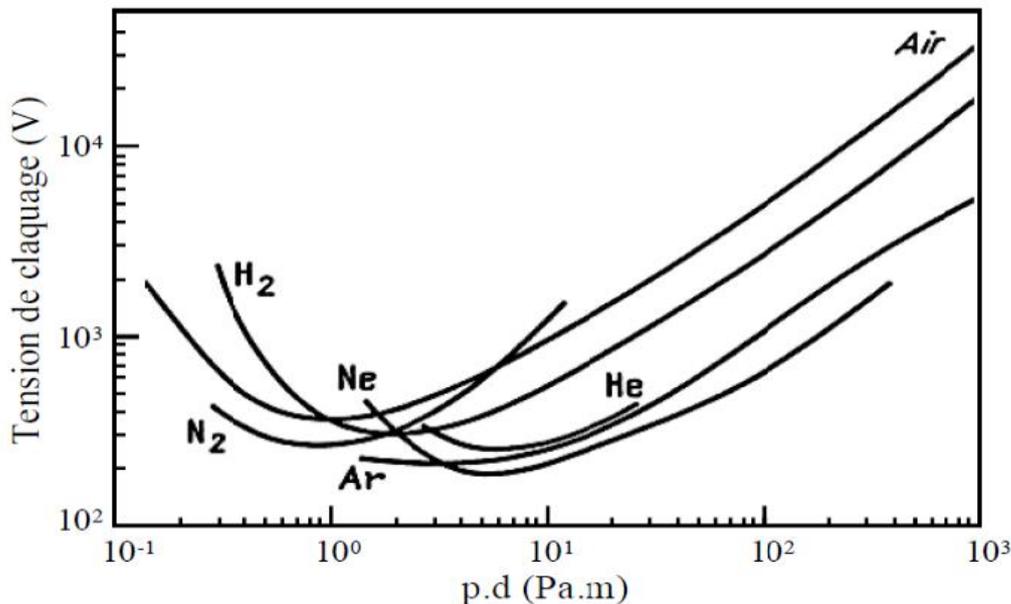


Figure I.8 : Courbe de Paschen pour différents gaz [24]

Un minimum de tension de claquage est relevé en fonction du produit  $p*d$ . Si le produit  $p*d$  est plus grand, les électrons ne sont pas assez accélérés par le champ entre deux collisions pour ioniser le gaz, et il est nécessaire d'augmenter la tension pour obtenir le claquage. Si le produit  $p*d$  est plus petit, le nombre de collisions n'est plus assez important pour générer un nombre de charges libres suffisant, et il faut là aussi augmenter la tension pour obtenir un claquage [25].

### Critère basé sur les courbes de Paschen [12]

On a indiqué que :

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \text{ et de plus } \gamma = \phi\left(\frac{E}{p}\right) \dots\dots\dots (I.13)$$

A partir du critère de rupture diélectrique proposé par Townsend :

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \dots\dots\dots (I.14)$$

On peut montrer que :

$$V_c = f(Pd) \dots\dots\dots (I.15)$$

$V_c$  correspond à la distance critique  $d$  conduisant au claquage. Dans le cas des gaz électronégatifs, il est nécessaire d'utiliser le coefficient d'ionisation :

$$\bar{\alpha} = \alpha - \eta \dots\dots\dots (I.16)$$

### I.3.6. Domaines d'application des diélectriques gazeux

- Ligne aérienne (l'air).
- Disjoncteur (l'air, SF6, ...).
- Transformateur.
- Toutes les installations électriques HT et MT.
- Câbles coaxiaux à haute fréquence en télécommunication.

## I.4. Diélectriques liquides

Les diélectriques liquides sont souvent utilisés en association avec des solides (transformateurs, condensateurs, câbles). Ils ont pour rôle de se substituer aux vacuoles d'air qui sont sources de décharges partielles. Les liquides sont utilisés pour :

- Améliorer le pouvoir de coupure de certains appareils électriques par l'amélioration des conditions d'extinction de l'arc électrique.
- Assurer une bonne isolation électrique.
- Permettre un bon refroidissement.

Les liquides isolants utilisés dans l'industrie électrotechnique peuvent être classés en deux familles principales : les huiles minérales et les huiles synthétiques (les hydrocarbures de synthèse, les hydrocarbures halogénés, esters organiques, huiles silicones, ...) [7].

Le tableau I.3 présente par catégories les types de diélectriques les plus couramment utilisés ainsi que leurs caractéristiques propres.

**Tableau I.1 : Différents diélectriques liquides [26].**

Catégorie	Type	Caractéristiques Propres
Huiles minérales	Naphténique Paraffinique	Bas point d'écoulement stabilité à l'oxydation ; bon indice de viscosité
Hydrocarbures de synthèse	Polybutènes	Faibles pertes diélectriques viscosité ajustable, absorption gazeuse sous décharges partielles, bonne rigidité diélectrique au choc de foudre, biodégradabilité, absorption gazeuse sous décharges partielles.
	Alkylbenzènes	
	Hydrocarbures alcoylés à noyaux aromatiques condensés (DIPN)	
	Alkylbiphényles (MIPB)	
	Alkyldiarylalcane (BT, DBT)	
Hydrocarbures halogènes	Askarels (PCB, TCB)	Ininflammabilité
	Polychlorodiphénylméthane (TCBT + TCB)	Ininflammabilité et biodégradabilité
	Polychloroalcane	
Esters organiques	Huiles végétales	Faibles pertes diélectriques à $f > 1000$ Hz etc., $> 5 \text{ à } 20^\circ\text{C}$
	Esters simples (BNC, DOS, DOP)	
	Phtalates (DEHP)	Utilisés pour augmenter le point de feu des liquides
	Esters complexes, Esters du pentaérythrol	Point de feu supérieur à $300^\circ\text{C}$
Huiles silicones	Polydiméthylsiloxanes (PDMS)	Bon indice de viscosité ; point de feu $> 300^\circ\text{C}$
	Polydiméthylphénylsiloxanes	Absorption gazeuse sous décharges partielles
Liquides divers	Ethers - oxydes (alkyldiphényle - éther, ditoly-l'éther)	$\epsilon_r > 3$ à $20^\circ\text{C}$ adaptabilité
	mélanges de liquides	adaptabilité
	gaz liquéfiés (argon)	Réduction ou suppression de perte Joule

### I.4.1. Rigidité diélectrique des liquides

Les liquides utilisés dans l'industrie électrotechnique doivent répondre aux normes de rigidité diélectrique. En pratique, la rigidité diélectrique est définie par la tension efficace nécessaire pour provoquer, dans des conditions normalisées, le claquage d'un volume de liquide compris entre deux électrodes dont la forme et la géométrie sont spécifiées. On l'appelle alors tension de claquage [7].

### I.4.2. Phénomène de pré-claquage et claquage

Il a été montré que dans les liquides ; avant le claquage proprement dit (défini comme une apparition d'un arc électrique), il existe une phase de pré-claquage [7].

#### I.4.2.1. Phénomènes de génération et de propagation des streamers

A présent nous abordons l'un des aspects fondamentaux des diélectriques liquides. Il a été observé par l'ensemble des chercheurs travaillant dans le domaine des diélectriques liquides, l'existence d'un phénomène dit de claquage qui surviendrait à court ou long terme lorsqu'une ou plusieurs des conditions d'altération ci-dessus seraient présentes.

Le claquage est loin d'être instantané ! Il est précédé d'une phase de pré-claquage (ou pré-décharge) [27].

En phase de pré-claquage, dans un liquide, il apparaît un phénomène lumineux qui se propage sous forme d'arborescence plus ou moins ramifiée qui a reçu le nom de streamer. Il est considéré comme d'origine gazeuse, et il est connu qu'en vertu du théorème de Bernoulli ( $\delta p = 1/2 \cdot \rho v^2$ ), qu'il suffit pour un liquide diélectrique de masse volumique  $\rho$  qu'il soit localement animé d'une vitesse  $v$  de 10 à 20 m/s pour engendrer par cavitation une dépression  $\delta p$  voisine de 1 atmosphère et la pression devient alors inférieure à la pression de vapeur du liquide et l'apparition d'une cavité gazeuse est donc possible (cavitation) [7].

#### I.4.2.2. Processus de claquage dans les liquides [7]

Le processus de claquage des liquides comporte trois phases successives :

##### a. Une phase de génération

C'est la phase pendant laquelle se créent les conditions d'apparition de la phase suivante. Elle peut être très brève (<1ns) ou extrêmement longue (des années). Pendant cette phase, peuvent se manifester successivement ou simultanément des phénomènes de nature électrique (impulsion de courant), optique (émission lumineuse), hydrodynamique (mouvement de liquide, cavitation) et des arborescences (streamer).

##### b. Une phase de propagation

En jouant sur la différence entre l'indice de réfraction du streamer et celui du liquide isolant, le suivi de la progression du streamer est considéré comme la phase de propagation. Cette phase est très brève (1 ns à 0,1 ms).

##### c. Une phase d'arc

C'est la phase d'établissement d'arc électrique entre les électrodes qui a lieu quand le streamer aura parcouru la moitié de cet espace. C'est la phase la plus destructive ou l'intensité de courant peut atteindre les kA.

### I.4.3. Claquage dans les diélectriques liquides

Les phénomènes de décharges dans les diélectriques liquides restent jusqu'à ce jour moins connus par rapport aux gaz et solides malgré l'existence d'une importante quantité d'informations [28]. En ce qui concerne les théories relatives au claquage, on peut les diviser en trois groupes :

- La théorie basée sur un processus cumulatif de collisions et d'ionisations mettant en jeu les électrons et les molécules du liquide.
- La théorie des bulles qui décrit un phénomène de claquage initié dans une phase gazeuse ou de moindre densité se formant lors d'injection d'électron dans un isolant.
- La théorie pour laquelle le claquage est dû à l'établissement d'un chemin de particules entre les électrodes [10].

#### I.4.3.1. Théories électroniques [10]

Ces théories sont essentiellement une extension aux liquides du mécanisme des décharges électriques dans les gaz. Elles supposent qu'aux champs élevés des électrons sont accélérées, entrent en collision avec les molécules du liquide et les ionisent. Un libre parcours moyen dans le liquide est définie pour les électrons, il est lié à la section efficace.

Il faut tout d'abord considérer le mécanisme d'émission d'électrons à partir de la cathode.

La condition pour le déclenchement d'une avalanche dans le liquide peut être exprimée par la relation suivante entre les énergies :

$$qE\lambda \geq chv \dots\dots\dots(I.17)$$

Où :

$q$  : charge de l'électron ou de l'ion,

$E$  : champ électrique,

$\lambda$ : Libre parcours moyen

$C$  : constante

$hv$ : quantum d'énergie perdu par l'électron lors des collisions avec les molécules des liquides en mettant en jeu les processus de vibration des liaison carbone-hydrogène.

Cette relation a été proposée, pour la première fois, par Von Hippel [29] dans une théorie du claquage des cristaux ioniques. Le courant suit une loi semblable à celle établie par Townsend :

$$i = i_0 \exp(\alpha d) \dots\dots\dots(I.18)$$

Où :  $\alpha$  : coefficient d'ionisation dépendant du champ.

#### I.4.3.2. Théories des bulles

Dans les liquides ultra-purs et en géométrie pointe-plan sous tension continue, il a été observé qu'à partir d'un certain seuil de tension, des bulles gazeuses se forment au voisinage de la pointe puis sont violemment chassées vers le plan. Cette phase gazeuse résulterait soit de la vaporisation et de la nucléation de bulles, soit de la cavitation [30].

### I.4.3.3. Mécanisme thermique

Watson et Sharbaugh [31] considèrent qu'une bulle de vapeur est générée dans le liquide par une injection de courant, à partir d'aspérités sur la cathode. Le courant émanant d'une aspérité où le champ est renforcé, serait limité par charge d'espace et de la forme :

$$I = A.V^n \dots\dots\dots(I.19)$$

avec  $1,5 \leq n \leq 2$

Ainsi, pour une tension impulsionnelle  $V$ , de durée  $\tau$ , l'énergie locale nécessaire à l'ébullition locale serait :

$$H = A.E^n.\tau \dots\dots\dots(I.20)$$

$E$  étant supposé proportionnel à  $V$ .

Cette vaporisation du liquide pourrait être produite en quelques microsecondes. En identifiant cette énergie à l'énergie nécessaire à l'ébullition d'un volume de liquide donné :

$$H = Cp(Tb - Ta) + Lv \dots\dots\dots(I.21)$$

Avec :

$Cp$  : chaleur spécifique moyenne

$Tb$  : température d'ébullition

$Ta$  : température initiale

$Lv$  : chaleur latente de vaporisation

Kao [32] a proposé un modèle qu'il suppose que la vaporisation du liquide est produite par un courant filamentaire (limité par charge d'espace). Si la densité du courant est suffisante pour amener la température du liquide à son point d'ébullition, il y a claquage.

Dans le cas où le champ est assez élevé, il peut y avoir une dissociation renforcée par le champ, pouvant conduire à une vaporisation locale du liquide [33].

### I.4.3.4. Mécanisme de cavitation [30]

Si un liquide est chauffé à pression constante (ébullition) ou s'il est soumis à une dépression à température constante (cavitation), il apparaît des bulles ou cavités de vapeur ou de mélange de vapeur ou de mélange de vapeur et de gaz.

La cavitation désigne toute la séquence de formation, expansion et disparition de la cavité. Elle peut se produire dans le liquide ou sur les parois :

✚ D'après Krasucki [34], les bulles se forment en des points où on a un renforcement du champ électrique (particules solides de très faibles dimensions en suspension dans le liquide ou attachées aux électrodes), lequel donne naissance à une pression électromécanique ( $P_{em}$ ) qui tend à faire décoller le liquide de la surface de ces particules en s'opposant à la pression hydrostatique ( $P_h$ ) et aux pressions dues à la tension superficielle ( $P_s$ ).

Le critère de pression nulle pour qu'une cavité soit formée, serait :  $P_{em} = P_h + P_s$

Un critère analogue a été proposé par Thomas [35,36] en supposant que la pression d'électrostriction s'oppose au décollement du liquide. En partant de ces hypothèses, Krasucki et Thomas ont établi des critères de claquage qui prévoient l'influence de la pression, de la température et de la tension superficielle sur le champ disruptif ( $E_c$ ). Cependant, ces deux modèles n'apportent aucun élément décisif concernant les mécanismes de génération des bulles.

- ✚ L'apparition d'une phase gazeuse pourrait résulter d'une cavitation due à des écoulements électro-hydrodynamiques (EHD) induits par l'injection unipolaire de charges dans le liquide [37,33]. Dans ce cas, la variation de la pression serait, en vertu du théorème de Bernoulli, proportionnelle au carré de la vitesse EHD du liquide :

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho V_{EHD}^2 \dots\dots\dots (I.22)$$

$\rho$  : La masse volumique du liquide

#### I.4.3.5. Mécanisme de claquage par pont [38]

La présence de particules isolantes ou conductrices dans les liquides baisse leur rigidité diélectrique [10]. Si on considère des particules sphériques polarisées, de permittivité  $\epsilon_p$ , la force agissant sur une particule serait :

$$F = \frac{1}{2} \cdot r^3 \cdot \frac{\epsilon_p - \epsilon_L}{\epsilon_p + 2\epsilon_L} \cdot \Delta E^2 \approx \frac{1}{2} \cdot r^3 \cdot \Delta E^2 \dots\dots\dots (I.23)$$

$\epsilon_p$  : Permittivité de la particule

$\epsilon_L$  : Permittivité du liquide

E : Champ électrique

r : Rayon de la particule

Pour qu'un pont de particules se forme entre les électrodes, il faut que le temps d'application de la tension soit relativement long. Ce pont nécessite en effet une grande concentration d'impuretés au voisinage des électrodes. Quand ce pont relie les électrodes, il s'établit un fort courant circulant à travers ce pont, qui est plus conducteur que le liquide. On aura ainsi, un échauffement local important, pouvant engendrer le claquage. Le claquage peut aussi avoir lieu durant la formation du pont (champ élevé en tête de pont).

Parmi les théories de claquage par pont est celle de Kok. Le critère établi par Kok, définit une valeur moyenne du champ électrique, au-dessus de laquelle la vitesse des particules se dirigeant vers le domaine de champ maximum devient supérieure à celle des particules repoussées vers l'extérieur (ce qui augmente la concentration des particules). Cette valeur limite du champ définit selon Kok, la rigidité diélectrique du liquide pendant le claquage par pont :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{K \cdot T}{r^3}} \dots\dots\dots (I.24)$$

K : Constante de Boltzmann

T : Température du liquide

r : Rayon des particules impures

#### **I.4.4. Domaine d'application des diélectriques liquides**

- Transformateurs de distribution et de traction (huiles silicones, esters organiques, hydrocarbures halogènes, ...).
- Transformateurs de puissance (huiles minérales).
- Condensateurs (hydrocarbures de synthèse, argon, mélange liquide, ...).
- Câbles (hydrocarbures de synthèse (polybutènes), huiles minérales, ...).
- Condensateurs pour générateur de choc (huiles végétales).
- Disjoncteurs (huiles minérales).

#### **I.5. Diélectriques solides [39]**

Les isolants solides sont d'origines minérales, organiques et résineuses :

- Les isolants d'origine minérale sont des substances siliceuses et calcaire, solides à la température ordinaire, incombustibles et supportant des températures élevées, à l'exception des hydrocarbures (verre, produits céramiques, ...);
- Les isolants d'origine organique sont généralement des substances fibreuses à base de cellulose. Ces matériaux ont une bonne résistance mécanique, ils sont combustibles et ne supportent pas des températures supérieures à 100°C sans perdre leurs propriétés mécaniques et diélectriques (cellulose, silicone)
- Les isolants d'origine résineuse sont généralement des matières organiques naturelles ou synthétiques qui peuvent se présenter à l'état solide, thermoplastique ou plastique (caoutchouc, ...).

##### **I.5.1. Différentes structures d'un matériau solide**

L'arrangement des atomes dans les solides peut prendre un caractère ordonné ou désordonné et conduire à plusieurs types de structures :

###### **I.5.1.1. Structure cristalline**

La structure cristalline est caractérisée par une distribution périodique régulière de particules constituant le matériau (ordre à longue distance, réseau cristallin). L'ensemble des matériaux métalliques et un grand nombre de céramiques ont une structure cristalline [40,41].

###### **I.5.1.2. Structure amorphe**

La structure amorphe est une structure dense et peu ordonnée. Elle est de type pelote statique dans laquelle on ne distingue aucun ordre à grande échelle. Cette structure est rencontrée dans certaines céramiques ainsi que dans de nombreux polymères organiques tels que le polyméthyl méthacrylate (PMMA), le styrène acrylonitrile (SAN) et le polystyrène (PS).

### I.5.1.3. Structure semi- cristalline

Cette structure est une structure complexe caractérisée par la coexistence de phases amorphes et cristallines en proportion variable (présence de cristallinité). Cette structure est rencontrée dans de nombreux polymères organiques tels que le Polypropylène (PP) et le polyéthylène (PE) [42].

### I.5.2. Polarisation des diélectriques solides [9]

La propriété essentielle des matériaux diélectriques solides est de se polariser lorsqu'un champ électrique leur est appliqué. La polarisation  $\vec{P}$  est le moment dipolaire par unité de volume. Elle est reliée à la permittivité  $\epsilon$  du matériau et au champ électrique macroscopique  $E$  par la relation :

$$\vec{P} = (\epsilon - \epsilon_0)\vec{E} \dots\dots\dots (I.25)$$

Où  $\epsilon_0$  est la permittivité du vide et  $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$  avec  $\epsilon_r$  la permittivité relative du matériau.

Un matériau est dit polaire lorsque les molécules qui le constituent possèdent un moment dipolaire permanent. Ces moments s'orientent dans une direction privilégiée sous l'effet du champ électrique. Lorsqu'on applique un champ électrique, divers processus de polarisation peuvent apparaître.

### I.5.3. Différents types de polarisation

#### I.5.3.1. Polarisation électronique [43]

Le déplacement des électrons par rapport au noyau d'un atome fait apparaître une polarisation dont le temps d'établissement est très court ( $\approx 10^{-15}$  seconde) :

$$\vec{P}_e = N\alpha_e\vec{E}_l \dots\dots\dots (I.26)$$

$\alpha_e$ : Polarisabilité, constante dépendant du rayon  $r$  de l'atome

$E_l$ : Champ électrique local agissant sur une entité polarisable telle qu'une molécule ou un atome, il peut être considéré comme la somme de deux composantes :

- le champ électrique appliqué aux électrodes.
- la contribution au champ des dipôles entourant le point considéré du diélectrique.

$N$ : nombre de molécules par unité de volume.

La polarisation électronique est due à un déplacement relatif du noyau de l'atome par rapport à l'ensemble des électrons qui l'entourent, comme le montre la figure I.9.

#### I.5.3.2. Polarisation ionique (ou atomique) [44,45]

La polarisation ionique (ou atomique) résulte du déplacement des atomes liés par des liaisons ioniques. Lorsque différents atomes sont présents dans une molécule ne possédant pas de moment dipolaire permanent, les électrons participant aux liaisons de covalence se déplacent préférentiellement vers l'atome le plus électronégatif, créant ainsi, sans contrainte extérieure, un moment de liaison (moment dipolaire induit). Si l'on superpose un champ électrique, les atomes se déplacent les uns par rapport aux autres, donnant naissance à une polarisation ionique qui met en jeu le déplacement d'atomes au sein de la molécule.

On rencontre les liaisons ioniques dans la plupart des diélectriques solides non-organiques avec une structure cristalline. Ce type de polarisation s'établit aux environs de  $10^{-13}$  à  $10^{-12}$  secondes et est donnée par la formule suivante :

$$\vec{P}_i = N\alpha_i\vec{E}_i \dots\dots\dots(I.27)$$

La polarisation ionique, de même que la polarisation électronique, créent des dipôles induits, elle ne provoque pas de pertes d'énergie et disparaît avec la suppression du champ appliqué. C'est donc une polarisation élastique.

### I.5.3.3. Polarisation dipolaire ou d'orientation

La polarisation dipolaire ou d'orientation résulte d'une interaction moléculaire. Une molécule est constituée de plusieurs atomes qui combinent leurs couches de valence en se regroupant.

Une fois regroupés ces atomes forment naturellement un dipôle électrique qui aura tendance à s'orienter face à un champ électrique extérieur. En plus d'orienter la molécule, le champ électrique externe pourra déformer la molécule au point d'augmenter le moment dipolaire de celle-ci. La figure I.9 résume cette orientation moléculaire [43]. Quand un champ électrique constant est appliqué, la polarisation d'orientation n'atteint pas immédiatement sa valeur maximale et de même, à la coupure du champ, la polarisation décroît au bout d'un temps  $t$  déterminé. La polarisation s'exprime (en  $C/m^2$ ) généralement par une équation de la forme [46] :

$$P = P_0 \exp(-t/\tau) \dots\dots\dots(I.28)$$

Avec  $P_0$ : polarisation induite par le champ électrique.

$\tau$  : temps de relaxation.

### I.5.3.4. Polarisation interfaciale

Lorsqu'une non homogénéité existe dans le matériau, les surfaces de séparation entre deux phases 1 et 2 se chargent de façon opposée sous l'action du champ électrique. Les charges accumulées sur les surfaces de séparation induisent une polarisation supplémentaire appelée polarisation interfaciale [47].

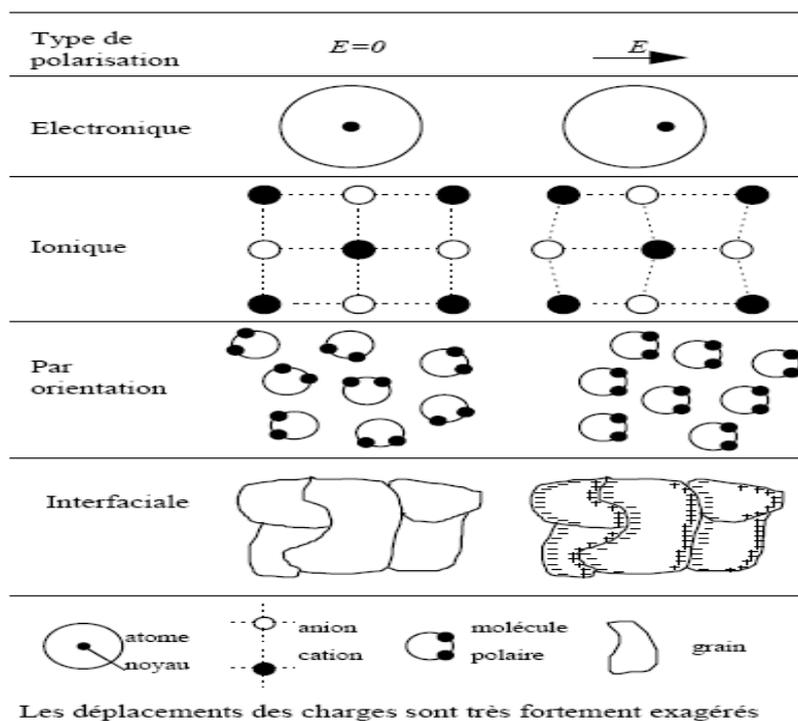


Figure I.9 : Illustration des différents types de polarisation [48].

### I.5.4. Claquage des diélectriques solides

On appelle claquage la perte subite par la propriété isolante d'un diélectrique soumis à un champ électrique intense [49]. Selon la norme CEI 60243-1 [50], la rigidité diélectrique d'un matériau se définit comme étant le quotient de la tension de claquage par la distance séparant les électrodes entre lesquelles est appliquée la tension dans les conditions d'essai prescrites. La figure I.10 illustre les types de claquage selon le temps d'application de la tension.

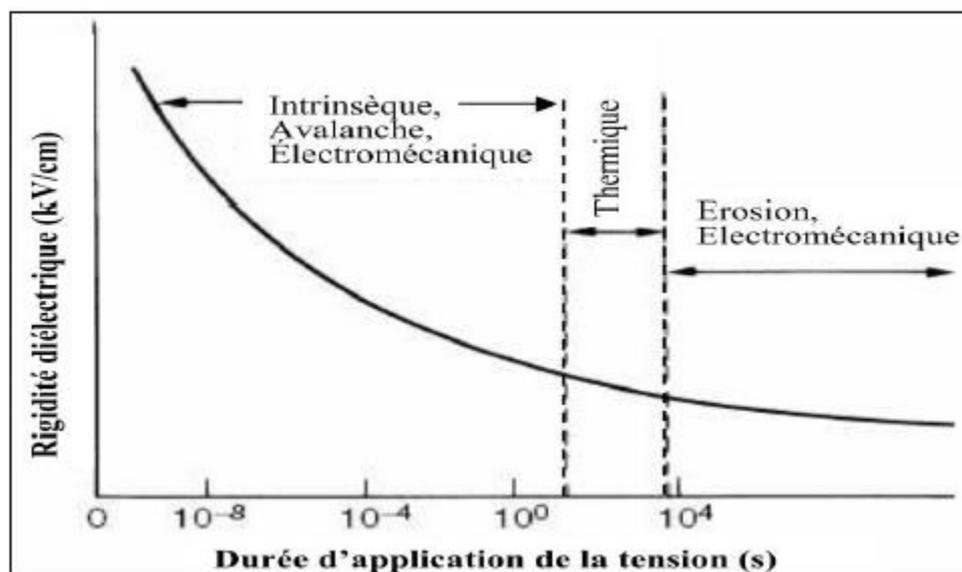


Figure I.10 : Différents types de claquage des isolants solides [51]

#### **I.5.4.1. Claquage thermique**

Une explication du phénomène de claquage thermique est donnée par Coelho et al. Lorsqu'un courant traverse un matériau isolant, la conductivité augmente avec la température. Par suite la température s'élève, le courant augmente à son tour et ainsi de suite. Si la chaleur accumulée ne s'évacue pas suffisamment vite, le processus peut conduire à un emballement thermique, c'est ce qu'on appelle le claquage thermique.

Ce type de claquage ne se produit jamais d'une manière homogène. En effet, la moindre augmentation locale de la température est auto-amplifiée par l'augmentation de la conductivité correspondante. Par la suite, une telle augmentation locale de la température inévitable en pratique provoque la création et la propagation d'un canal chaud conduisant à un claquage thermique ponctuel [44].

Bien que d'autres phénomènes puissent intervenir (ionisation par collision, injection d'électrons par la cathode, etc...), l'ionisation thermique reste la cause essentielle de la présence de charges libres [52]. L'existence d'un gradient de température et d'un champ électrique dans l'épaisseur d'un isolant provoque aussi une polarisation par charge d'espace [53,54].

#### **I.5.4.2. Claquage d'origine électronique**

On distingue le claquage intrinsèque, le claquage par avalanche et celui associé au volume libre.

#### **I.5.4.3. Claquage intrinsèque**

Lorsque le champ électrique est appliqué à un matériau de telle manière que sa température reste pratiquement inchangée en maintenant ce champ pendant une courte durée et en utilisant des électrodes permettant l'évacuation de la chaleur, on peut assister à un claquage brutal qui n'est pas précédé par une augmentation progressive de la température, c'est ce qu'on appelle le claquage intrinsèque [52]. La théorie la plus connue est celle de Fröhlich. La détermination de la tenue diélectrique selon cette théorie consiste à analyser le comportement d'électrons pris singulièrement dans un champ électrique intense. On admet que la densité d'électrons de conduction dans le diélectrique est si faible que leur mouvement est seulement imposé par le champ électrique extérieur et l'action du réseau cristallin du diélectrique [48].

#### **I.5.4.4. Claquage par avalanche**

Coelho et Aladenize donnent une explication du processus [55] : lors de la collision ionisante avec un atome du matériau, l'électron incident peut céder à l'atome assez d'énergie pour l'ioniser sans être piégé. L'atome se charge positivement en libérant un nouvel électron, de sorte qu'on a alors 2 électrons libres qui peuvent acquérir dans le champ assez d'énergie pour provoquer chacun une nouvelle collision ionisante donc 2 électrons et ainsi de suite. Pour produire une avalanche, il faut qu'un nombre suffisant d'électrons soit produit. Chaque ionisation produit 2 électrons, une avalanche de  $m$  générations donne  $2^m$  électrons. Fournié a montré [56] que la destruction du matériau par avalanche électronique nécessite 40 générations soit  $2^{40}$  électrons ( $\approx 10^{12}$ ).

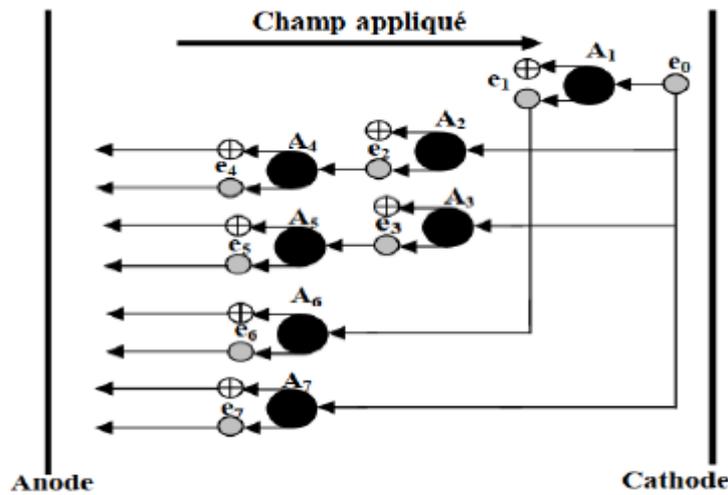


Figure I.11 : Schéma descriptif de l'avalanche [57].

#### I.5.4.5. Claquage associé au volume libre

Artbauer (1965) est le premier à utiliser la notion de volume libre dans le claquage et ceci en considérant que les électrons peuvent acquérir suffisamment d'énergie avec le champ électrique en traversant le volume libre pour causer la rupture diélectrique [58]. Dans son modèle, Artbauer considère des cavités sphériques de diamètre de quelques Angström et une possibilité qu'à certains endroits où il y a accumulation de ces cavités que des électrons accélérés par le champ peuvent parcourir le plus de distance sans perte. La théorie s'applique aux polymères purement amorphes et permet de calculer la plus grande distance parcourue par les électrons qui ont provoqué le claquage.

#### I.5.4.6. Claquage électromécanique [59,60]

Il dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques de l'échantillon. En effet, quand un matériau est soumis à un champ électrique, la pression électrostatique due aux attractions coulombiennes mutuelles des électrodes, peuvent réduire son épaisseur par déformation mécanique. Si cette pression est suffisante pour causer une déformation considérable, le champ se trouve renforcé et provoque, le claquage du matériau et par conséquent, la réduction de sa rigidité diélectrique.

L'application d'une tension à un échantillon provoque l'apparition de forces de compression sur le matériau dues à l'attraction mutuelle des deux électrodes. Cette contrainte mécanique provoque une diminution de l'épaisseur de l'échantillon. A l'équilibre, la compression d'origine électrique est compensée par la force plastique. Le claquage se produit dans la zone plastique.

La pression exercée sur l'échantillon dans ces conditions est :

$$P = \frac{1}{2} \epsilon \left( \frac{V}{d_0} \right)^2 \dots\dots\dots(I.29)$$

V étant la tension appliquée et \$d\_0\$ l'épaisseur initiale de l'échantillon.

A l'équilibre cette pression est égalisée par la réaction élastique du matériau et on a :

$$\frac{1}{2} \varepsilon \left( \frac{V}{d_0} \right)^2 = Y \ln \left( \frac{d_0}{d} \right) \dots\dots\dots (I.30)$$

$$\text{D'où } V = d \left( \frac{2}{\varepsilon} Y \ln \left( \frac{d_0}{d} \right) \right)^{1/2} \dots\dots\dots (I.31)$$

Y est le module d'YOUNG (ou d'élasticité) du matériau, et d son épaisseur après compression. Cette relation admet un maximum pour  $\frac{d_0}{d} = \exp \left( -\frac{1}{2} \right) \approx 0,6$ . Au-dessous de cette valeur aucun état stable ne peut exister, et toute augmentation de V conduit directement à une instabilité mécanique qui entraîne la rupture de l'échantillon. Dans ces conditions, le champ critique  $E_c$  et la rigidité apparente seront respectivement :

$$E_c = \frac{V_c}{d} = \left( \frac{Y}{\varepsilon} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (I.32)$$

$$E_a = \frac{V_c}{d_0} = \frac{d}{d_0} E_c = 0,6 \left( \frac{Y}{\varepsilon} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (I.33)$$

### I.5.5. Domaine d'application des diélectriques solides

- Lignes de transport d'énergie (polymères).
- Câbles de télécommunication (papier et cartons).
- Transformateurs (papier et cartons).
- Moteurs électriques.
- Condensateurs haute tension (polypropylène).
- Alternateurs.
- Lignes aériennes et d'antennes (céramique).

## I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les mécanismes de la rupture diélectrique des différents types d'isolants électriques dont la principale contrainte provoquant le claquage. Il ressort de cette analyse bibliographique, que les mécanismes de la décharge électrique sont dépendant de plusieurs paramètres : la géométrie des électrodes (intervalle inter électrodes et le rayon de courbure), la tension appliquée (forme, polarité, amplitude), la pression et la température. À ces paramètres, il faut ajouter les paramètres extérieurs comme l'humidité et la présence d'impuretés.

Dans ce chapitre nous avons exposé les différents phénomènes de polarisation intervenant dans les isolants solides. Cette polarisation induit des pertes d'énergie caractérisées par le facteur de pertes diélectriques.

On a vu que le claquage est un phénomène qui résulte non seulement d'un effort direct du champ électrique sur le matériau, mais de la combinaison des effets d'origine thermique, mécanique, chimique, ...qui entre en jeu dans la dégradation des matériaux.

Le chapitre suivant décrira les moyens mis en œuvre dans notre partie expérimentale.

# **Chapitre II : Description du dispositif expérimental**

## II.1. Introduction

Ce chapitre sera consacré à l'exposé du protocole expérimental suivi lors des essais effectués au laboratoire de haute tension de l'université de Bejaïa.

La rigidité diélectrique d'un matériau est considérablement liée aux conditions expérimentales d'essai. Lorsqu'un champ électrique intense est appliqué à un isolant, il se produit le phénomène du claquage diélectrique. Ce phénomène est aléatoire.

Dans ce chapitre, nous présentons les dispositifs expérimentaux utilisés dans notre étude pour la mesure de la tenue diélectrique des différents types des isolants, et on a choisi l'air, huile borak 22 et le papier plastique en polyéthylène. Le dispositif expérimental utilisé contient la source de tension, la cellule d'essai et le système de mesure.

Les essais ont été réalisés dans le but d'étudier expérimentalement les paramètres influençant la tension de claquage des diélectriques utilisés sous tension alternative sinusoïdale 50Hz. Plusieurs paramètres seront traités à savoir ; la montée en tension, la géométrie des électrodes et la distance inter-électrode.

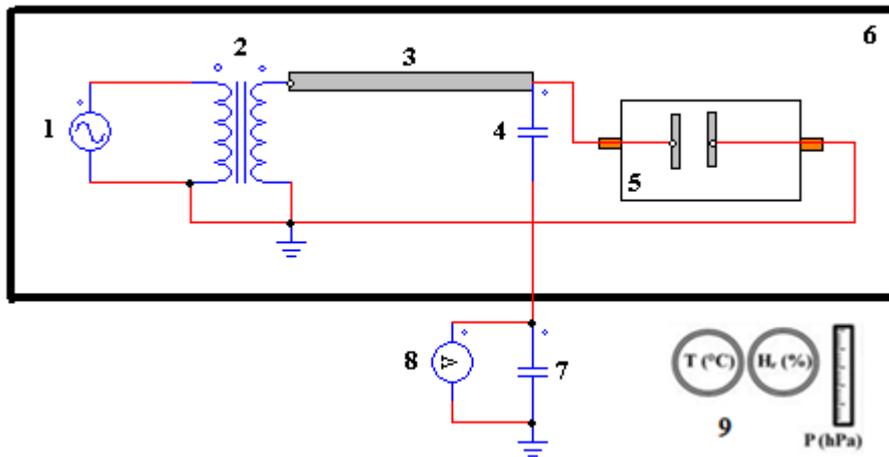
## II.2. Dispositif expérimental

Notre étude expérimentale consiste à appliquer une haute tension alternative à l'électrode haute tension de différentes géométries (plan, sphère, pointe) et relever cette dernière lors du claquage sachant que la deuxième électrode est reliée directement à la terre. Le dispositif expérimental utilisé est schématisé sur la figure II.1. Il est constitué d'une source d'alimentation, d'une cellule de décharge et des appareils de mesure.

Le système et les éléments mis sous haute tension sont séparés du manipulateur et des autres appareils de mesure basse tension par une grille de protection.

L'enroulement primaire du transformateur haute tension T100 (2) est alimenté par la tension alternative variable délivrée par la source basse tension SG1 (1). La variation de la basse tension SG1 peut s'effectuer en mode manuel ou bien en mode automatique par un moteur avec une rampe qu'on fixe sur l'appareil de commande (Figure II.2).

La connexion métallique (3) est utilisée pour relier le condensateur haute tension (4) au transformateur T100. Ce condensateur est branché en série avec le condensateur basse tension (7). La deuxième borne de ce dernier est reliée directement à la terre. La mise en série des deux condensateurs constitue un diviseur capacitif permettant de déduire la valeur de la tension du côté HT à partir d'une mesure basse tension.



- |                               |  |  |
|-------------------------------|--|--|
| 1. Source basse tension (SG1) | 2. Transformateur haute tension (T100) | 3. Connexion métallique                              |
| 4. Condensateur haute tension | 5. Récipient porteur d'électrodes      | 6. Grille de protection                              |
| 7. Condensateur basse tension | 8. Voltmètre de crête MU11             | 9. Appareils de mesure des conditions atmosphériques |

Figure II.1 : Schéma du dispositif expérimental utilisé.

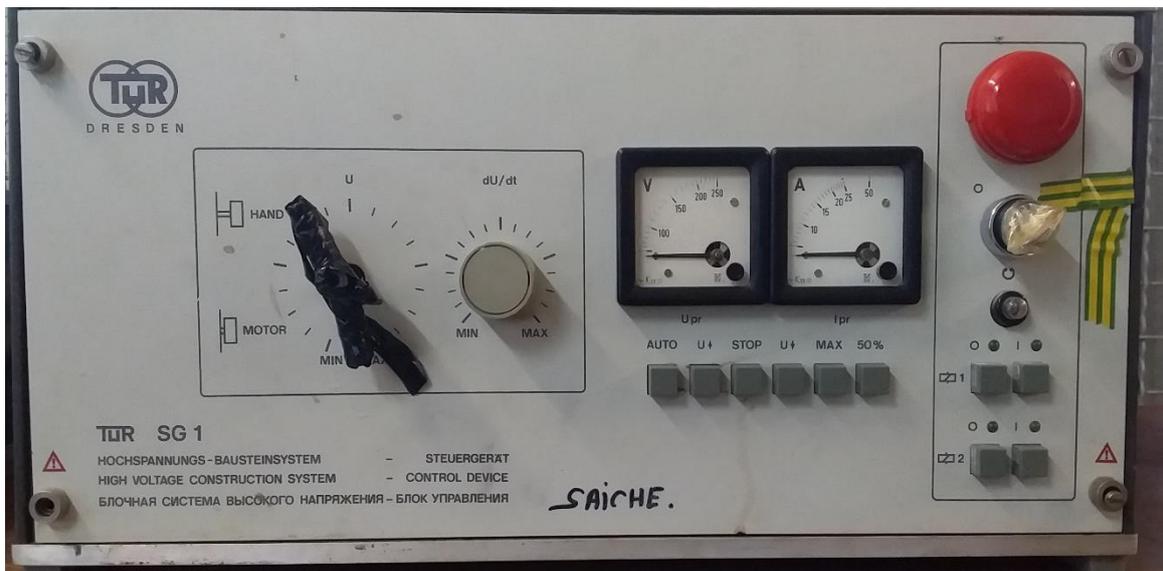
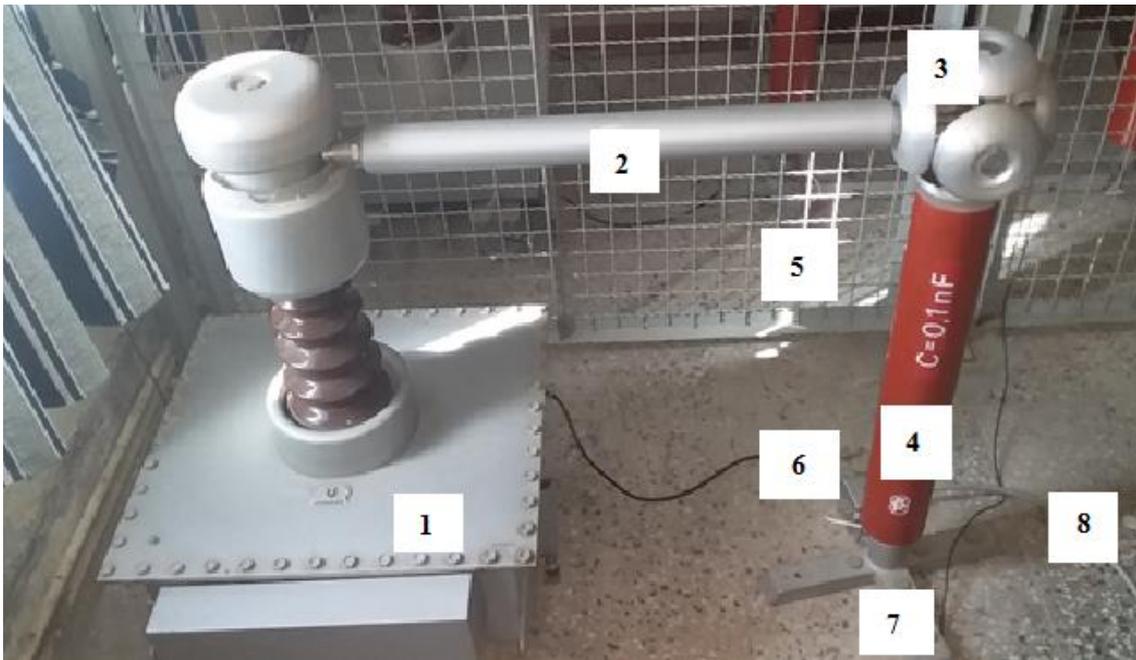


Figure II.2 : Photo de la source basse tension SG1.

### II.2.1. Source d'alimentation

La figure II.3 représente une photo de la source haute tension alternative utilisée. Cette source est capable de délivrer une tension alternative comprise entre 0 et 140 kV avec un courant maximal de 80 mA.



- |  |                         |                       |
|--|-------------------------|-----------------------|
| 1. Transformateur haute tension (T100) | 2. Connexion métallique | 3. Nœud de liaison    |
| 4. Condensateur haute tension          | 5. Grille de protection | 6. Boîte de connexion |
| 7. Support d'éléments                  | 8. Câble coaxial        |                       |

**Figure II.3 :** Photo de la source haute tension.

### II.2.2. Cellule d'essai

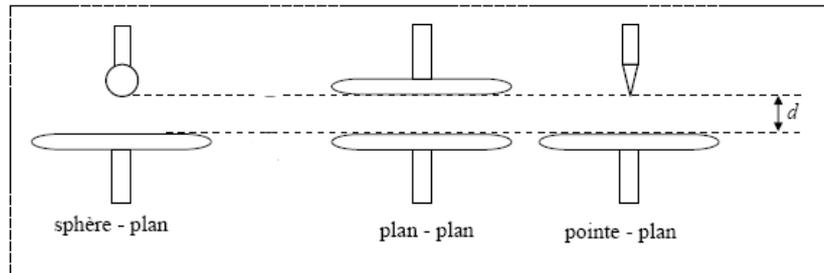
La cellule des essais est un récipient en plexiglas de 500 ml de volume contenant deux électrodes. L'électrode terre est de géométrie fixe, il s'agit d'un plan circulaire de quelques millimètre d'épaisseur. Par contre, l'électrode est de géométrie variable. Elle est soit d'une forme d'un plan circulaire ou bien une sphère ou encore une pointe. Cette offre la possibilité d'ajuster la distance inter-électrodes.

La figure II.4 illustre la cellule d'essai avec une géométrie d'électrodes plan-plan.



**Figure II.4 :** Cellule d'essais avec des électrodes planes.

La figure II.5 montre les différentes configurations d'électrodes utilisées lors des essais expérimentaux au laboratoire.



**Figure II.5 :** Configurations d'électrodes utilisées.

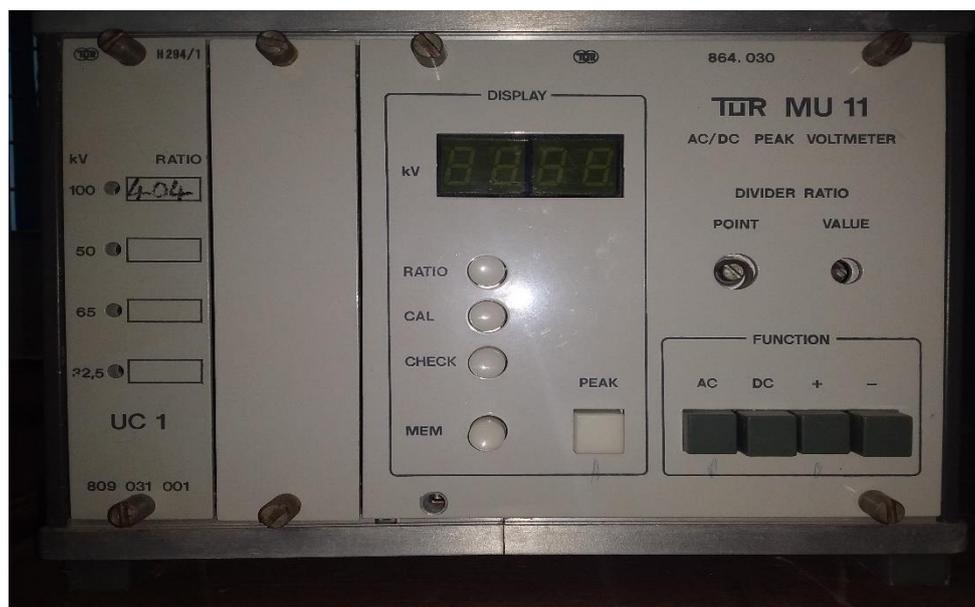
### II.2.3. Appareils de mesure

#### a. Mesure de la tension appliquée

La mesure de la tension alternative à la sortie de la source HT est effectuée à l'aide d'un voltmètre de crête (MU11) et d'un diviseur capacitif. Le voltmètre de crête MU11 (Figure II.6) mesure la tension  $u$  aux bornes de la capacité basse tension et affiche numériquement la valeur de la tension appliquée  $V = k.u$ ,  $k$  est le rapport du diviseur.

Ce rapport varie avec le vieillissement des éléments du diviseur. Cependant, l'étalonnage de la source a été effectué par le voltmètre électrostatique (0-30 kV) disponible au laboratoire haute tension (Figure II.7) en comparant la tension affichée sur le voltmètre de crête et celle donnée par le voltmètre électrostatique. La technique d'étalonnage est simple, il suffit d'ajuster la valeur du rapport du diviseur jusqu'à ce qu'on aura une égalité entre les deux tensions, puis on enregistre la valeur du rapport  $k$ .

La figure II.6 représente le voltmètre de crête.



**Figure II.6 :** Photo du voltmètre de crête.

La figure II.7 représente le Voltmètre électrostatique du laboratoire haut tension.

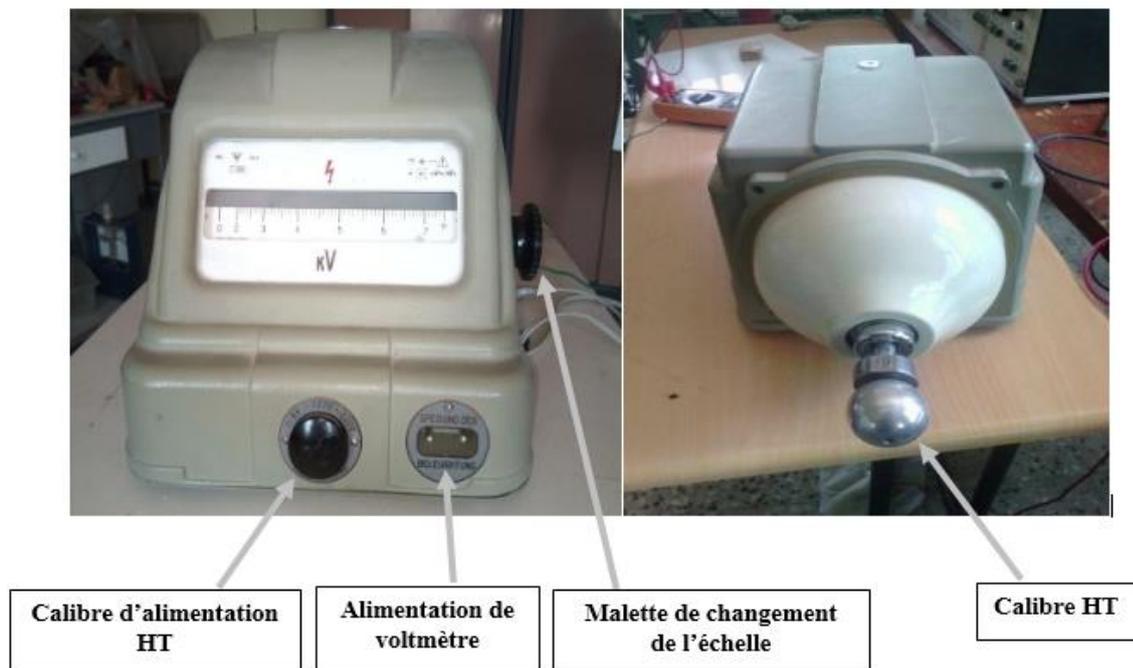


Figure II.7 : Photo du voltmètre électrostatique du laboratoire haut tension.

### b. Mesure des paramètres physiques de l'air

Les paramètres physiques de l'air influencent considérablement la décharge couronne, il est alors nécessaire de relever systématiquement ces paramètres avant chaque essai. Nous avons utilisé un baromètre à mercure pour la pression, un thermomètre à mercure pour la température, et un hygromètre à cheveux pour l'humidité (Figure II.1).

## II.3. Matériaux utilisés

### II.3.1. Diélectriques gazeux : l'air

L'air, un gaz isolant, est formé d'un mélange d'environ un volume d'oxygène, quatre volumes d'azote plus quelques gaz rares (argon, néon, krypton, hélium, xénon). Il contient aussi du gaz carbonique  $\text{CO}_2$  et de la vapeur d'eau. Après claquage l'air reprend rapidement son pouvoir isolant initial. Il est auto-régénérateur. L'air est l'élément isolant naturel utilisé dans la plupart des installations, appareils et machines électriques dont il assume également le refroidissement par circulation naturel ou forcé. Il est aussi utilisé pour l'isolation des câbles coaxiaux à haute fréquence en télécommunication.

### II.3.2. Diélectriques liquide : l'huile borak 22

L'huile borak 22 est une huile minérale naphénique, commercialisé par NAFTAL sur ce nom, elle est utilisée dans la plupart des transformateurs de puissance du territoire national, notamment dans les centrales de SONALGAZ. Elle est considérée comme l'un des excellents isolants liquides.

Cette huile est un liquide isolant apolaire le plus communément employé dans les transformateurs de puissance d'une part pour ces propriétés physico-chimique et d'autre part pour son faible cout et sa disponibilité. La particularité de cette huile fait que la majorité des transformateurs de puissance à travers le monde sont équipés avec ce type de liquide isolant, Cette huile permet d'assurer aussi bien l'isolation électrique que le transfert de chaleur.

### II.3.3. Diélectriques solide : polyéthylène

L'isolant solide utilisé dans nos essais est un film plastique en polyéthylène. C'est un isolant disponible au laboratoire haut tension. Ces films sont découpés sous forme rectangulaire d'épaisseur de 1 mm, de longueur de 125 mm, et de largeur de 75 mm. La figure ci-dessous montre une de cet isolant.



Figure II.8 : Echantillon du film en polyéthylène.

## II.4. Protocole expérimental

Après avoir relevé et vérifié les conditions atmosphériques dans le laboratoire à savoir la température (T), l'humidité (H) et la pression (P) qui sont prise en considération avant chaque test et de procéder au contrôle d'éventuels résidus de la décharge des claquages lors des essais en utilisant une perche, et notons que chaque valeur de la tension de claquage est la moyenne d'une série de 6 mesures.

### II.4.1. Essais dans l'air

Durant toute les étapes des tests, on a procédé à la régulation de la vitesse de montée en tension pour trois configurations d'électrodes différentes (plan-plan, sphère-plan, pointe-plan) avec plusieurs distances inter électrode qui sont prise en considération lors des essais de claquage dans l'air atmosphérique pour éclaircir l'influence de la vitesse sur la tension de claquage.

Avec l'accroissement de la tension de claquage nous observons au départ des décharges superficielles qui éclairent le milieu, puis des crépitements et enfin des bruits sourd qui caractérise le claquage de l'air, la valeur de la tension de claquage est directement affichée sur le voltmètre de crête MU11.

Nous tenons à signaler que les essais se déroulent à l'air libre et sous les conditions atmosphériques du laboratoire, cependant nous essayons d'étudier l'influence de chaque paramètre sous mêmes conditions atmosphériques à savoir la température, l'humidité et la pression.

#### II.4.2. Essais sur l'huile borak 22

Après avoir remplis le récipient de l'huile jusqu'à l'émergence total des électrodes, et avec des distances inter-électrodes différentes, on augmente progressivement la tension appliquée à l'électrode HT avec une vitesse de rampe en tension bien définie et on relève la valeur de la tension après chaque claquage. Avant d'entamer un essai de claquage on agite l'huile avec un isolant pour faire disparaître les bulles d'airs résiduels et les déchets carboniques résultants des claquages précédents. Nous tenons à préciser qu'on change l'huile quand sa couleur est noircie.

#### II.4.3. Essais sur diélectrique « air-film en polyéthylène-air »

Dans ces tests, Le film est introduit entre l'électrode HT et l'électrode terre. Sur chaque film, on réalise deux essais avec des positions verticales différentes.

L'influence de la distance inter-électrodes et la position du film par rapport à l'électrode HT (Figure II.9) sur la tension de claquage est étudiée expérimentalement.



**Figure II.9 :** Influence de la position de la barrière isolante sur les tensions de claquage de l'air.

### II.5. Correction des résultats suivant les conditions atmosphériques

La tension de claquage est liée aux conditions atmosphériques nominales, de température ambiante, de pression et l'humidité de l'air environnant. Afin de permettre la comparaison de nos travaux à ces d'autres chercheurs, les valeurs moyennes de la tension de claquage obtenues dans des conductions quelconques doivent être, dans le cadre de notre étude ramenées aux conditions normales de température  $\theta_0$ , de pression  $P_0$  et d'humidité  $H_0$  comme suit :

$$U = \frac{K_h}{K_d} U_m \dots\dots\dots (II.1)$$

Avec :

$U_m$  : Tension de claquage mesurée à la température  $\theta$ , à la pression P et à l'humidité H.

U : Tension de claquage ramenée aux conditions normales de température  $\theta_0$ , de pression  $P_0$  et d'humidité  $H_0$ .

$K_d$  : Facteur de correction relatif à la température  $\theta$  et à la pression P ;

$$K_d = \frac{P}{100} \frac{(273+20)}{(273+\theta)} = \frac{2,93P}{(273+\theta)} \dots\dots\dots (II.2)$$

Avec : P en kPa, et  $\theta$  en °C.

$K_h$  : Facteur de correction relatif à l'humidité ;

Pour déterminer le facteur de correction  $K_h$ , relatif à l'humidité, une transformation de l'humidité relative  $H_r$  (%) vers l'humidité absolue H ( $g/m^3$ ), est nécessaire, car  $K_h$  est donné en fonction de cette dernière. L'abaque de la figure II.10, donne la transformation de l'humidité relative en humidité absolue, en fonction de la température. Pour déduire  $K_h$ , la valeur de l'humidité absolue (Figure II.10) est reportée sur l'abaque de la figure II.11.

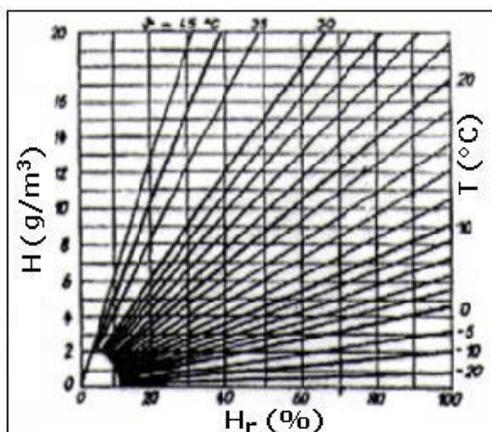


Figure II.10 :  $H = f(H_r, T)$

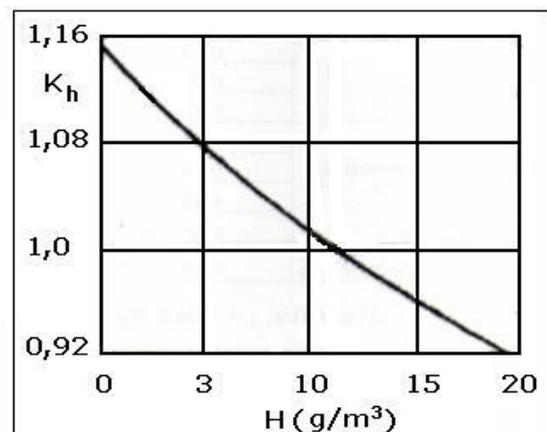


Figure II.11 :  $K_h = f(H)$

## II.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description du dispositif expérimental que nous avons utilisé pour effectuer les essais de claquage.

L'étude expérimental, qui fera l'objet de ce chapitre, portera sur la mesure de la tension de claquage, en fonction de la nature du diélectrique, de la géométrie des électrodes, et de la vitesse de la rampe de tension, ainsi que l'influence de différents paramètres sur la tension de décharge, Nous citons : la nature de la tension appliquée, la géométrie d'électrode, la vitesse de la rampe de tension et la distance inter-électrode.

Le chapitre suivant présentera les résultats obtenus dans notre étude et leurs traitements.

# **Chapitre III : Résultats et discussions**

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons et discutons les résultats expérimentaux de mesure de la tenue diélectrique des différents matériaux « gaz : air, liquide : huile borak 22, gaz avec barrière isolante : air-barrière en polyéthylène-air » pour différentes configurations d'électrodes (plan-plan, sphère-plan, pointe-plan).

Lors des essais expérimentaux, nous avons étudié l'influence des paramètres : la distance inter-électrode, la configuration d'électrode et de la vitesse de montée en tension sur la tension de claquage des trois isolations décrites précédemment.

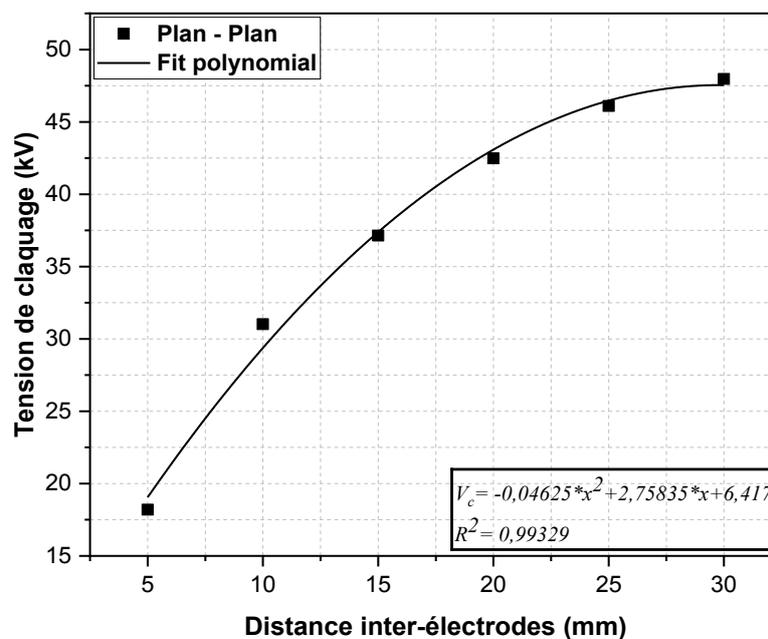
### III.2. Résultats expérimentaux et discussions

#### III.2.1. Influence de la distance inter-électrode sur la tension de claquage

##### a. Isolation gazeuse

Durant des essais de claquage dans l'air ; on a pu effectuer nos expérimentations sur les trois configurations d'électrodes à savoir plan-plan, sphère-plan et pointe-plan. Les résultats sont reproductibles et les résultats des six mesures réalisées dans chaque essai sont très proches. Dans notre cas on prend la moyenne des six mesures. Dans l'étude de l'influence de la distance inter-électrodes sur la tension de claquage, nous avons effectué nos essais avec la vitesse maximale de la montée en tension à savoir 5,48 kV/s.

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures III.1, III.2 et III.3 pour les trois configurations d'électrodes.



**Figure III.1 :** Influence de la distance inter-électrode sur la tension de claquage de l'air en géométrie plan-plan.

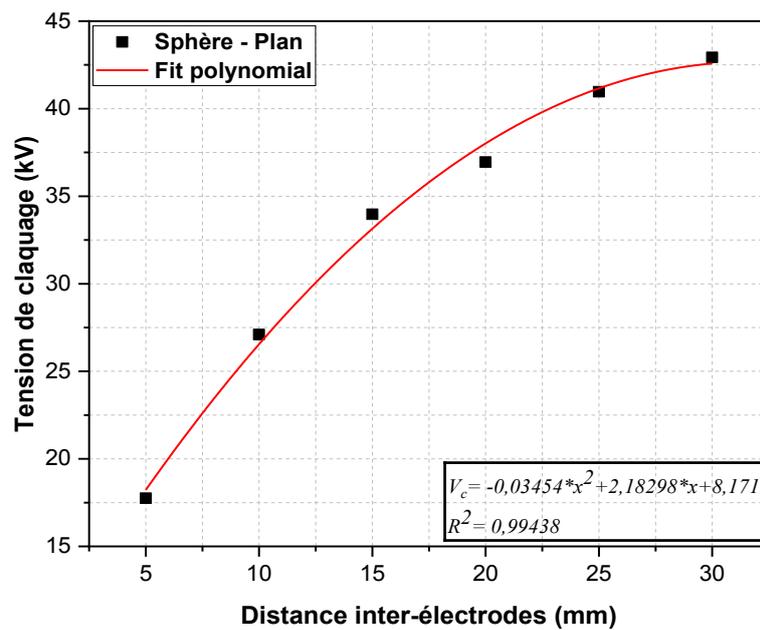


Figure III.2 : Influence de la distance inter-électrode sur la tension de claquage de l'air en géométrie sphère-plan.

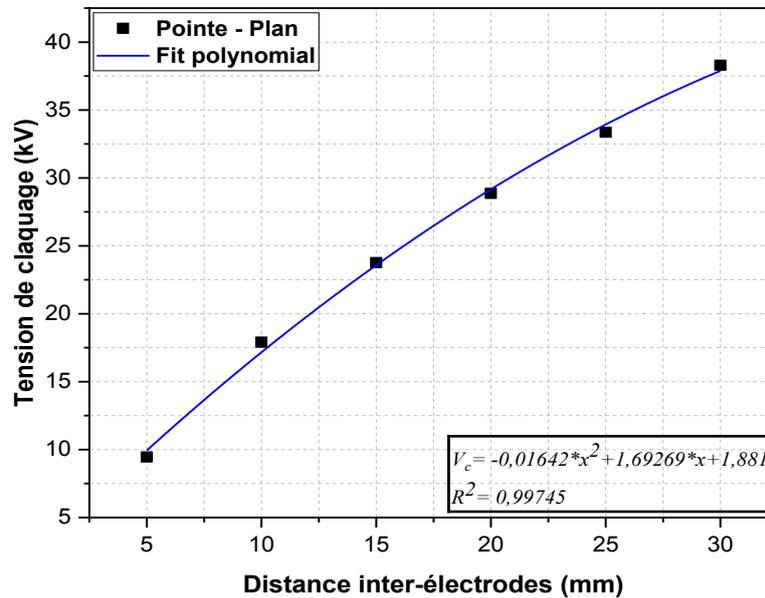


Figure III.3: Influence de la distance inter-électrode sur la tension de claquage de l'air en géométrie pointe-plan.

D'une manière générale, les phénomènes conduisant au claquage dans le cas d'une tension alternative sont très complexes. Cette complexité est due à l'influence, pendant chaque alternance, des charges d'espace créées durant l'alternance précédente. La tension disruptive dans ce cas sera relativement assez faible. En général, aux pressions intermédiaires, la décharge correspondant à la tension disruptive la plus basse est celle mesurée en polarité positive ; dans ce cas, le claquage sous tension alternative apparaît donc principalement pendant l'alternance positive. La fréquence de répétition des couronnes est du domaine de l'audible. C'est précisément les bourdonnements que l'on entend sous les lignes HT. Dans ce cas, les streamers se développent tout autour du câble HT et on parle de "décharge couronne".

Une tension minimale d'apparition du 1<sup>er</sup> streamer est définie, lorsque cette tension est appliquée à l'électrode active ou dépassée, un streamer se développe. Si ce dernier atteint l'électrode terre, un court-circuit limité par le circuit extérieur prend place. Des travaux expérimentaux antérieurs ont montré que la tension de claquage de l'air en tension alternative sinusoïdale est moins importante qu'en tension continue [61].

D'après les figures III.1, III.2 et III.3, on remarque bien que la tension de claquage augmente d'une manière non-linéaire avec la distance inter-électrodes. L'accroissement de cette dernière provoque la diminution du champ électrique entre les électrodes. Pour l'air sec, la valeur du champ disruptif de l'air communément admise est de 3kV/mm, alors dès que champ moyen entre les électrodes est supérieur à cette valeur il y aura un passage d'un courant électrique entre les électrodes. Ainsi, quand la distance inter-électrodes augmente le champ moyen entre les électrodes diminue et pour atteindre le champ disruptif il faut augmenter la tension appliquée à l'électrode HT.

A partir des trois figures précédentes, on peut déterminer les trois formules définissant les tensions de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour les diverses configurations d'électrodes en faisant un fit polynomial (le plus adéquat) des trois courbes précédentes. L'équation III.1 donne la variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrode (en mm) en géométrie plan-plan, l'équation III.2 est celle de la géométrie sphère-plan et enfin l'équation III.3 est celle de la géométrie pointe-plan.

$$V_c(kV) = -0,04625.d^2 + 2,75835.d + 6,417 \dots \dots \dots (III.1)$$

$$V_c(kV) = -0,03454.d^2 + 2,18298.d + 8,171 \dots \dots \dots (III.2)$$

$$V_c(kV) = -0,01642.d^2 + 1,69269.d + 1,881 \dots \dots \dots (III.3)$$

Le fit par la méthode des moindres carrés des trois courbes a donné des polynômes d'ordre 2 pour les trois configurations d'électrodes avec une bonne précision ( $R^2 \geq 0,99$ ). Plusieurs formules existent dans la littérature, on peut citer par exemple la formule empirique de Stephenson en 1933 [62] ou la tension de claquage de l'air dans l'espace (en cm) entre deux électrodes planes (qui sont deux disques circulaires) est donnée par la formule III.4. On peut citer aussi la formule empirique proposée par Meek et Graggs en 1978 [63] donnée par l'équation III.5 ( $d$  en mm).

$$V_c(kV) = 24,22.d + 6,08.\sqrt{d} \dots \dots \dots (III.4)$$

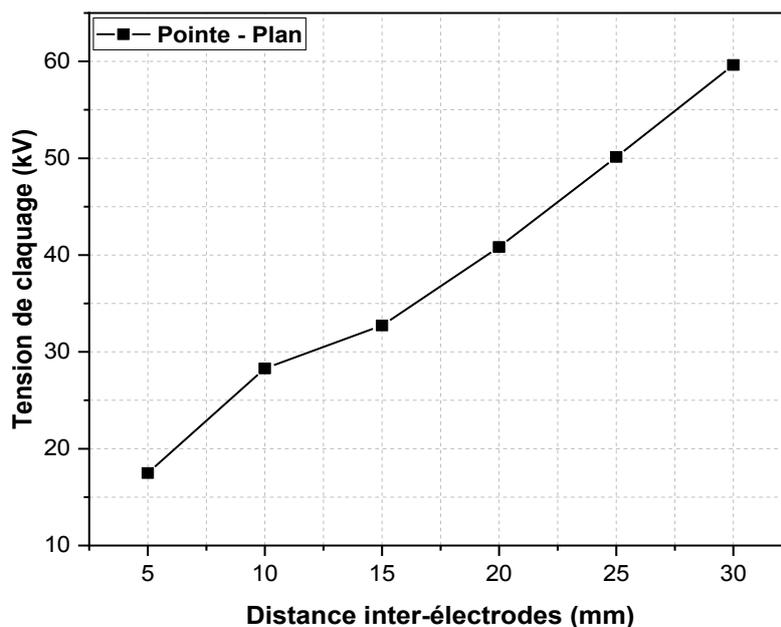
$$V_c(kV) = 2,44.d + 2,065.\sqrt{d} \dots \dots \dots (III.5)$$

Ces deux formules sont valables pour des champs électriques uniformes. Dans notre cas le champ électrique n'est pas uniforme même pour la géométrie plan-plan, c'est pour cette raison que nos formules diffèrent de celles de Stephenson et Meek et Graggs.

### b. Isolation liquide

Lors de nos essais de claquage dans l'huile, on a effectué nos expérimentations sur la configuration pointe-plan seulement car pour les deux autres géométries il est très difficile d'avoir des claquages dans l'huile. Généralement, l'arc électrique trouve des lignes de contournement et même les valeurs de tension de claquage ne sont pas reproductibles (pour un même essai de claquage, on trouve des valeurs de tension de claquage différentes).

La figure III.4 illustre la variation de la tension de claquage de l'huile en fonction de la distance inter-électrodes. La vitesse de montée en tension est de 5,48 kV/s.



**Figure III.4 :** Influence de la distance inter-électrode sur la tension de claquage de l'huile en géométrie pointe-plan.

Dans les liquides, la rupture diélectrique n'est pas instantanée, elle est précédée de pré-décharge dont il apparaît un phénomène lumineux qui se propage sous forme d'arborescence plus ou moins ramifiée formant un streamer. C'est ce qu'on a remarqué lors de tous nos essais sur l'huile borak 22.

Deux sur les trois phases de claquage des liquides ont clairement observés Pendant nos essais expérimentaux, à savoir :

1. 1<sup>ère</sup> phase «phase de génération»: pendant cette phase plusieurs phénomènes se manifestent, phénomènes électriques (impulsion de courant), optique (émission lumineuse), hydrodynamique (mouvement de liquide, cavitation) et des arborescences (streamer).
2. 3<sup>ème</sup> phase «phase d'arc»: c'est la phase de rupture de l'isolation, un arc électrique s'établi entre les électrodes et un courant électrique traverse l'espace inter-électrodes ; son intensité de courant peut atteindre les kA.

L'effet de la distance inter-électrodes sur la tension de claquage est similaire à celui de l'isolation gazeuse. L'augmentation de la distance inter-électrodes nécessite une augmentation de la tension appliquée à l'électrode HT pour atteindre le champ disruptif du diélectrique.

Contrairement à l'air qui est auto-régénérateur, l'huile perd une partie de ses caractéristiques diélectriques et change de couleur après un certain nombre d'essais. C'est pour cette raison qu'on ne peut pas parler de l'équation empirique donnant la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes.

Les photos ci-dessous montrent les arcs électriques obtenus sur l'huile borak 22.





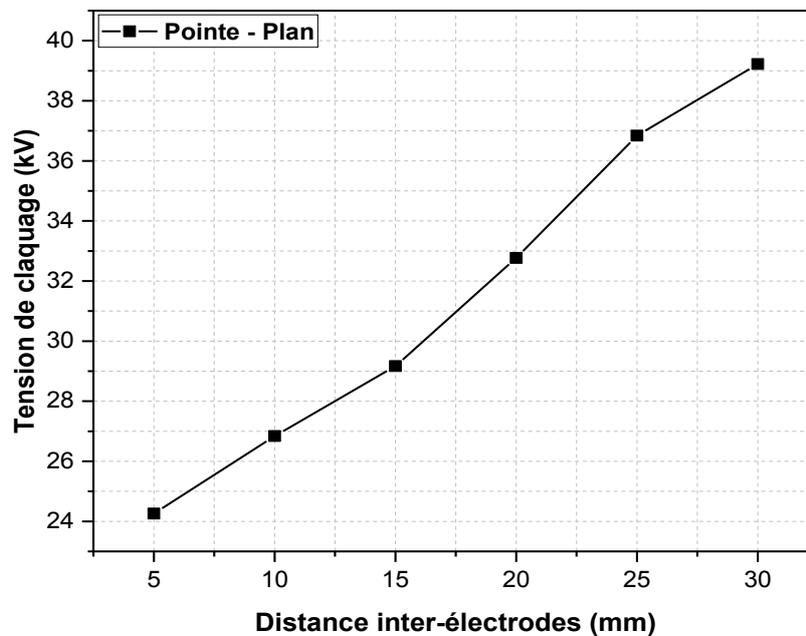
**Figure III.5 :** Photos des arcs électriques dans l'huile borak 22.

D'après les photos de la figure précédente, on remarque que la décharge est volumineuse et l'huile change de couleur (noircit) au fur à mesure qu'on effectue des claquages sur cette dernière.

### c. Isolation gazeuse avec barrière diélectrique

Dans cette partie de nos travaux expérimentaux, nous avons intercalé une barrière diélectrique solide en polyéthylène dans l'espace d'air entre l'électrode HT (pointe) et l'électrode terre (plan). La barrière est placée du côté de l'électrode terre.

La courbe donnant la variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes est représentée sur la figure III.6.

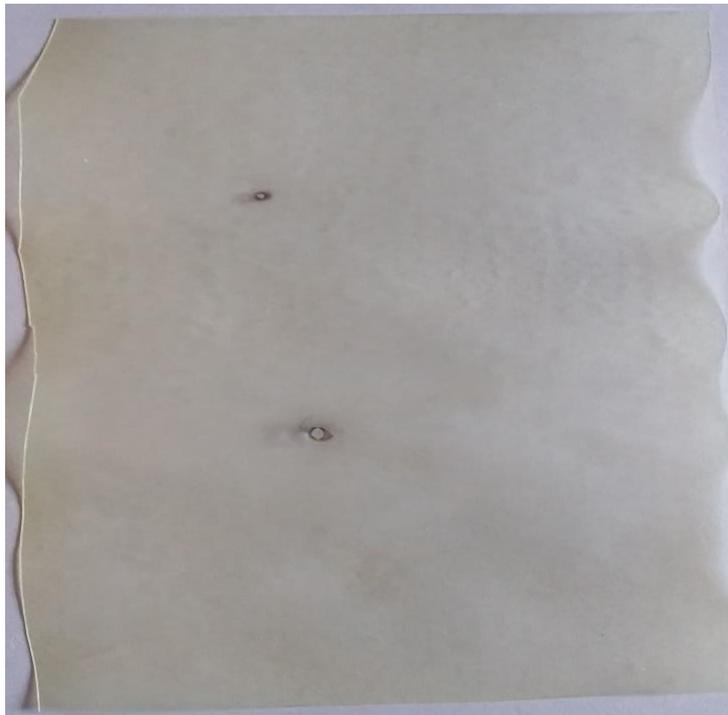


**Figure III.6 :** Influence de la distance inter-électrode sur la tension de claquage d'un espace d'air avec barrière.

Le claquage d'un milieu isolant se traduit par la formation d'un arc électrique entre les électrodes (Figure III.7). Dans le cas d'une isolation gazeuse avec une barrière solide, cet arc électrique crée un canal conducteur carbonisé permanent. Dans certains essais, nous avons remarquées perforations au niveau de la barrière (Figure III.8). Dans les deux cas, la barrière ne peut pas être réutilisée après le claquage car elle perd complètement son pouvoir d'isolation.



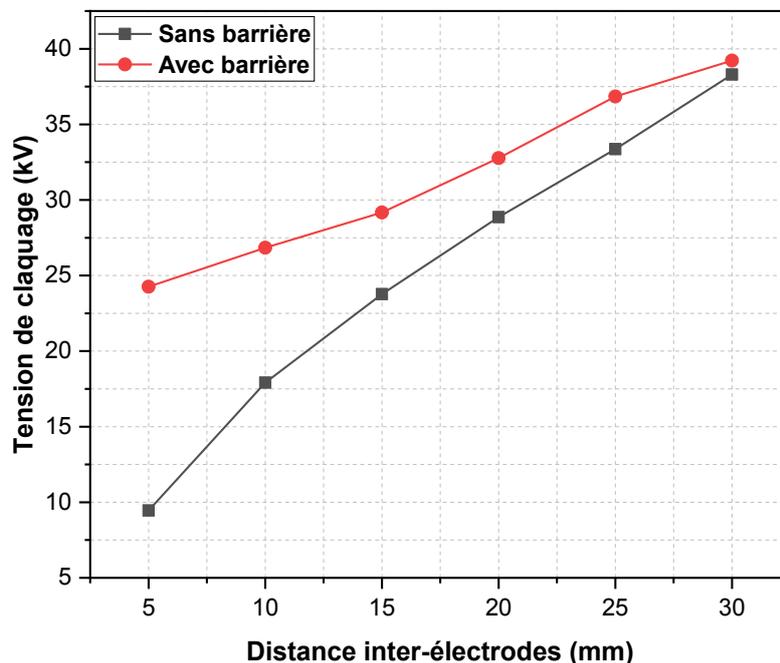
**Figure III.7** : Photo d'un claquage dans un espace d'air avec une barrière solide en géométrie pointe-plan.



**Figure III.8** : Perforations au niveau du diélectrique solide « film en polyéthylène ».

Comme toute autre isolation, la tension de claquage de l'espace entre les électrodes isolées avec l'air et une barrière en polyéthylène augmente avec de la distance inter-électrodes afin d'atteindre le champ disruptif du milieu.

En pratique, l'insertion d'une barrière isolante dans l'espace d'air entre les électrodes consiste à renforcer l'isolation du milieu en augmentant sa rigidité diélectrique. En analysant la courbe de la figure III.9, on remarque une nette augmentation de la tension de claquage dans le milieu gazeux avec barrière par rapport à celle sans barrière. L'écart entre les deux tensions diminue avec l'accroissement de la distance inter-électrodes. Ce phénomène est dû à la diminution de la ligne de contournement du diélectrique solide quand la distance inter-électrodes augmente.



**Figure III.9** : Influence de l'insertion d'une barrière solide dans un espace d'air sur la tension de claquage.

### III.2.2. Influence de la forme de l'électrode haute tension sur la tension de claquage

Sur la figure III.10, nous avons tracé la tension de claquage de l'air en fonction de la distance inter-électrodes pour les différentes configurations d'électrodes (plan-plan, sphère-plan et pointe-plan).

De cette figure, il en ressort que la tension de claquage est plus élevée pour des rayons de courbure élevés de l'électrode HT. Ce phénomène est certainement dû à l'effet de pointe. Quand le rayon de courbure de l'électrode HT augmente, le champ moyen entre les électrodes diminue pour la même tension appliquée ce qui engendre une augmentation de la tension de claquage.

De plus, selon la figure III.10 la tension de claquage en géométrie sphère-plan est presque égale à celle en géométrie plan-plan ( $d=5\text{mm}$  par exemple). Pour des faibles distances inter-électrodes, la configuration sphère-plan est proche de la géométrie plan-plan dont le champ électrique est uniforme. L'écart entre les deux tensions de claquage augmente avec l'accroissement de «  $d$  ».

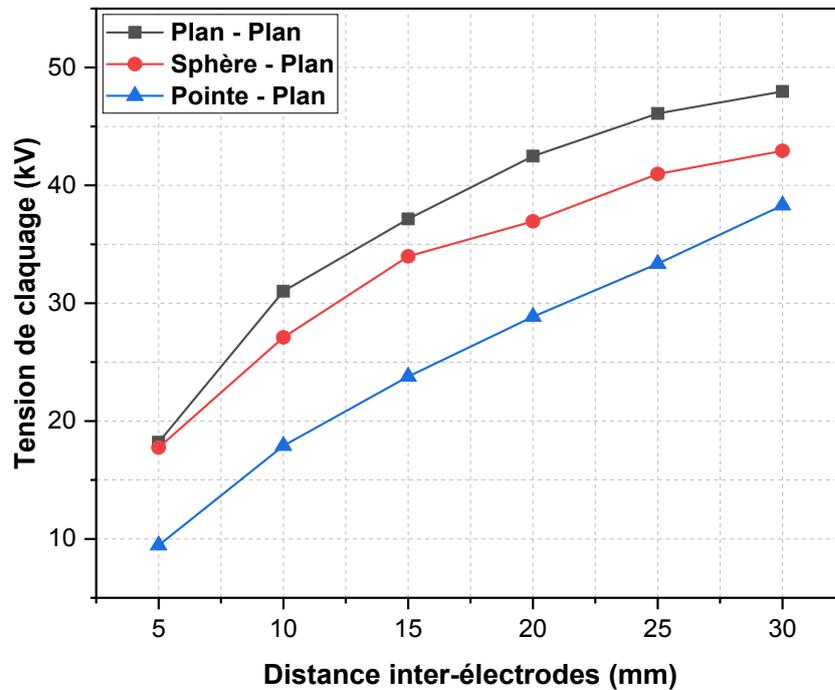
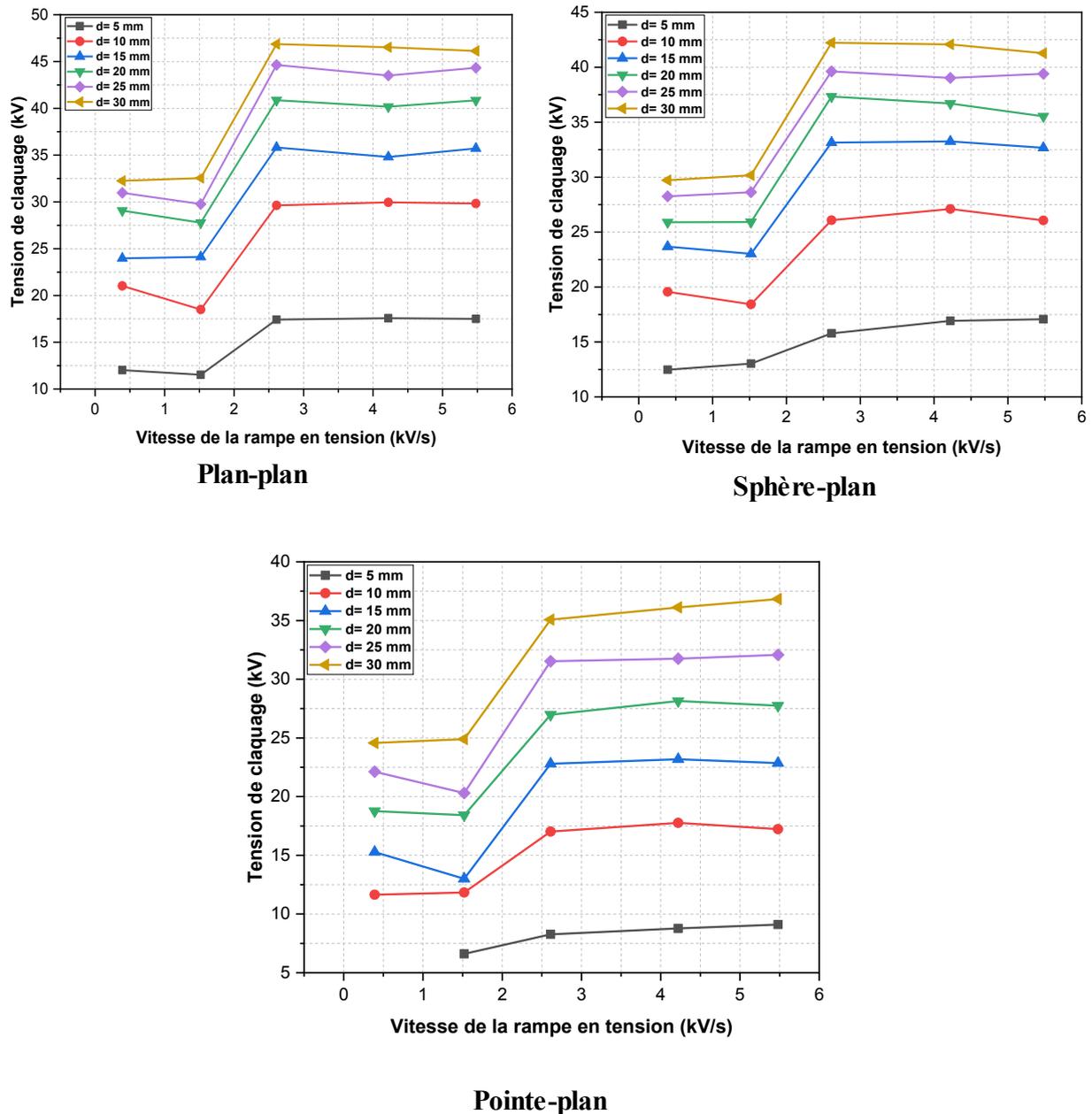


Figure III.10 : Influence de la forme de l'électrode HT sur la tension de claquage de l'air

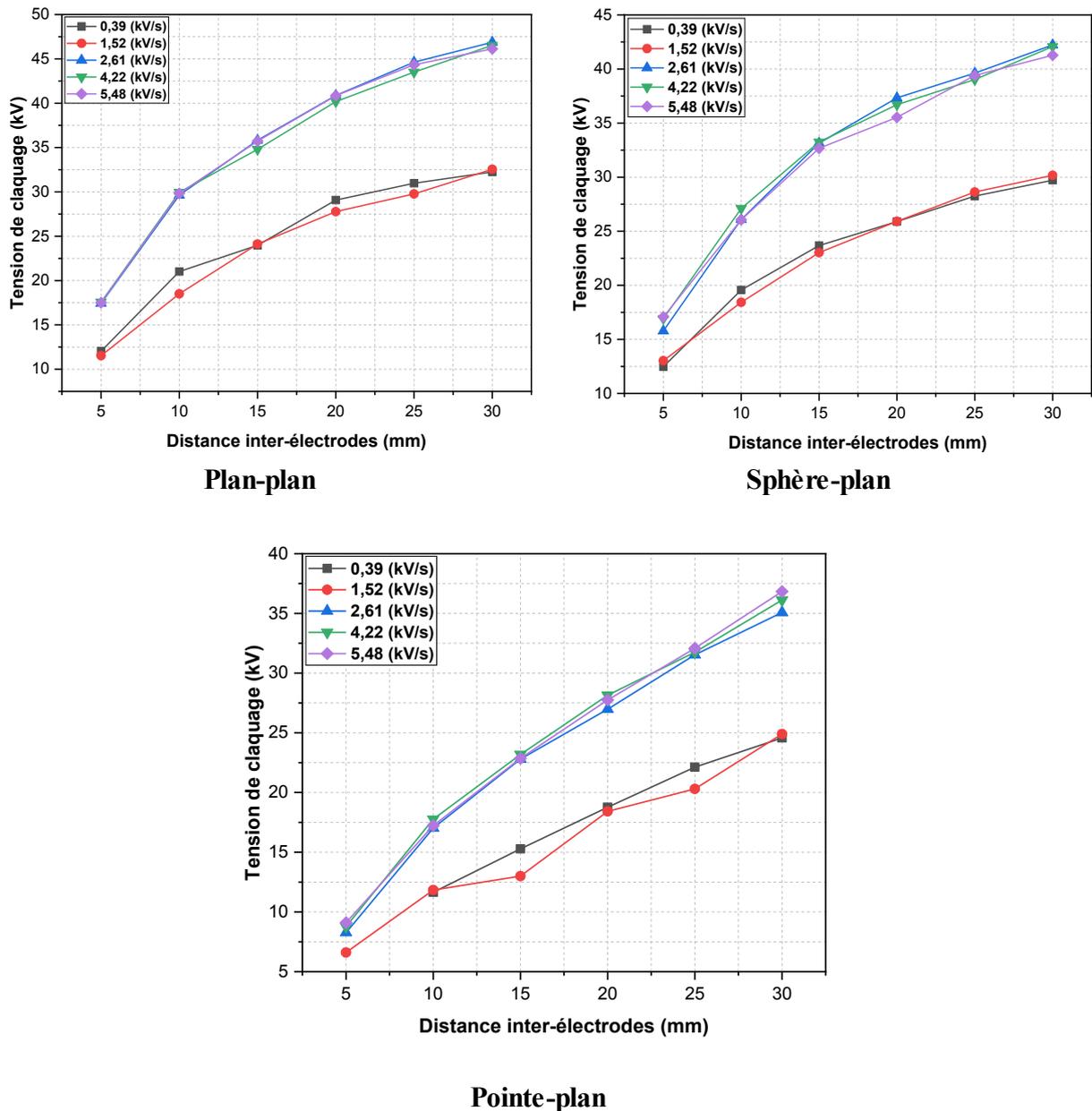
### III.2.3. Influence de la vitesse de la rampe de tension sur la tension de claquage de l'air

Dans cette partie on a étudié comment la vitesse de la rampe de tension influe sur la tension de claquage, tel que pour les distances inter-électrodes de 5, 10, 15, 20, 25 et 30 mm, on a varié la vitesse de la rampe de tension. Les tests ont été effectués seulement sur l'air. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure III.11.



**Figure III.11 :** Influence de la vitesse de la rampe de tension sur la tension de claquage de l'air.

Les trois courbes précédentes ont la même allure. Tel que, des variations insignifiantes de la tension de claquage sont observées dans les deux gammes de vitesse 0,39 - 1,52 kV/s et 2,61 - 5,48 kV/s, alors que ces variations sont considérables dans la gamme 1,25 - 2,61 kV/s. Cette variation entre la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> vitesse apparaît clairement sur les courbes de la figure III.12. Des travaux expérimentaux ont montré la tension à laquelle le claquage survient est d'autant plus élevée que sa vitesse d'accroissement est plus grande. Cela peut s'expliquer par le temps de relaxation de la charge d'espace qui se forme entre les électrodes.

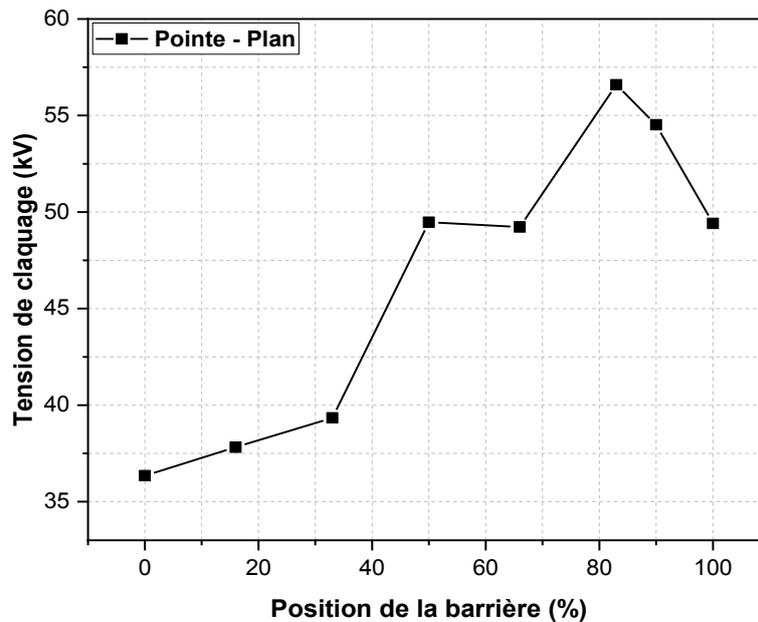


**Figure III.12 :** Tension de claquage de l'air en fonction de la distance inter-électrodes pour les cinq vitesses de rampe de la tension appliquée.

Les trois courbes de la figure mettent en évidence l'influence de la vitesse de rampe sur la tension de claquage de l'air. La variation n'est observée qu'entre les vitesses  $V_2=1,25$  kV/s et  $V_3=2,61$  kV/s.

#### III.2.4. Influence de la position de la barrière sur la tension de claquage de l'air

Dans cette partie de notre travail expérimental, nous varions la position de la barrière 'film en polyéthylène' par rapport à l'électrode terre et à chaque fois on mesure la tension de claquage du milieu. Le système d'électrodes choisi est pointe-plan et la distance inter-électrodes est fixée à 30 mm (Position 0 mm : film est du côté de l'électrode terre 'plan', Position 30 mm : film est du côté de l'électrode HT 'pointe').



**Figure III.13 :** Influence de la position du film en PE sur la tension de claquage de l'air en géométrie pointe-plan.

Il résulte de la figure III.13 que la tension de claquage et par conséquent la rigidité diélectrique du système augmente aléatoirement lorsqu'on éloigne la barrière du plan. Une chute de la tension de claquage est remarquée pour la position 90%. Dans ce cas la décharge se propage d'abord dans l'espace d'air entre la pointe et la barrière et donne lieu ensuite au claquage de l'intervalle d'air entre la barrière et le plan. On conclut alors que la décharge ne perce pas la barrière mais emprunte le chemin le plus court qui est l'air situé entre la pointe sous tension et bord de la barrière, puis du bord de la barrière au plan à la terre, c'est un claquage par contournement.

Pour notre configuration d'électrodes et la barrière utilisée, la position pour laquelle la rigidité diélectrique est optimale (tension de claquage maximale) est obtenue pour une position de la barrière entre 66 et 83 % par rapport au plan. Des essais au laboratoire ont montré qu'en tension alternative, l'amélioration de la rigidité du système a été remarquée pour des positions de la barrière située entre 40% et 80% de la distance inter-électrodes par rapport à l'électrode terre.

### III.3. Conclusion

Ce dernier chapitre est dédié à l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus. L'influence de la distance inter-électrodes, la forme de l'électrode HT, la vitesse de la rampe de la tension appliquée ainsi que la position du film en polyéthylène sur la rigidité diélectrique a été mise en évidence expérimentalement. Pour l'isolation gazeuse, les trois configurations d'électrodes plan-plan, sphère-plan et pointe-plan ont été utilisées, alors pour l'huile et l'air avec barrière seule la dernière est utilisée à cause des contraintes liées à la mesure de la tension de claquage.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Au cours de ce travail, nous avons traité l'influence de certains paramètres sur la tenue diélectrique de trois matériaux diélectriques.

Généralement, une tension de claquage d'un matériau solide est supérieure à celles des liquides, et celle des liquides est supérieure à celle des gaz. Trois isolations ont été choisies lors des essais expérimentaux : l'air, l'huile et l'air avec barrière en PE. La tension de claquage dépend essentiellement du milieu environnant (T, H, P) et elle est influencée par plusieurs paramètres, entre autres, on cite : la distance inter-électrodes, la géométrie d'électrodes, la vitesse de la rampe de tension et la position de la barrière isolante.

A partir des résultats expérimentaux obtenus, nous pouvons conclure :

1. Pour les trois types d'isolation : air, huile borak 22 et air avec barrière ; la tension de claquage croît d'une manière non linéaire avec l'augmentation de l'espace inter-électrodes «  $d$  ».
2. Dans l'air, pour les trois configurations d'électrodes : plan-plan, sphère-plan et pointe-plan, il a été montré que les lois de variation de la tension de claquage en fonction de «  $d$  » sont des polynômes d'ordre 2.
3. La tension de claquage des trois milieux décrits précédemment baisse avec la diminution du rayon de courbure de l'électrode HT, c'est le pouvoir des pointes.
4. Concernant la vitesse de la rampe de tension, on a vu que l'augmentation de la tension de claquage est observée lorsque la vitesse de la rampe de tension moyenne est confinée entre 1,25 kV/s et 2,61kV/s. Par contre, cette tension reste presque constante lorsque la vitesse est dans la gamme 0,39 - 1,52 kV/s ou 2,61 kV/s - 5,48 kV/s. A partir de ce résultat, on peut dire que la meilleure rigidité diélectrique est obtenue avec des vitesses supérieures ou égale à 2,61 kV/s.
5. L'insertion d'une barrière isolante dans l'espace d'air entre les électrodes améliore la rigidité diélectrique du milieu. En effet, la présence d'un écran isolant entre les deux électrodes transforme l'intervalle d'air initial en un système stratifié (air-barrière). Dans le cas du système pointe-plan, l'augmentation de la tension de claquage est observée lorsque la barrière est éloignée du plan puis décroît à partir d'une certaine distance en se dirigeant vers la pointe.
6. Une position optimale de la barrière (entre 66 et 83 % par rapport au plan,  $d = 30 \text{ mm}$ ) permet d'avoir la rigidité du système la plus élevée.

# **Bibliographie**

# Bibliographie

---

## Bibliographie

- [1] O. Iamarene, « Influence d'une barrière isolante sur la tension de claquage et sur le champ électrique », PFE Ingénieur, UAM Bejaïa, 2005.
- [2] R. Boudissa : polycopie de cours : « Matériaux en électrotechnique » université de Bejaïa, 2016.
- [3] M. Nemamcha :Polycope de cours : « Claquage des isolantes hautes tensions » université de Guelma ,2001.
- [4] M. Aguet et M. Lanoz, “Vocabulaire Electrotechnique International, Dispositifs électriques et magnétiques”, In Haute Tension. Publ. CEI, No. 50 (151), Genève, 1978.
- [5] Vocabulaire Electrotechnique International, Dispositifs électriques et magnétiques, Publ. CEI, No. 50 (151), Genève, 1978.
- [6] Guide pour l'évaluation et l'identification des systèmes d'isolation du matériel électrique, Publ. CEI, No. 505, Genève, 1975.
- [7] M. Nemamcha, « Claquage des isolants », haute tension 2001.
- [8] Z. Laimeche « Contribution à la caractérisation électrique des matériaux isolants (Application aux huiles de transformateurs de haute tension) », Mémoire Magister. Université des sciences et de la technologie Houari Boumedienne, 2012.
- [9] M. Hairour « Etude diélectrique d'une isolation hybride gaz-solide pour appareillage haute tension », Thèse de Doctorat. Université Montpellier II-sciences et techniques du languedoc, 2007.
- [10] R. Bouzouar, M. Bounoua « Calcul du champ électrique dans différents système d'électrode », Mémoire de Master Académique. Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2018.
- [11] Y. Choutri , H. Rebhi « Etude de la rigidité diélectrique des intervalles d'air pointe-plan avec les différentes formes de tensions », Mémoire de Master Académique. Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2017.
- [12] Y. Zebboudj : polycopie de cours : « Technique de haute tension », Université de Bejaïa, 2021.
- [13] C. Gary, « La Foudre : nature, histoire risques et protection », Dunod, Paris, 2004.
- [14] C. Bouquegneau, préface de Gérard Berger « Doit-on craindre la foudre ? » ; Collection Bulles des sciences.

## Bibliographie

---

- [15] M. Larba « Effets des décharges partielles sur les propriétés diélectriques des isolants dans la fabrication des câbles électriques », Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar d'Annaba, 2017.
- [16] Cours de A. Tilmatine ; « chapitre III mécanismes de claquage des isolants gazeux ».
- [17] Tatiana Guerre Olivera : « Etude expérimentale du comportement des isolateurs recouverts de glace sous tension de foudre et de manœuvre », Mémoire présenté à l'université de Québec, juillet 2004.
- [18] Ibrahima Ndiaye « Initiation et développement des décharges couronnes sur une surface de glace », Mémoire. Université du Québec, 2003.
- [19] G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lalot and C. Dubanton, "Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions", *Editions Eyrolles, Paris*, 1984.
- [20] "Electrical breakdown of gases", J.M Meek, J.D Craggs, The International Series of Monographs on Physics, Clarendon Press, 1953.
- [21] "Electron avalanches and breakdown in gases", H. Raether, Butterwords, London, 1964.
- [22] "Criteria of spark breakdown in sulphur hexafluoride", A. Pedersen, IEEE Trans. on Power Appar. Syst., pp. 2043-48, 1970.
- [23] L.Alston, D.J.Tedford(High voltage Technology), university d'oxford, 1968.
- [24] Y. P. Raizer, "Gas discharge physics", edition Springer-Verlag, 1991.
- [25] Raphaël Chassagnoux « Etude des propriétés diélectriques de l'azote liquide et du plastique dans le cadre d'un limiteur de courant », Thèse de Doctorat. Université Grenoble Alpes, 2019.
- [26] Paul-Joseph VUARCHEX, "Huiles et Liquides Isolants", Techniques de l'Ingénieur, Génie Électrique (D2 II), pp. D 230-3, pp. D 231-2, 1995.
- [27] N'Gnui Thomas Aka « Contribution à l'étude des phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides-Modèles de génération et de propagation des streamers », Thèse de Doctorat. Ecole Central de Lyon, 2000.
- [28] A. Boubakeur , " Claquage des diélectriques liquides ", support de cours l'université Debatna, 2002/2003.
- [29] Von. Hippel. J. Appl. Phys. N°8, p. 815, 1937.
- [30] A. Beroual « Phénomènes de propagation et de génération des streamers dans les diélectriques liquides en géométrie pointe-plan sous créneau de tension », Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), 1987.
- [31] P.k. Watson and A.H. Sharbaugh J. Electrochem. Soc. 107, (1960), 516

## Bibliographie

---

- [32] K. c. KAO IEEE Trans. Elect. Ins. , EI-11, (1976), 121
- [33] R. Tobazeon Technique de l'ingénieur (sous presse)
- [34] Z. Krasucki Proc. R. soc. A. 294, (1966), 393
- [35] W. R. L. Thomas Annual Report of the conf. Elect. Ins. Diel. Phen. , (1973), 130
- [36] W. R. L. Thomas Proc. of the 1975 conf. on Diel. Mat. Meas. and Appl, conf. Pub. November, 129, p. 311
- [37] E. V. Yanshin, K.V. Yanshin and S.M. Korobejnikov 8th Int. conf. cond. Breakd. Diel. Liq. ,Pavia, (1984), 194
- [38] T. Barkat « Intelligence en essaim, état de l'art et application dans les matériaux diélectriques », Mémoire Magister. Université de Batna.
- [39] A. Chabloz, «Technologie des matériaux à l'usage de profession de l'électricité», 1986.
- [40] S. Kalachnikov "Electricité" Edition de Moscou1980.
- [41] J.P.Mercier, W.Kurz, D.Zambelli " Introduction à la science des matériaux" Ed. Presse Polytechniques et universitaires Romandes. Ed.2002.
- [42] M. Moudoud « Etude de la conduction électrique dans les polymères isolants », Thèse de Doctorat. Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2010.
- [43] D. Belkacemi « Etude des caractéristiques des matériaux isolants pour transformateurs», Mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2012.
- [44] D. Bouguedad « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène propylène diène monomère (EPDM) », Thèse de Doctorat. Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2010.
- [45] Norme CEI 641 – 1, "Spécifications pour le carton comprimé et le papier comprimé à usage électrique", Partie 1 : Définitions et prescriptions générales, Juin 1995.
- [46] J. C. Dubois, "Propriétés diélectriques", Techniques de l'ingénieur, A 3140, 1984.
- [47] A. K. Jonscher, « Dielectric Relaxation in Solids». London: Chelsea Dielectric, 1983.
- [48] Mamadou Coulibaly « Caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces gaz/solide-Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale », Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Lyon, 2009.
- [49] B. Mireille, « Etude des matériaux isolants d'encapsulation pour la montée en température des modules de puissance haute tension », Thèse de l'Université de Toulouse – 2011.

## Bibliographie

---

- [50] Norme CEI 60243-1, «*Rigidité diélectrique des matériaux isolants. Méthodes d'essai. Partie 1 : essais aux fréquences industrielles*», 1998.
- [51] M. Douar « Recherche de matériaux isolants pour la conception d'une nouvelle génération de connecteurs électriques haute tension-Influence de la pollution sur les phénomènes de décharges partielles du contournement et de claquage », Thèse de Doctorat. L'école Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon, 2014.
- [52] M. Nedjar, « Evaluation de la tenue diélectrique à court et à long termes des polymères utilisés dans les dispositifs haute tension », Thèse de Doctorat d'Etat ES Sciences Physiques, Université de Tizi-Ouzou, 2003.
- [53] Coelho, R. Goffaux, « Dissipation et claquage thermique dans les solides non métalliques soumis à un champ électrique intense », *Revue Physique Appliquée*, Vol. 16, pp. 67-75, 1981.
- [54] Coelho, « Charge d'espace engendrée par un gradient de température », *RGE*, Tome 87, No. 11, pp. 881-886, 1978.
- [55] Coelho, B. Aladenize, *Les diélectriques, propriétés diélectriques des matériaux isolants*, édition Hermes, 1993.
- [56] L. A. Dissado, J. C. Fothergill, « Electrical degradation and breakdown in polymers », G.C. Stevens, 1992.
- [57] A. Tilmatine, « Matériaux diélectriques », [https://www.univ-sba.dz/fsi/downloads/ETL437-Chapitre\\_7.pdf](https://www.univ-sba.dz/fsi/downloads/ETL437-Chapitre_7.pdf).
- [58] J. Artbauer, "Elektrischefestigkeit von polymeren", *Kolloid Z. und Z. Polymere*, Vol. 202, pp. 15-25, 1965.
- [59] S. Chniba « Etude des mécanismes de claquage de films de polypropylène dans différents milieux ambiants », Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), 1984.
- [60] K. H. Stark, G. C. Garton, "Electric strength of irradiated polyethylene", *Nature* 176, 60 pp. 1225-1226, 1955.
- [61] O. Belkaid, H. Idir « Etude des paramètres influant sur la rigidité diélectrique de l'air atmosphérique », Mémoire de master. Université de Bejaïa, 2014.
- [62] J.D. Stephenson, "*Corona and spark discharge in gases*", *Journal IEE*, 1933.
- [63] J.M. Meek, J. D. Craggs "Electrical Breakdown of Gases", John Wiley & Sons Ltd, 1978.

## **Résumé**

La tenue diélectrique des isolants est influencée par plusieurs paramètres tels que les facteurs électriques, physiques et environnementaux. Parmi ces facteurs nous citons : la distance inter-électrodes, la géométrie des électrodes, la position de la barrière isolante, la vitesse de la rampe de tension, la température, la pression et l'humidité. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude des effets des facteurs géométriques et de la vitesse de montée en tension sur la rigidité diélectrique de certains matériaux largement utilisés dans les équipements électriques. Les essais ont été effectués sous tension alternative sinusoïdale 50 Hz. Les résultats expérimentaux ont mis en évidence la nette influence des paramètres géométriques surtout la distance inter-électrodes sur la tension de claquage des trois isolations : air, borak 22 et air avec barrière. L'influence de la vitesse de la rampe de tension sur la tension de claquage n'est observée que sur une gamme de vitesse bien définie. En dehors de cette dernière, l'influence de la vitesse de montée en tension est insignifiante. L'amélioration de la rigidité diélectrique de l'air par insertion d'une barrière solide est clairement observée expérimentalement. Une position optimale de cette dernière dans l'espace d'air entre les électrodes permet d'avoir la rigidité diélectrique la plus élevée.

## **Mots clés :**

Rigidité diélectrique, claquage, isolants, mécanisme de claquage, décharge disruptive, tenue diélectrique, barrière isolantes.

## **Abstract**

The dielectric strength of insulators is influenced by several parameters such as electrical, physical and environmental factors. Among these factors we quote: electrode gap, electrodes geometry, insulating barrier position, speed of the voltage ramp, temperature, pressure and humidity. In this work, we were interested in the effects study of the geometric factors and the speed of rise in voltage on the dielectric rigidity of certain materials widely used in electrical equipment. The tests were carried out under sinusoidal alternating voltage 50 Hz. The experimental results highlighted the clear influence of geometric parameters, especially the electrode gap on the breakdown voltage of the three insulations: air, borak 22 and air with barrier. The influence of the speed of the voltage ramp on the breakdown voltage is observed only over a well-defined speed range. Outside this range, the influence of the speed of rise in voltage is insignificant. The improvement of the dielectric rigidity of the air by inserting a solid barrier is clearly observed experimentally. An optimal position of this barrier in the air space between the electrodes allows to have the highest dielectric rigidity.

## **Keywords:**

Dielectric rigidity, breakdown, insulators, breakdown mechanism, disruptive discharge, dielectric strength, insulating barrier.