

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2021



MEMOIRE

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

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Réseaux électriques

Par: GUETATLIA Zaid et HEMAIZIA Aimen

Thème

*Étude du comportement diélectrique -vieillessement
thermique- des isolants solides utilisés en Haute
tension*

Soutenu publiquement, le 09 septembre 2021 devant le jury composé de:

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

Année Universitaire: 2020/2021

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience durant ces années d'étude.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur **Dr. BELOUCIF Faissel**, pour sa patience, son soutien, ses précieux conseils, son aide, sa disponibilité tout au long de nos études et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nous tenons tout particulièrement à remercier les enseignants du département de **Génie Électrotechnique et Automatique** et du **Laboratoire de Génie Électrique** de l'Université **8 Mai 1945 Guelma** pour leur disponibilité et encouragement, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

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

Nous remercions enfin tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail et qui n'ont pas pu être cités ici.

المخلص: ان الهدف من هذا الموضوع هو تقديم دراسة حول الاستخدامات المختلفة للمواد العازلة الصلبة التي تستعمل في انشاء الانظمة الكهربائية من حوامل النواقل والمحولات الكهربائية وكذلك دراسة الظواهر الفيزيائية الأساسية التي تسمح بمرور التيار الكهربائي في هذه المواد العازلة، من أجل تعميق معرفتنا حول خصائص هذه العوازل لحسن استخدامها في الجهد العالي خصوصا ظاهرة بروز وخلق مختلف الشحنات عند التفريغ الكهربائي وتحليل تأثير درجة الحرارة على شيخوخة هذه المواد.

عند استعمال هذه العوازل تحت تأثير حقول كهربائية قوية ودرجات حرارة عالية فان القوة العازلة للعوازل الصلبة تتأثر بالعديد من العوامل الكهربائية والفيزيائية والبيئية. لذلك كل هذه العوامل يمكن أن تسبب في تسهيل ظاهرة تنقل التفريغ الكهربائي داخل هذه العوازل الصلبة مما يؤدي حتما ومع مرور الزمن ضياع خصائصها العازلة ومنه الى تقليل الأداء العازل لهذه المواد العازلة وبالتالي الى اهترائها وفسادها كليا.

الكلمات المفتاحية: العوازل الصلبة، شبكات الضغط العالي، التفريغ الكهربائي، الضياع في العوازل، خصائص العوازل، اهتراء العوازل.

Abstract :

The aim is to present a study on the different uses of solid materials and on the fundamental physical phenomena allowing the passage of electric current in dielectrics, in order to deepen our knowledge on the behavior of these insulators used in high voltage and to characterize the various electrical discharges thus produced and to analyze the effect of temperature on their aging.

The dielectric strength of solid insulators is influenced by several electrical, physical and environmental factors. So all these factors can cause conduction phenomena in gases and in solids, which can threaten and reduce the dielectric performance of these dielectric materials.

Keywords: Solid insulators, high voltage networks, electrical discharge, losses in insulators, characteristics of insulators, breakdown.

Table des matières

Remercîment	
Résumé.....	
Introduction générale	6
Chapitre I : Différentes utilisations des matériaux solides en énergie électrique.....	7
I.1. Introduction	8
I.2. Définition d'un matériau	8
I.3. Classification selon la structure atomique.....	8
I.4. Formes et utilisations des différents types des matériaux solides.....	9
I.4.1. Isolation des lignes électriques aériennes.....	9
I.4.1.1. Isolateurs de type rigide	9
a- Isolateur rigide à socle	9
b- Isolateur rigide à tige	10
I.4.1.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne	10
I.4.1.2.1. Isolateur capot et tige	10
a- Profil standard	11
b- Profil antibrouillard (forme A).....	11
c- Profil antibrouillard (forme B)	12
d- Profil sphérique	12
e- Profil plat.....	13
I.4.1.2.2. Isolateur long fût	13
a- En porcelaine.....	14
b- Céramique	15
I.4.1.3. Isolateurs de type organiques synthétiques (non rigide).....	15

I.4.1.3.1. Polyethylene et polyéthylène réticulé (PE et XLPE)	16
I.4.1.3.2. Polyvinylchloride (PVC)	17
I.4.2. Isolation dans les machines et les circuits électriques	17
I.5. Conclusion.....	17
Chapitre II : Modélisation de la tenue diélectrique des matériaux solides	20
II.1. Introduction.....	21
II.2. Caractérisation d'un matériau isolant	21
II.3. Création des décharges électriques	21
II.4. Modèles des décharges électriques	22
II.4.1. Les décharges luminescentes (décharges « glow »)	22
II.4.2. Les décharges Couronnes	22
II.4.3. Les décharges à barrière diélectrique (DBD).....	23
II.4.4. Les décharges partielles	24
II.5. Caractéristiques diélectriques des matériaux solides.....	25
II.5.1 Résistivité.....	25
II.5.2. Permittivité.....	27
II.5.3. Facteur de pertes diélectriques.....	29
II.5.4. Polarisation des diélectriques.....	30
II.5.4.1. Polarisation électronique.....	31
II.5.4.2. Polarisation atomique	31
II.5.4.3. Polarisation d'orientation(dipolaire).....	32
II.5.4.4. Polarisation interfaciale	32
II.5.5. Rigidité diélectrique.....	32
II.5.6. Pertes diélectriques	33
II.6. Conclusion	33

Chapitre III : Analyse du processus de vieillissement thermique des matériaux diélectriques solides	34
III.1. Introduction.....	35
III.2. Processus de claquage dans les solides.....	35
III.2.1. Claquage intrinsèque	36
III.2.2. Claquage électronique ou avalanche	36
III.2.2.1. Développement d'une avalanche électronique	37
III.2.3. Claquage électromécanique	37
III.2.4. Claquage par décharge partielle (arborescences électriques)	38
III.3. Vieillissement thermique	40
III.3.1. Effet de la température	41
III.3.2. Bilan énergétique	41
III.3.3. Détermination de la température maximale.....	46
III.4. Conclusion	48
Conclusion générale.....	50
Références bibliographiques.....	51

Introduction Générale

Introduction générale

Ce travail porte sur l'étude de l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés des matériaux diélectriques solides utilisés dans les différentes isolations dans l'appareillage à haute et moyenne tension. Les travaux de modélisation réalisés consistent à caractériser les propriétés diélectriques, des matériaux solides fréquemment utilisés en énergie électrique soumis à un vieillissement thermique accéléré. Cette étude montre que le vieillissement thermique affecte considérablement les propriétés diélectriques des matériaux solides employés en isolation des équipements à haute tension.

Notre mémoire s'articule autour de trois chapitres: Dans une première étape, nous présentons une large utilisation et les différents équipements ou les matériaux diélectriques solides sont l'élément principal dans leurs constructions, cependant les éléments et les appareils constituant le système énergétique de la génération de l'énergie électrique jusqu'à leur utilisation, dans le deuxième chapitre une étude sur la modélisation des propriétés diélectriques (facteur de pertes diélectriques, permittivité relative et résistivité transversale, conduction dans les isolants solides) a été réalisée

Le dernier chapitre est consacré à l'étude du processus du vieillissement thermique, à la caractérisation des changements causés par l'évolution de la température (contrainte thermique) au niveau de la structure moléculaire des matériaux solides et en fonction du temps de vieillissement, que le vieillissement thermique a une grande influence sur les propriétés des matériaux solides.

Les changements sur la tenue diélectrique des matériaux causés principalement par la dégradation thermique et l'évolution du temps de vieillissement, sont caractérisés par des techniques physico-chimiques de la matière de construction des différents matériaux solides, le claquage diélectrique se produit dès que la tension appliquée à un isolant excède une valeur critique et provoque localement la fusion et la perte complète du matériau.

Depuis plusieurs années, les applications des isolants solides, notamment les polymères ont connus un élargissement dans le domaine industriel à cause de leurs excellentes propriétés électriques, thermiques et mécaniques.

I.1. Introduction

Les matériaux diélectriques idéaux sont des matériaux qui ne sont pas conducteurs du courant électrique puisque ils ne contiennent pas de charges libres dans leurs structures, à moins qu'ils soient soumis à l'action des facteurs ionisants externes provoquant la perte de leurs propriétés diélectriques

Le rôle des isolateurs est de relier les conducteurs aux supports en assurant leur isolation électrique. En effet, un bon choix de dimensionnement des isolateurs s'avère indispensable pour assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement de haute tension.

I.2. Définition d'un matériau

Un matériau désigne toute matière utilisée pour réaliser un objet au sens large. Ce dernier est souvent une pièce d'un sous-ensemble. C'est donc une matière de base sélectionnée en raison de propriétés particulières et mise en œuvre en vue d'un usage spécifique. La nature chimique, la forme physique et l'état de surface des différentes matières premières, qui sont à la base des matériaux.

I.3. Classification selon la structure atomique

Les matériaux peuvent être classés selon leur structure atomique; On peut distinguer : les matériaux organiques ou polymères organiques sont des matériaux constitués de molécules formant de longues chaînes de carbone, matériaux faciles à mettre en forme, ce sont des matériaux d'origine animale, végétale ou synthétique : bois, coton, laine, papier, carton, matière plastique, caoutchouc, cuir, etc. Ce sont presque toujours des isolants thermique et électrique .

Les matériaux minéraux ou céramiques sont des matériaux inorganiques caractérisés par leur résistance mécanique et thermique (réfractaires). Ce sont des roches, des céramiques ou des verres : porcelaine, pierre naturelle, plâtre, etc. ;

Les matériaux composites. Ce sont des assemblages d'au moins deux des trois types de matériaux déjà cités, non miscibles : plastiques renforcés de fibre de verre, fibre de carbone, contreplaqué.

I.4. Formes et utilisations des différents types des matériaux solides

Les matériaux isolants sont devenus le point essentiel dans la conception de beaucoup de catégories de matériels électriques utilisés dans la chaîne production consommation d'énergie électrique, grâce aux propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques de ce type de matériaux.

I.4.1. Isolation des lignes électriques aériennes

Dans les réseaux de transport d'énergie électrique, l'isolement pylône-conducteur qui représente les deux parties conductrices, est assuré par une chaîne d'isolateurs. Chaque chaîne est caractérisée principalement par sa longueur de fuite (nombre d'éléments).

Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales. D'une part, ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et d'autre part, ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dues surtout au poids de la ligne[1].

L'isolateur est utilisé comme son nom l'indique pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant.

I.4.1.1. Isolateurs de type rigide

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le fil câble électrique. Il est constitué d'une ou de plusieurs pièces isolantes encastrées et scellées les unes dans les autres. Ces isolateurs sont fixés au pylône par des ferrures de forme diverses.

Ils sont principalement utilisés dans les lignes aériennes pour des tensions ne dépassant pas généralement 60 kV. Les isolateurs rigides peuvent être placés en position horizontale, verticale ou oblique [2]. Il existe deux types principaux d'isolateurs rigides : les isolateurs rigides à tige et les isolateurs rigides à socle :

a- Isolateur rigide à socle

Isolateur rigide qui comporte une ou plusieurs pièces en céramique ou en matériau synthétique, assemblées de façon permanente sur un socle métallique, et qui est destiné à être monté sur un support au moyen d'une tige centrale ou de boulons solidaires du socle.

b- Isolateur rigide à tige

Isolateur rigide qui comporte une ou plusieurs pièces en céramique en forme de cloche, assemblées de façon permanente, et qui est destiné à être monté sur un support au moyen d'une tige à visser à l'intérieur de l'isolateur.

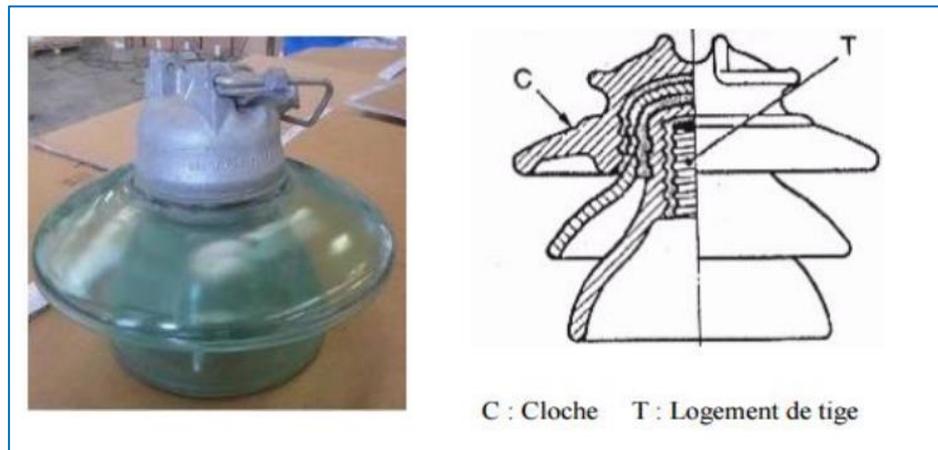


Figure I.1 : Forme d'isolateur de type rigide

I.4.1.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

Ils sont constitués par le matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs. La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage). Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne:

- ☛ Les isolateurs à capot et tige.
- ☛ Les isolateurs à long fût.

I.4.1.2.1. Isolateur capot et tige

Capot et tige est constitué d'un corps isolant qui porte à l'intérieur une tige en acier, où la tête conique de cette tige est scellée dans le matériau isolant soit le verre soit la porcelaine.

L'extrémité supérieure de l'isolateur porte un capot scellé en fonte malléable troué de telle sorte qu'on peut faire entrer l'extrémité inférieure de la tige dans ce trou, et le scellement des éléments de chaîne capot et tige se fait de cette façon en faisant pénétrer la

partie inférieure de la tige de l'élément supérieur dans le capot de l'élément inférieur en utilisant du ciment [3].

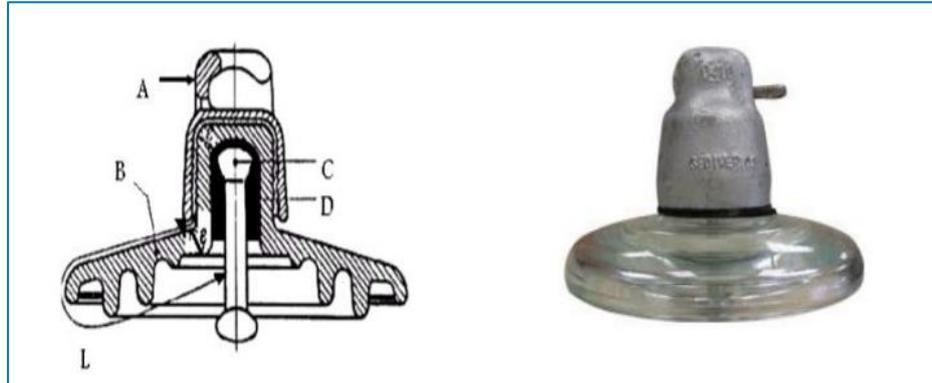


Figure I.2 : Forme d'isolateur de type capot tige

A : le capot. *B*: le diélectrique (verre trempé ou céramique) *D* : le ciment de fixation *C* : la tige *L* : plus court distance dans l'air entre le capot et la tige *ℰ* : Longueur du canal perforation $\mathcal{E} \leq L/2$

a- Profil standard

La faible profondeur, l'espacement entre les anneaux (nervures) et la ligne de fuite moyenne permettent l'utilisation de ce profil dans une zone de pollution modérée.

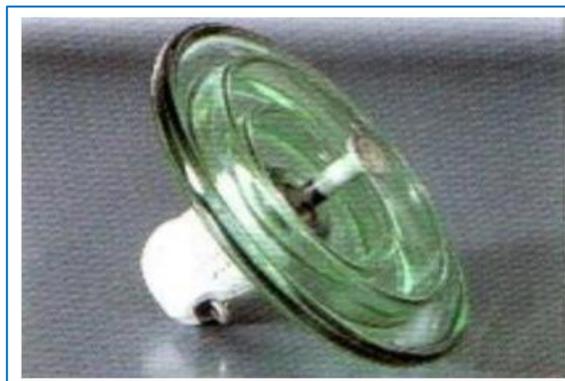
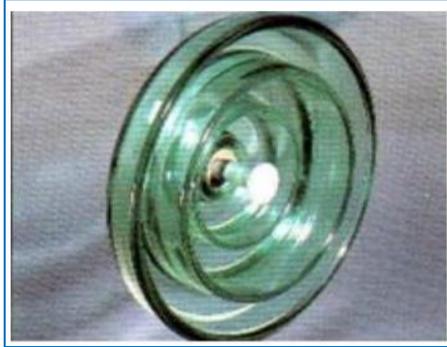


Figure I.3 : Profil standard

b- Profil antibrouillard (forme A)

Il est de conception avec un diamètre plus grand que le type de profil standard muni de deux ou trois rainures à grande profondeur.

Cette conception permet également un lavage manuel facile si c'est nécessaire et empêche le claquage entre rainures voisines quand il y a une pollution sévère et tout le profil intérieur simplifie la maintenance.



a/



b/

Figure I.4: Profil antibrouillard ;a/ forme A, b/forme B.

c- Profil antibrouillard (forme B)

Dans cette conception comme le montre la figure I.4.b, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et le dépôt des sels minéraux sur la surface de l'isolateur, empêchant alors la formation d'un électrolyte conducteur sur la surface. Ce type d'isolateur est efficace dans les zones côtières[4].

d- Profil sphérique

La forme sphérique permet une longueur de fuite équivalente à celle d l'absence de rainures internes permet un lavage manuel facile et efficace.

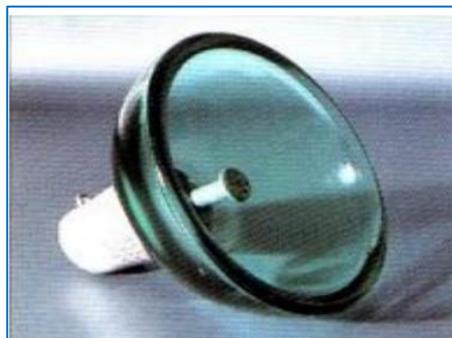


Figure I.5 : Profil sphérique

e- Profil plat

L'élimination complète des rainures internes réduit grandement l'accumulation de pollution sur la surface basse, grâce au courant d'air.



Figure I.6: Profil plat

I.4.1.2.2. Isolateur long fût

Constitué d'un cylindre plein en céramique, ou en porcelaine, muni d'ailettes avec une pièce métallique de liaison à chaque extrémité. Celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet [4].

Les matériaux céramiques sont fabriqués à partir d'argile contenant de l'oxyde d'aluminium et d'autres matériaux inorganiques. Les parties épaisses de ces substances reçoivent la forme souhaitée dans la pièce, puis cuitent à une température d'environ (1450°C) pour fournir une structure finale solide et inélastique.

La céramique et le porcelaine sous l'une de ses formes a une résistance mécanique élevée et une faible permittivité ($\epsilon_r < 12$) est largement utilisée pour les isolateurs et les traversées. Ceux-ci ont 40% à 50% d'argile, 30-20% d'oxyde d'aluminium et 30% de spath. Les céramiques à permittivité plus élevée ($\epsilon_r > 12$) sont utilisées dans les condensateurs et les transducteurs [5].

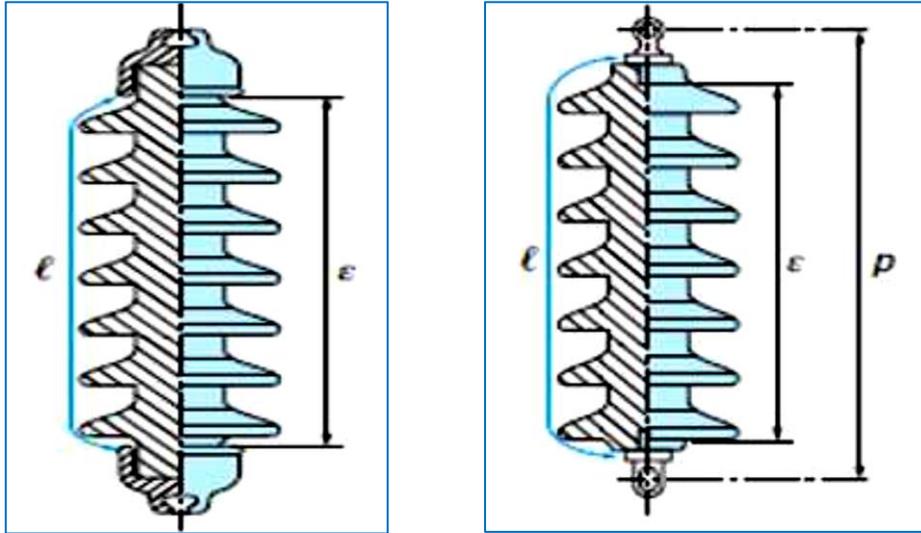


Figure I.7 : Isolateur à long fût.

a- En porcelaine

Les isolateurs en porcelaine sont faits de silicate d'aluminium et mélangés avec du kaolin et du quartz en plastique et le mélange est chauffé à un degré à la température appropriée afin de trouver un équilibre entre la résistance mécanique et la porosité requises du matériau, ce qui affecte l'intensité de l'isolation électrique et la force du champ électrique sans s'effondrer à 60 Kv / cm et est en porcelaine deux types de capuchon et broche Et longue tige.



Figure II.8: Isolateur en Porcelaine

b- Céramique

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins. Souvent on trouve les céramiques dans les postes : isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance.



Figure I.8 : Isolateur en céramique

I.4.1.3. Isolateurs de type organiques synthétiques (non rigide)

Les matériaux isolants organiques synthétiques - communément classés sous le mot-clé rasage en plastique sont de grande importance dans la technologie d'isolation électrique en tant que non durcissable thermoplastiques, duroplastiques durcissables, élastomères et quelques matériaux liquides par exemple. huiles de silicone. Leur application couvre tous les domaines des systèmes d'isolation haute tension.

Les plastiques sont des substances organiques constituées de macromolécules. Les grosses molécules ont leur origine dans la capacité de l'atome de carbone quadrivalent à former des chaînes arbitrairement longues qui peut contenir une dizaine de milliers de groupes atomiques et avoir des poids moléculaires allant jusqu'à quelques millions.

La formation de macromolécules se produit au moyen d'une réaction de polymérisation par condensation et polymérisation par addition, au cours de laquelle molécules de faible poids moléculaire (monomères) se combinent pour produire de grosses molécules (polymères) de grand poids moléculaire.

I.4.1.3.1. Polyéthylène et polyéthylène réticulé (PE et XLPE)

Le polyéthylène fait partie des plastiques partiellement cristallins. Pendant la solidification de la masse fondue un alignement parallèle de certaines des molécules de la chaîne se produit.

Par traitement chimique ou par rayonnement, les molécules de PE peuvent être réticulées spatialement. En polyéthylène réticulé (XLPE) les propriétés thermoplastiques sont perdues ; à des températures plus élevées [6], Le PE est fabriqué à partir d'éthylène soit par un procédé haute pression à 1500 bar et 250 °c, où il en résulte un polyéthylène à chaîne ramifiée de densité inférieure (LOPE basse densité polyéthylène) ou par polymérisation au solvant basse pression qui donne du polyéthylène haute densité (ESPOIR PE haute densité).

Le PE basse pression plus dense a une plus grande intensité de champ de claquage et une constante diélectrique plus élevée que le PE haute pression. Pour les feuilles des champs de claquage de plus de 200 kV/mm sont atteints.

PE est moins polaires et a donc une faible constante diélectrique et un très faible facteur de dissipation facteur. La résistance spécifique est tres élevée et se situé autour de 10^{16} à 5.10^{17} Ω .cm.

En raison de ses propriétés, le PE est utilisé dans les systèmes d'isolation haute fréquence, par ex. , isolation en ruban, isolation en mousse, isolation en disque ou hélicoïdale dans les câbles. Le plus une application importante dans la technologie de l'énergie est l'isolation des câbles.

Les avantages des câbles PE sont : Montage rapide, faible poids, petits rayons de courbure, installation en pente ou à la verticale peut être positionné sans difficulté dans n'importe quel endroit.

Pour Le LDPE et le XLPE (à base de LDPE réticulé au peroxyde) sont largement utilisés pour l'isolation des câbles jusqu'à 110 kV.

Les principales difficultés des câbles PE et XLPE résident dans leur sensibilité aux décharges partielles (PD) et la question associée de la durée de vie. Les cavités les plus infimes (microcavités) de 1-30 μ m de diamètre sont inévitables lors de la fabrication. A ces points faibles, sous contrainte électrique, des décharges partielles se développement forment des pistes de décharge (arbres) peuvent se produire une deterioration complète des cables elecyrriques en PE.

I.4.1.3.2. Polyvinylchloride (PVC)

Il est obtenu à partir de chlorure de vinyle sous haute pression. L'obligation C-Cl produit un grand moment dipolaire qui provoque une résistance et une rigidité élevée du matériau en raison des forces de liaison dite de Van-der-Waals .

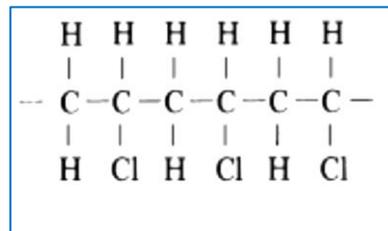


Figure I.9 : Structure moléculaire du PVC

Le PVC est souvent mélangé avec des matériaux de remplissage (kaolin, quartz). Il est traité comme PVC dur est disponible sous forme de poudre ou de granulés, les propriétés électriques et diélectriques ne sont que moyennes et leur facteur de dissipation est particulièrement faible [6].

Le PVC est un matériau isolant utilisé pour l'isolation du noyau des câbles, pour les gaines de câbles et les supports isolants à environ 10 kV en raison du faible facteur de dissipation.

I.4.2. Isolation dans les machines et les circuits électriques

Une autre variété de matériaux isolants sont disponibles spécifiquement conçu pour isoler les les différentes parties actives dans les machines électriques ainsi que les circuits électriques, tel que le papier, teflon, epoxy et le vernis est souvent utilisé pour séparer les enroulements dans les transformateurs ou dans d'autres applications.

Aujourd'hui les isolations statoriques des grandes machines tournantes en service sont principalement fabriquées à l'aide de résines à base de polyester ou d'époxy.

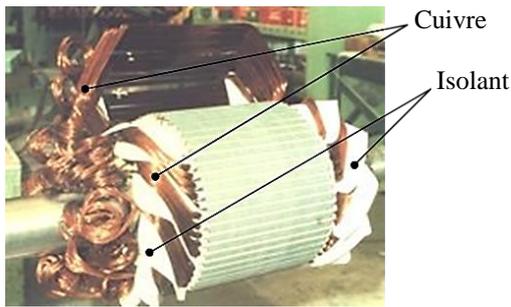


Figure I.10 : Isolation d'un rotor bobiné de moteur asynchrone

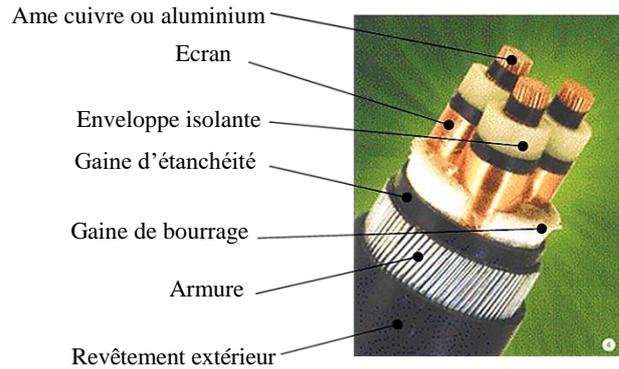


Figure I.11 : Isolation d'un câble électrique

Les polyesters comme le polyéthylène téréphtalate (PET) ou le polyéthylène naphtalate (PEN) ont une très bonne tenue en température et sont utilisés dans les condensateurs.

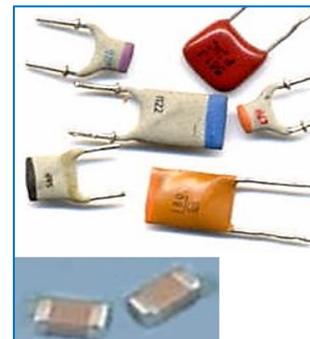
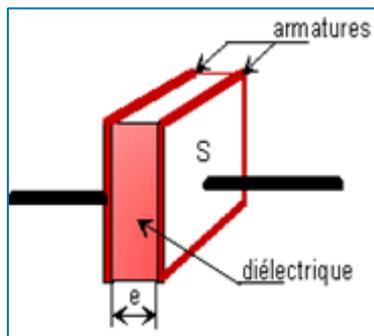


Figure I.12 : Isolation dans un condensateur

I.5. Conclusion

La classification des matériaux isolants solides est basée sur leurs compositions chimiques, distinguées principalement entre inorganiques, organiques et composites des deux matériaux.

la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont : le poids lourd des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages.

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, l'exploitation et le contrôle de vieillissement de ces matériels.

CHAPITRE II

Modélisation de la tenue diélectrique des matériaux solides

II.1. Introduction

Dans les applications haute tension, les isolateurs sont soumis à des contraintes électriques et environnementales extrêmement sévères. Les décharges partielles et la rupture diélectrique sont deux mécanismes différents pouvant causer la dégradation et la défaillance des isolants en fonction du temps, à cette différence près que la dégradation par décharge peut durer longtemps contrairement à la rupture diélectrique qui intervient très rapidement.

II.2. Caractérisation d'un matériau isolant

En électricité comme en électronique, un isolant électrique est une partie d'un composant ou un organe ayant pour fonction d'empêcher le passage de tout courant électrique entre deux parties conductrices, soumises à une différence de potentiel électrique.

Un isolant est constitué d'un matériau diélectrique qui possède peu de charges libres, les électrons dans la bande de valence ne peuvent pas quitter la bande interdite pour occuper la bande de conduction à cause de sa largeur très élevée, ainsi les électrons restent emprisonnés dans la bande de valence.

II.3. Création des décharges électriques

Dans un solide constitué de N atomes, les niveaux d'énergies se répartissent en intervalles dits bandes d'énergies qui seront donc occupées par les électrons. Parmi ces bandes, deux seulement sont intéressantes car ils déterminent les propriétés électriques du solide, ces deux bandes sont la bande de valence (BDV) et la bande de conduction, séparées par une bande dite interdite car ne pouvant être occupée par les électrons.

Tous les isolants deviennent conducteurs lorsqu'ils sont soumis à une tension suffisamment élevée, appelée tension de claquage, associée à une propriété physique du matériau, la rigidité diélectrique, exprimée en volts par mètre (symbole $V.m^{-1}$).

Lorsqu'ils sont exposés à une tension suffisamment élevée, les isolateurs souffrent du phénomène de rupture électrique. Lorsque le champ électrique dans un matériau isolant dépasse partout où il a le champ de fracture le plus bas, l'isolant se transforme brusquement en conducteur, provoquant une forte augmentation du courant et un arc électrique à travers le matériau.

II.4. Modèles des décharges électriques

Mais lorsque les matériaux diélectriques solides sont soumis à un champ électrique, le courant qui peut apparaître est typiquement de l'ordre du microampère. Lorsqu'un champ électrique d'amplitude suffisante est appliqué, un courant nettement plus important est détecté et du principalement au déplacement des porteurs de charges (électrons et ions).

On appelle apparition d'une décharge électrique à l'intérieur de l'isolant, cependant c'est la décharge électrique qui peut conduire au claquage. Les phénomènes de décharges et de claquage peuvent être de différents types, tant dans leur déroulement que dans leur nature.

II.4.1. Les décharges luminescentes (décharges « glow »)

Les décharges luminescentes sont le plus souvent générées à basse pression (inférieure à 10 torrs) entre deux électrodes planes avec des tensions d'alimentation d'une centaine de Volts tandis que l'intensité varie de 10^{-4} à 10^{-1} Ampère. Ces décharges peuvent aussi être obtenues à pression atmosphérique avec d'autres géométries de réacteur. Les tensions d'alimentation sont alors beaucoup plus importantes (plusieurs kV).

Le régime de décharge luminescente, notamment utilisé dans les tubes d'éclairage (tubes néon, tubes fluorescent), est aussi employé pour le traitement de polluants comme les COV (Corps Organiques Volatils) comme les chlorofluorocarbones et le méthane ou les NOx. Ces décharges sont caractérisées par un plasma homogène. À basse pression, la technique permet l'utilisation de faibles champs électriques (de l'ordre de 10 V/cm) mais ne doit pas occulter le problème de la limitation du débit massique du gaz à traiter.

II.4.2. Les décharges Couronnes

Les décharges couronnes, également appelées décharges à effet corona, apparaissent généralement à pression atmosphérique.

On peut définir la décharge couronne comme une décharge électrique autoentretenue non destructive dans un gaz, qui peut apparaître entre deux électrodes asymétriques, dont l'une à un faible rayon de courbure reliée à une haute tension, appelée « électrode active », et l'autre électrode, généralement plane, et reliée à la terre, appelée « électrode passive ». La dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique inhomogène dans l'espace inter électrodes qui comporte deux zones : une zone active (zone d'ionisation) et une zone de dérive (Figure II.1).

Au voisinage de l'électrode à faible rayon de courbure (zone active ou zone ionisée) le champ est suffisamment élevé, ainsi une ionisation du gaz se produit et les phénomènes d'avalanche sont limités dans l'espace par la décroissance du champ électrique. Autour de cette zone on retrouve la zone de dérive ou unipolaire où les ions du même signe que l'électrode à faible rayon de courbure dérivent jusqu'à l'autre électrode.

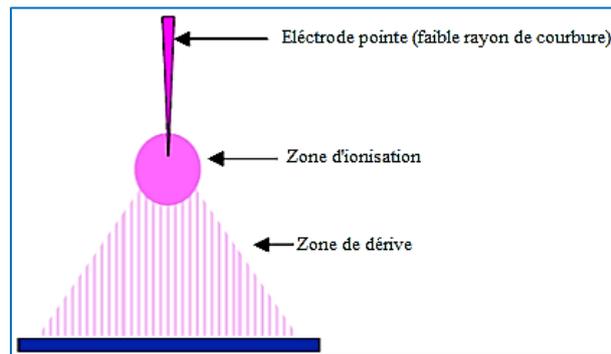


Figure II.1 : Zones d'ionisation et de dérive dans la décharge couronne.

II.4.3. Les décharges à barrière diélectrique (DBD)

Les décharges à barrière diélectrique sont appelées aussi décharges silencieuses (*Silent discharge*). Une décharge à barrière diélectrique est un plasma froid hors-équilibre thermodynamique produit à la pression atmosphérique entre deux électrodes séparées par au moins un diélectrique.

L'ajout d'un diélectrique entre les électrodes métalliques permet d'augmenter le champ électrique sans passage à l'arc. Ce plasma faiblement ionisé ($n_e = 10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) est caractérisé par une température électronique de quelques électronvolts (eV) bien supérieure à celle des espèces neutres ($\sim 300 \text{ K}$) qui sont majoritaires.

La décharge à barrière diélectrique, ou ce qu'on appelle aussi la décharge silencieuse, combine le large volume d'excitation de la *décharge glow* avec les caractéristiques hautes pressions de la couronne. Dans ce type de décharges, un diélectrique couvre au moins l'une des électrodes.

La surface entière de l'électrode devient effective pour les réactions chimiques. La DBD est initiée en chaque point du gap. Les charges ainsi cumulées sur le diélectrique forment un champ électrique qui s'oppose au champ appliqué et permet d'interrompre le courant pendant

quelques nanosecondes. La durée du pulse de courant dépend de la pression, des propriétés du gaz ainsi que de la nature du matériau diélectrique.

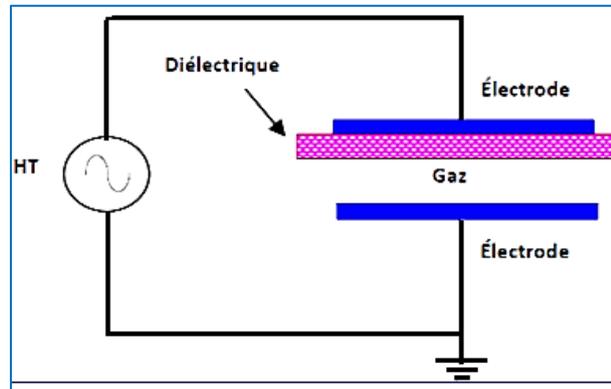


Figure II.2 : Configuration classique d'une DBD.

II.4.4. Les décharges partielles

Bien que les décharges partielles soient généralement des phénomènes de faible amplitude, elles peuvent causer une détérioration progressive menant éventuellement à la défaillance des isolations (DP).

Les décharges partielles peuvent être classées selon leur localisation dans l'isolant comme le montre la figure ci-dessous.

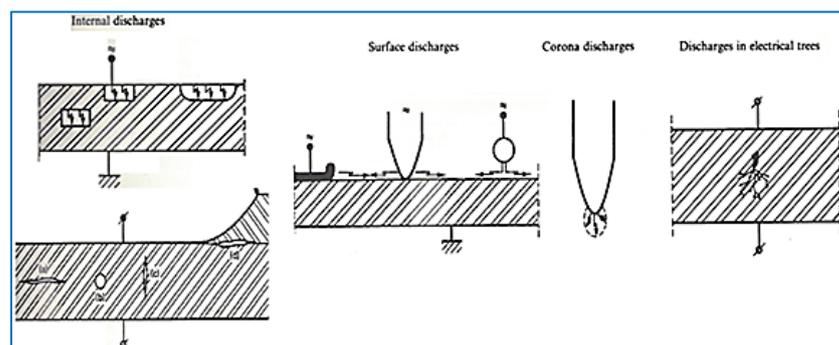


Figure II.3 : Classification des décharges partielles [7].

On distingue donc quatre types de décharges partielles :

- ☛ Les décharges internes qui se produisent au niveau des défauts internes comme les cavités où la rigidité diélectrique est moins importante dans le reste de l'isolant.

- ☛ Les décharges de surface qui surviennent sur les surfaces des isolants.
- ☛ L'arborescence qui propager prend naissance à partir d'un défaut dans l'isolant et peut se propager.
- ☛ Les décharges couronnes qui se développent dans un espace gazeux sous l'effet d'un champ électrique inhomogène entre deux électrodes asymétriques.

II.5. Caractéristiques diélectriques des matériaux solides

La fracture électrique se produit lorsque le champ électrique à l'intérieur du matériau est suffisamment fort pour accélérer les porteurs de charge libres (électrons et ions, qui sont toujours à de faibles concentrations) à une vitesse suffisamment élevée pour frapper les électrons des atomes et ioniser les atomes.

Un isolant électrique parfait a une conductance nulle et une résistance infinie, mais n'existe pas en pratique car il contient toujours une faible quantité de charges libres susceptibles de créer un courant.

II.5.1 Résistivité

L'isolation électrique est rattachée à une propriété physique du matériau utilisé, la résistivité, exprimée en ohm-mètre (symbole $\Omega \cdot m$), associée à une grandeur physique mesurable, la résistance, qui s'exprime en ohms (symbole : Ω).

Les notions de résistance et de résistivité, qui sont généralement bien définies pour les conducteurs, peuvent être extrapolées aux matériaux isolants avec toutefois des spécificités que nous allons étudier [8]. Lorsque l'on applique une tension continue à une éprouvette de matériau isolant, celui-ci n'étant pas parfait est traversé par un courant que l'on peut mesurer. Il est donc possible de déterminer une résistance.

Dans certaines conditions, on peut alors calculer une résistivité qui présente théoriquement l'avantage sur la résistance de ne pas dépendre de la géométrie de l'éprouvette et des électrodes utilisées.

Un fil métallique de section S et de longueur l est traversé par un courant I lorsqu'on lui applique une différence de potentiel V .

La résistance du fil R se déduit de la loi d'Ohm :

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{II.1})$$

La résistivité ρ du métal constituant le fil est donnée par la formule :

$$\rho = \frac{R.S}{l} \quad (\text{II.2})$$

ρ est de l'ordre du $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ pour les matériaux isolants.

Le matériau isolant doit être capable de résister à la température maximale qui peut s'élever au milieu du système électrique sans perdre sa résistance d'isolement et son diélectrique force dans une large mesure. La résistance d'isolement est la résistance aux fuites de courant à travers.

De manière générale, les résistivités dépendent de la température, de l'humidité, du champ appliqué et du temps d'application de la tension, les autres paramètres d'influence concernent les électrodes (nature et géométrie).

Dans un intervalle de température donné, la résistivité dépend de la température selon une loi du type :

$$\rho = \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{k.T}\right) \quad (\text{II.3})$$

Avec T température absolue en (K), k constante de Boltzmann ($k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$), E_A énergie d'activation (J) du mécanisme de conduction.

La résistance d'isolement de toute isolation diminue avec l'augmentation de la température. La loi générale relative à la dépendance de la résistance d'isolement à la température peut être donnée par :

$$R_t = \frac{R_0}{\alpha^{(t-t_0)}} \quad (\text{II.4})$$

Où R_t est la résistance d'isolement du matériau à une température t, R_0 est la résistance d'isolement à n'importe quelle température initiale de référence.

α est une constante du matériau isolant.

Pour influence de l'humidité, c'est sans doute le paramètre qui a la plus forte influence sur les résistivités des matériaux isolants, il s'agit surtout de la teneur en eau du matériau exprimée par exemple en pourcentage de sa teneur en eau à saturation.

En champ faible, les matériaux isolants suivent en général la loi d'Ohm, en d'autres termes, leur résistivité est indépendante du champ appliqué. En revanche, en champ fort, on constate généralement une décroissance de la résistivité lorsque le champ appliqué augmente. Cela s'explique par l'injection d'électrons aux électrodes et par la présence d'impuretés ou de défauts dans le matériau

II.5.2. Permittivité

Placé dans le vide, sous tension continue U_0 , un condensateur plan (figure II.3a) prend une charge Q_0 reliée à U_0 par une loi linéaire :

$$Q_0 = C_0 \cdot U_0 \quad (\text{II.5})$$

Sachons que C_0 est la capacité du condensateur dans le vide. Si l'on isole les armatures de la source et si on remplit le condensateur d'un matériau isolant (figure II.3b), la nouvelle différence de potentiel U qui apparaît est encore proportionnelle à Q_0 :

$$Q_0 = C \cdot U \quad (\text{II.6})$$

Avec $C > C_0$; est la capacité du condensateur rempli de diélectrique.

La permittivité relative ε_r du matériau est définie par la relation :

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (\text{II.7})$$

Avec $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$ est la permittivité absolue du diélectrique, ε_0 permittivité du vide qui est égale à $8,854 \times 10^{-12}$ F/m).

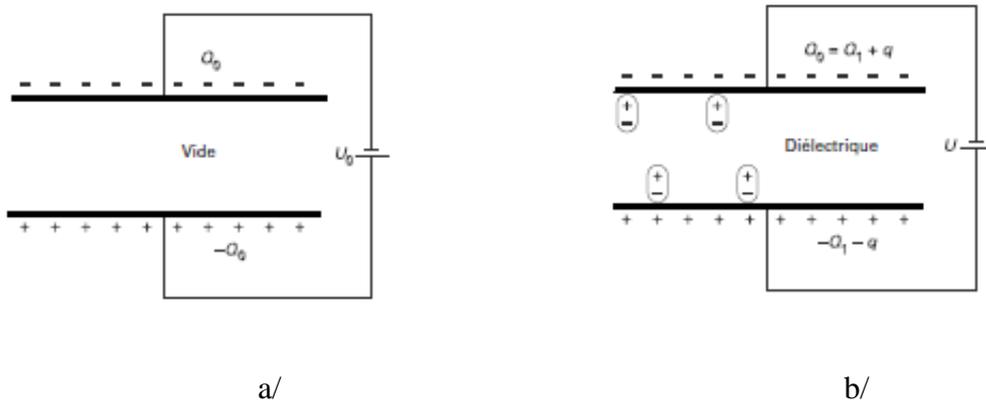


Figure II.4 : Charge d'un condensateur plan a/vide, b/rempli d'un diélectrique

L'augmentation de la capacité (à stocker des charges) C du condensateur par introduction d'un diélectrique s'explique par le mécanisme de polarisation du matériau. Sous l'influence du champ électrique appliqué, il se forme des dipôles perpendiculaires aux armatures.

Comme nous allons le voir, dans un champ électrique alternatif sinusoïdal, le courant alternatif associé à la tension est proportionnel à la capacité du condensateur.

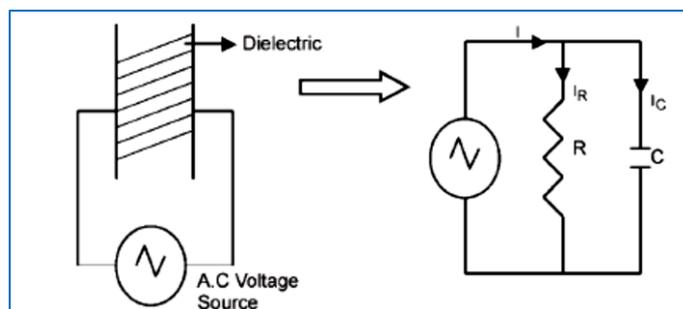


Figure II.5 : Diagramme du circuit équivalent d'un condensateur.

- I (A) Courant résultant
 I_c (A) Courant de charge
 I_p (A) Courant de pertes
 U (V) Tension appliquée
 δ Angle de pertes
 θ Angle de phase

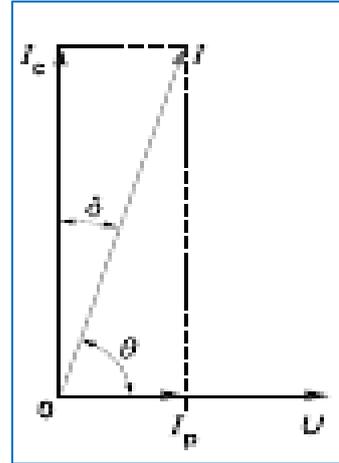


Figure II.6 : Diagramme de Fresnel pour un condensateur contenant un diélectrique réel.

Dans le diagramme de Fresnel (figure II.6), le courant alternatif complexe résultant de l'application de la tension alternative peut s'exprimer par.

$$I = \frac{U}{Z} = I_p + jI_c \quad (\text{II.8})$$

Où U est la tension complexe aux bornes du condensateur plan rempli de diélectrique

Le courant résultant ou total donc est exprimé par :

$$I = \frac{U}{Z} = I_p + jI_c = \frac{U}{R} + j\omega C.U \quad (\text{II.9})$$

Introduisons la valeur de C donnée par l'expression (II.7) et après quelques simplifications on obtient :

$$I = j\omega(\varepsilon' - j\varepsilon'').C_0.U \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Où } \varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (\text{II.11})$$

ε^* Est la permittivité complexe du matériau diélectrique.

II.5.3. Facteur de pertes diélectriques

Le facteur de dissipation diélectrique est égal au quotient du courant de perte et du courant de charge figure (II.5) :

$$\tan \delta = \frac{I_p}{I_c} = \frac{\frac{U}{R}}{j\omega.C.U} = \frac{1}{\omega.C.R} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (\text{II.12})$$

Qui est également appelé tangente de l'angle de pertes ou $\tan \delta$, δ est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée au diélectrique et le courant qui en résulte [9].

ω : Vitesse angulaire du circuit oscillant (angle parcouru par unité de temps rd/s)

C : Capacité du condensateur

R : Résistance d'isolement du diélectrique

De l'équation (II.12) on peut déduire la valeur du ε'' comme suite :

$$\varepsilon'' = \varepsilon' . \tan \delta \quad (\text{II.13})$$

ε'' est appelé indice de pertes car il caractérise l'énergie dissipée dans le diélectrique.

L'angle de pertes caractérise la qualité d'un isolant, en pratique le facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$) est varié entre 10^{-2} et 10^{-4} :

- ☞ pour un bon isolant, la résistance d'isolement R élevée et δ faible ;
- ☞ pour un mauvais isolant, la résistance R faible et δ élevé.

II.5.4. Polarisation des diélectriques

En soumettant le matériau à un champ électrique de tels dipôles peuvent être créés. S'ils existaient déjà, cela peut avoir comme effet de tous les aligner dans le même sens. D'un point de vue microscopique, on peut relier l'amplitude de l'onde au dipôle créé via la notion de polarisabilité (P).

Ce phénomène physique microscopique peut intervenir en quatre manières sont [8,10]:

- ☞ la polarisation électronique
- ☞ la polarisation ionique (ou atomique)
- ☞ la polarisation dipolaire (ou d'orientation)
- ☞ la polarisation inter faciale

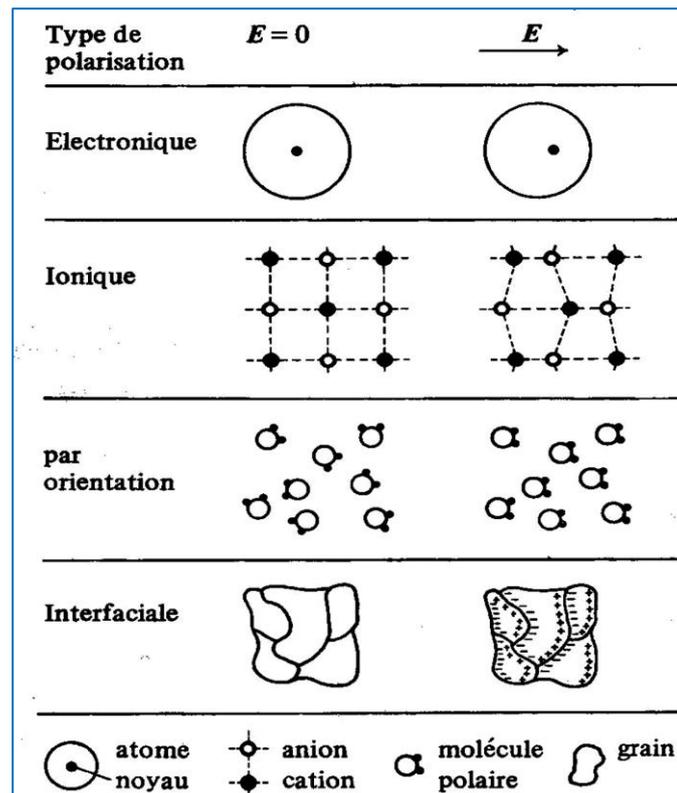


Figure II.7 : Représentation schématique des types de polarisation des diélectriques.

II.5.4.1. Polarisation électronique

Quand un champ électrique constant E est appliqué, le nuage électronique dans chaque atome est déplacé légèrement par rapport au noyau donnant un dipôle induit, ce type est toujours présent, est due au déplacement et à la déformation de chaque nuage électronique, il est observé autour des fréquences optiques ($\sim 10^{15}$ Hz).

II.5.4.2. Polarisation atomique

Cette polarisation est due aux déplacements des atomes, lorsqu'on soumet une molécule à un champ électrique, le déplacement des atomes les uns par rapport aux autres au sein de cette molécule laisse apparaître un moment dipolaire atomique. Cette dernière intervient dans la gamme des fréquences infrarouges ($\sim 10^{12}$ à 10^{13} Hz).

La polarisation atomique se superpose à la polarisation électronique et intervient pour augmenter la permittivité relative ϵ_r . Elle est 10 à 20 fois plus faible que la polarisation électronique dans les polymères.

II.5.4.3. Polarisation d'orientation(dipolaire)

Elle existe lorsque des dipôles déjà présents sont tous alignés entre eux. De plus, il faut que cette molécule puisse s'orienter dans le sens du champ. Le temps d'orientation des dipôles est beaucoup plus important que dans les deux cas précédents et correspond à des fréquences comprises entre le domaine des audiofréquences et celui des radiofréquences ($\sim 10^2$ à 10^8 Hz). La polarisation d'orientation est fortement dépendante de la température.

II.5.4.4. Polarisation interfaciale

Lorsqu'un 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.

La polarisation est souvent proportionnelle au champ électrique qui l'a créée, elle est donnée par :

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot \vec{E} \quad (\text{II.14})$$

Avec ε_0 la constante diélectrique et χ la susceptibilité électrique du matériau.

II.5.5. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc d'un court-circuit). On utilise aussi l'expression champ disruptif. La valeur maximale de la tension électrique appliquée aux bornes d'un condensateur ou entre deux électrodes remplis d'un matériau diélectrique est appelée tension de claquage du matériau diélectrique. On parle alors de **claquage** du matériau qui est parfois réversible et parfois irréversible.

$$E_c = \frac{U_c}{d} \quad (\text{II.15})$$

Où, E_c est la rigidité diélectrique et U_c la tension de claquage appliquée la distance inter électrodes ou l'épaisseur du milieu diélectrique.

II.5.6. Pertes diélectriques

À une intensité de champ électrique élevée E dans un matériau isolant solide, une forte augmentation de la conductivité est observée, ce qui doit conduire à une circulation d'un courant de fuite à l'intérieur du matériau du a une augmentation des électrons libres dans la bande de conduction.

La puissance qui détruit le diélectrique peut s'exprimer par :

$$P_{diel} = U^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta = E^2 \cdot d^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta \quad (\text{II.16})$$

Si l'intensité du champ continue à augmenter, en se rapprochant de l'intensité du champ de claquage E_c , et par conséquent la densité de courant atteint des valeurs locales élevées, qu'elle conduit à un échauffement du matériau isolant dû à l'effet Joule.

La tangente de perte diélectrique ($\tan \delta$) représente la perte de puissance complète dans un diélectrique, c'est donc un paramètre avec lequel les pertes de puissance dans un condensateur peuvent être estimées.

II.6. Conclusion

La résistivité d'un isolant varie considérablement avec la pureté et l'état de surface du matériau, le temps d'application de la tension et, dans certains cas, l'amplitude de la contrainte appliquée. Il diminue généralement rapidement lorsque la température augmente.

La polarisation et la conduction du courant dans les matériaux diélectriques induisent des pertes diélectriques. Tous les phénomènes dans les diélectriques soumis à un champ électrique dépendent de la fréquence du champ, de la température et de la structure du diélectrique.

III.1. Introduction

Les isolations des matériels sont généralement soumises aux conditions physiques et chimiques imposées par l'environnement telles que l'oxydation par l'oxygène atmosphérique ou l'humidité et le changement de la température du milieu qui affecte fortement la tenue diélectrique des matériaux employés.

III.2. Processus de claquage dans les solides

Le claquage dans un diélectrique peut provoquer la fusion, brûler ou perforer le diélectrique et les électrodes. Après un claquage, une trace du claquage sous forme de perforation, de fonte ou de brûlure sur le diélectrique peut rester et donner une forme irrégulière à l'isolant.

Si une tension est de nouveau appliquée à cet isolant, un claquage survient dans la majorité des cas, suivant le canal tracé par la décharge précédente et même à une tension inférieure. Donc un arc qui survient dans les isolants solides nécessite leur remplacement.

Bien que de nombreux investigateurs aient étudié le claquage des isolants solides pendant presque un siècle maintenant, et qu'un certain nombre de chercheurs ont proposé des théories qui ont visé à expliquer quantitativement les processus de claquage, l'état de la connaissance actuelle dans ce domaine est toujours limité.

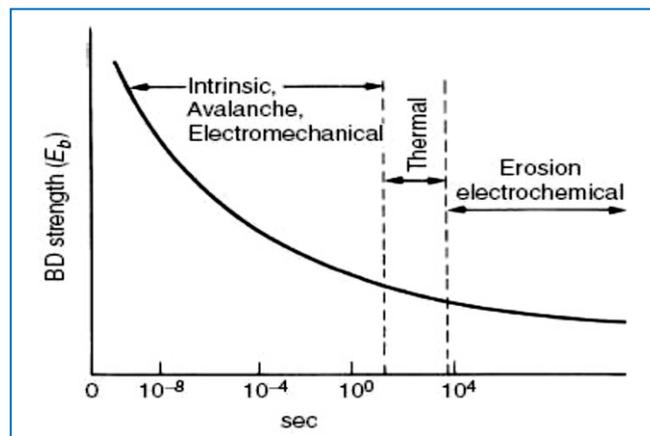


Figure III.1 : Représentation schématique des types de claquage des isolants solides.

En pratique, le mécanisme de claquage et la rigidité diélectrique changent avec la durée d'application de la tension. Il est d'usage de classer les mécanismes de claquage suivant la durée d'application de la tension comme montré à la figure ci-dessous :

III.2.1. Claquage intrinsèque

Ce type de claquage, appelé quelquefois « claquage électrique pur » pour le distinguer des autres type de calquage où le champ E intervient, n'est autre que la destruction de l'isolant sous l'action des forces électriques. Les processus secondaires (échauffement, réactions chimiques, etc...) qui peuvent intervenir et facilitent le claquage ne sont pas considérés dans le « claquage électrique pur ».

Le « claquage électrique pur » se produit sous l'action des collisions des électrons et ions accélérés par le champ électrique avec les particules de l'isolant.

Le claquage intrinsèque est accompli en une durée de formation de l'ordre de 10^{-8} s et on admet que le claquage est de nature électronique. Les valeurs de champ électrique nécessaires pour provoquer un claquage intrinsèque pur dépassent 106 V/cm.

On admet généralement que la valeur critique de claquage est atteinte lorsque les électrons de l'isolant acquièrent une énergie suffisante de la part du champ appliqué pour passer de la bande de valence à la bande de conduction.

III.2.2. Claquage électronique ou avalanche

La présence d'un électron dans le matériau induit une ionisation par collision (sous l'effet du champ électrique) qui entraînera la rupture diélectrique du matériau. L'énergie d'ionisation des atomes peut atteindre 5 à 10 eV.

Dans certaines conditions contrôlées dans les champs uniformes seulement avec les électrodes incorporées dans l'isolant, le claquage peut être accompli après le passage d'une avalanche simple, semblable à l'avalanche dans les gaz.

Quelquefois le libre parcours moyen peut être assez long pour que l'énergie cinétique acquise excède l'énergie d'ionisation qui se termine par la libération d'un électron. Le processus se répète et peut mener à la formation d'une avalanche électronique semblable aux gaz.

Le claquage se produit si l'avalanche dépasse une certaine taille critique. Pour produire une avalanche il faut qu'un nombre suffisant d'électrons soit produit, chaque ionisation produit 2 électrons, une avalanche de m générations produit 2^m électrons.

III.2.2.1. Développement d'une avalanche électronique

On a un électron primaire créé par ionisation grâce à des agents naturels tels que les rayonnements cosmiques et la radioactivité de la terre.

Lorsque le champ électrique a l'intérieure du matériau isolant suffisamment important pour accélérer l'électron primaire jusqu'à point ou lorsqu'il percute des atomes ils libèrent d'autres électrons et des ions puis le nombre d'électrons augmente rapidement puis que les nouveaux électrons répètent cette action à nouveau d'autre. Jusqu'à ce que l'avalanche qui arrive à l'anode.

III.2.3. Claquage électromécanique

Le claquage électromécanique est dû à l'apparition d'une force électrostatique de compression impliquant une diminution de l'épaisseur du matériau. Cette force électrostatique est générée par l'attraction mutuelle des électrodes, phénomène facilité par une perte de la rigidité mécanique du matériau consécutive à une élévation de température. Le champ électrique appliqué sur celui-ci devient plus important (puisque l'épaisseur est plus faible pour une même tension appliquée sur l'échantillon).

Les substances qui peuvent sensiblement se déformer sans rupture peuvent éclater quand les forces électrostatiques de compression appliquées sur l'isolant en essai excèdent sa résistance mécanique à la pression.

Les forces de compression résultent de l'attraction électrostatique entre les charges externes qui apparaissent quand la tension est appliquée.

Les isolants solides pourraient rompre sous l'effet des forces de compression électrostatiques dues aux charges superficielles.

D'après Stark et Garton, si l'épaisseur initiale " d_0 " d'un diélectrique décroît jusqu'à une épaisseur " d " sous une tension U , la contrainte de compression due au champ égalé à la rigidité de compression mécanique donne le résultat suivant, Y étant le module de Young du matériau :

$$\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{V^2}{2 \cdot d^2} = Y \cdot \ln \frac{d_0}{d} \quad (\text{III.1})$$

La valeur maximale, U_{max} de la tension, est obtenue pour :

$$\frac{d}{d_0} = e^{0.5} \approx 0.6 \quad (\text{III.2})$$

En régime stable, si $U \geq U_{max}$, on obtient la rupture. Le champ électrique correspondant s'exprimera par la formule suivante :

$$E = \frac{V}{d} = 0.6 \cdot \sqrt{\frac{Y}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}} \quad (\text{III.3})$$

III.2.4. Claquage par décharge partielle (arborescences électriques)

L'arborescence est un phénomène de pré claquage électrique, qui se présente sous forme d'arbre et dont le développement est favorisé par la présence de défauts, ou d'impuretés au sein du matériau. L'arborescence peut être révélatrice d'un stade relativement avancé de la dégradation du matériau, et reste considérée comme un phénomène précurseur de la rupture.

Les arborescences sont classées en deux principales catégories :

- ☛ les arborescences électriques
- ☛ les arborescences d'eau.

Ces arborescences sont surtout provoquées par les décharges apparaissant aux bords des électrodes, où le matériau isolant solide est en contact avec un autre matériau de permittivité différente généralement très faible ou équivalente à celle du (liquide ou gaz).

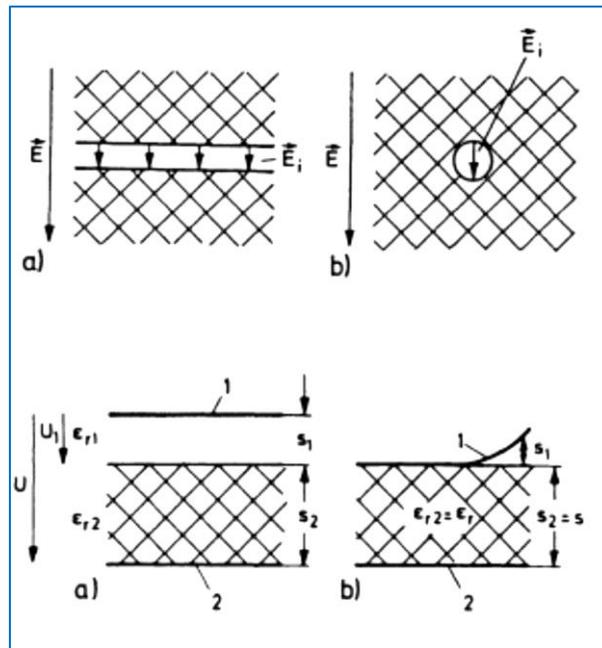


Figure III.2 : Représentation d’une cavité à l’intérieur d’un diélectrique

Une configuration courante dans la technique des systèmes d’isolation est la présence d’une cavité gazeuse ou impureté de faible permittivité électrique dans un diélectrique soumis entre deux électrodes planes, la tension correspond au champ à l’intérieur du diélectrique c’est à dire le champ électrique agissant sur le diélectrique 1 (cavité) peut s’exprimer et après quelques simplification par :

$$U_1 = \frac{U \cdot \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} \right)}{\epsilon_{r1} \cdot \left[\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \right]} \quad (III.4)$$

Avec U_1 est la tension de la cavité diélectrique 1, U la tension totale appliquée sur le matériau diélectrique de permittivité ϵ_2 .

$$\text{Où ; } U_1 = E_1 \cdot d_1 \quad (III.5)$$

Quand d_1 diminue, le champ E_1 augmente peut atteindre des niveaux relativement grands (environ 10MV/cm) qui risquent de dépasser la valeur correspondant à la rigidité

intrinsèque du matériau. Nous aurons dans ce cas une rupture locale suivie de la formation de plusieurs canaux en branches conduisant à la rupture totale du matériau diélectrique comme le montre la figure (III.3)[13].

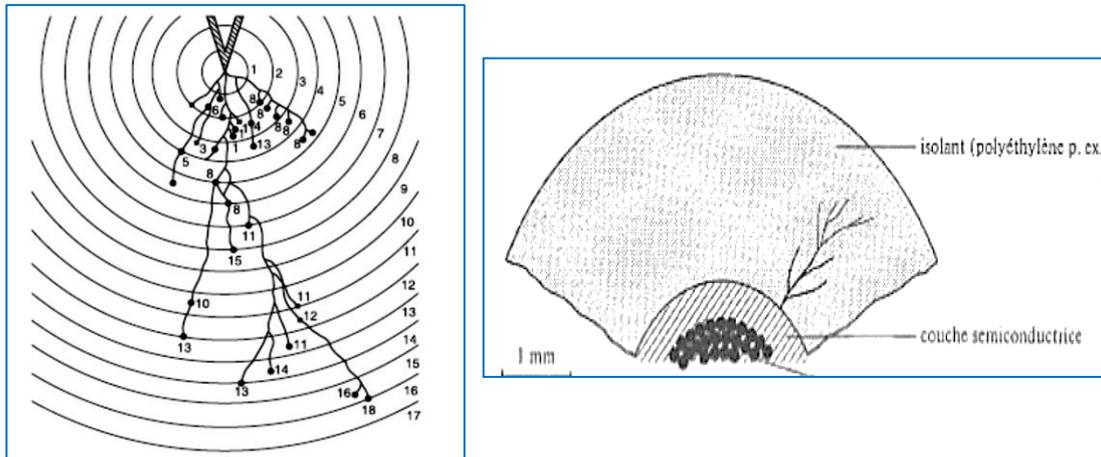


Figure III.3 : Représentation d'une arborescence dans un diélectrique solide[13].

Les arborescences sont des compositions filamenteuses ramifiées constituées de micro canaux creux sous forme d'arbre susceptibles de se disperser sur des distances de plusieurs millimètres en volume et en surface d'isolants.

III.3. Vieillissement thermique

Le vieillissement thermique dépend de la structure du diélectrique. La dégradation du matériau est activée par la présence d'oxygène. D'après J.Fabre, les principaux processus de vieillissement thermique sont :

- ☛ la rupture des chaînes multimoléculaires, accompagnée par une dégradation des propriétés électriques et mécaniques,
- ☛ le dégagement de gaz à faible poids moléculaire,
- ☛ l'oxydation conduisant à l'apparition d'acides carboxyliques.

III.3.1. Effet de la température

La température est un facteur qui a une importance non négligeable pour tous les types de matériaux et un de ceux qui changent le plus dans les phases de contrôles industriels.

La grande diversité des matériaux utilisés comme isolants solides ne permet pas de dégager une loi générale sur leurs comportements en température.

Partons de l'équation ci-dessous, pour montrer que la durée de vie d'un matériau diélectrique est inversement proportionnelle à la température sur laquelle est exposé le matériau isolant [12]:

$$t = A.e^{B/T} \quad (\text{III.6})$$

La durée de vie "t" est définie par l'expression (III.6), avec : A et B constantes relatives au type de matériau isolant.

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 déclencher une destruction thermique, c'est ce qu'on appelle le claquage thermique.

III.3.2. Bilan énergétique

Ce mécanisme fondamental de claquage thermique a été décrit quantitativement pour la première fois en 1922 par K. W. Wagner, le bilan énergétique de ce processus est écrit par [9] :

$$\rho.C. \frac{dT}{dt} = \sigma.E^2 - \Phi \quad (\text{III.7})$$

Avec ;

$\sigma.E^2$; C'est l'énergie produite par effet joule.

Φ ; L'énergie dissipée vers le milieu extérieur (évacuée).

$\rho.C. \frac{dT}{dt}$; La chaleur stockée dans le matériau solide.

σ ; Conductivité électrique du matériau.

E ; Champ électrique appliqué au matériau solide.

C , ρ , sont respectivement la chaleur spécifique et la masse volumique du matériau.

$\frac{dT}{dt}$; Variation de la température en fonction du temps.

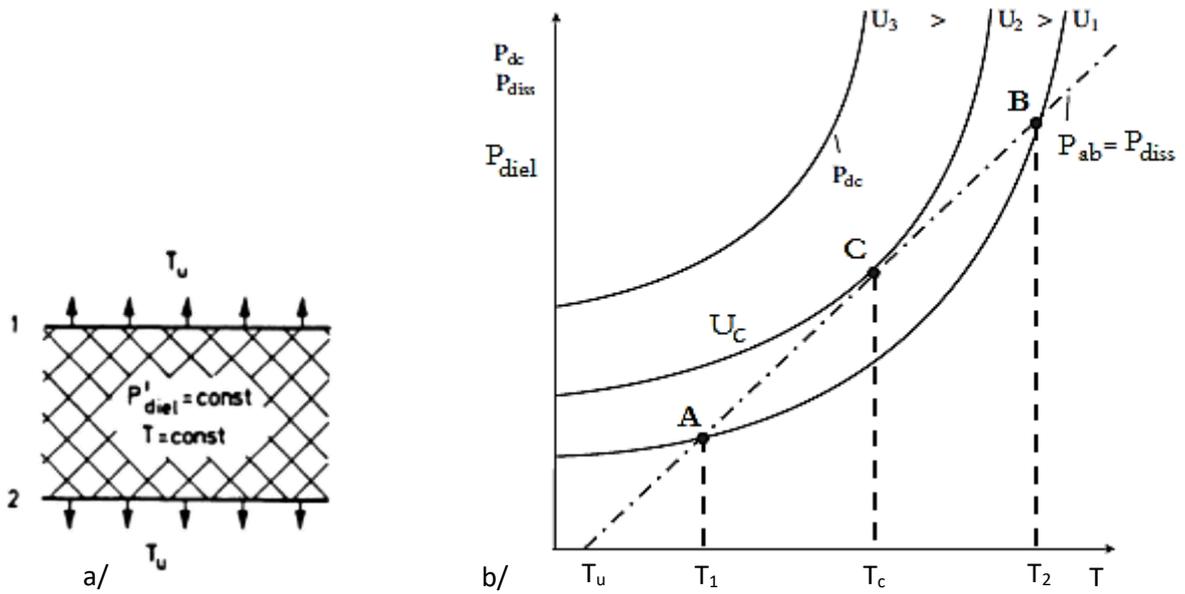


Figure III.4 : Modèle pour l'explication qualitative de la dégradation thermique.

a) configuration

b) caractéristiques

Lors de l'application d'une tension alternative, la perte de puissance réelle dans un volume de diélectrique V dans le champ uniforme E est donnée par l'équation (III.8).

$$P'_{diel} = E^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta \quad (III.8)$$

Le facteur de perte $\epsilon_r \tan \delta$ est une mesure sans dimension de la grandeur de la perte diélectrique d'un matériau isolant et sa valeur est de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-1} .

Pour le champ en courant continu, on obtient :

$$P'_{diel} = E^2 \cdot k \quad (III.9)$$

Dans les deux cas, et pour la dépendance à la température T , on peut choisir la même hypothèse.

$$P'_{diel} = E^2 \cdot p(T) \quad (III.10)$$

Ici nous avons ; pour la tension alternative, que la perte diélectrique en fonction de température peut s'écrire ;

$$p(T) = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta \quad (III.11)$$

Et pour la tension continue ;

$$p(T) = k \quad (III.12)$$

Et pour la dépendance à la température, l'expression suivante décrit la variation de la perte diélectrique en fonction de la température :

$$p(T) = p_0 \cdot e^{\sigma(T - T_0)} \quad (III.13)$$

Où T_0 et p_0 sont des quantités de référence, et σ ; est l'augmentation des pertes, cette relation doit être la base des considérations suivantes. Bien on peut se basant sur le modèle suivant pour décrire la dégradation thermique.

Dans un premier temps, la configuration simple comme le montre la figure III.4 a doit être considérée, dans le diélectrique, dont la température T et les pertes diélectriques spécifiques P_{diel} doivent être considérées localement constantes. Lorsque il y aura une conduction thermique via les électrodes I et 2 avec la puissance de refroidissement (dissipation) P_{ab} qui doit être proportionnel à la différence de température réelle et ambiante T_u :

$$P_{ab} \propto (T - T_u) \quad (III.14)$$

Un point de fonctionnement stable doit satisfaire aux conditions suivantes ;

$$P_{ab} = P_{diel} ; \text{ Comme condition préalable aux conditions statiques.}$$

$$\frac{dP_{ab}}{dT} \succ \frac{dP_{diel}}{dT} ; \text{ Comme condition préalable à la stabilité.}$$

Un claquage thermique s'installe s'il n'existe aucun point de fonctionnement stable (d'intersection stable) pour les courbes de puissance produite et dissipée. Il est clair que seul le point d'intersection (A) peut-être un point de fonctionnement stable, alors que (B) est instable.

En augmentant T_u , ou en augmentant la tension U appliquée, les points (A) et (B), peuvent enfin coïncider en (C). la tension alors correspondante est désignée par la tension critique U_c ; c'est la tension de claquage thermique.

Pour une étude qualitative selon le modèle utilisé comme le montre la figure III.4-a, la température à l'intérieur du diélectrique est supposée constante. Mais pour une analyse quantitative des performances de claquage, cependant, la distribution de température dans le matériau isolant doit être prise en compte.

Donc on met un matériau isolant solide entre deux électrodes 1 et 2 et on suppose que la température des extrémités du matériau est constante T_u et le champ électrique appliqué est homogène comme indique la figure III.5.

En plus la conductivité thermique λ du matériau isolant est supposée constante et uniquement dans la direction x , avec une température maximale T_m à $x = 0$, cependant les conditions aux limites sont [10].

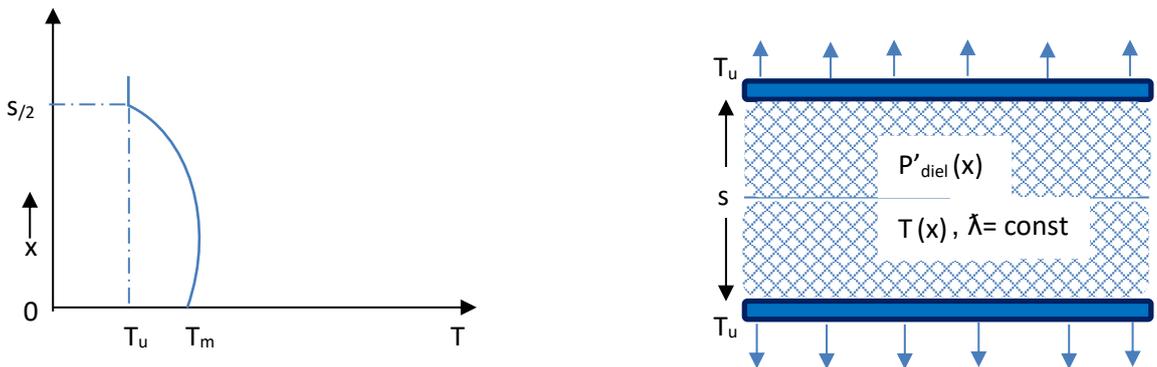


Figure III.5 : Schéma du modèle utilisé pour la détermination de tension critique de claquage thermique global.

$$\begin{aligned}
 x = 0; T = T_m \text{ et } \frac{dT}{dx} &= 0 \\
 x = \frac{s}{2}; T &= T_u
 \end{aligned}
 \tag{III.15}$$

Dans le cas statique, pour chaque élément de volume, la puissance évacuée par la conduction doit être exprimée par :

$$P'_{ab} = -\text{div } \lambda \text{ grad } T \tag{III.16}$$

Cette dernière expression doit être égale à la puissance produite à l'intérieur du diélectrique P'_{diel} .

Pour le problème unidimensionnel que nous avons, en utilisant les quantités introduites sous, l'équation différentielle suivante

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + E^2 \cdot P_0 \cdot e^{\sigma(T-T_0)} = 0 \tag{III.17}$$

Pour résoudre, nous faisons $\frac{dT}{dx}$, et nous obtenons ainsi l'expression suivante :

$$\lambda \frac{d}{dx} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{dT}{dx} \right)^2 \right] + E^2 \cdot P_0 \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{\sigma} e^{\sigma(T-T_0)} \right) = 0 \tag{III.18}$$

La constante de l'intégration de $x = 0$ à x est obtenue à partir des conditions aux limites et nous avons ainsi :

$$\frac{\lambda}{2} \cdot \left(\frac{dT}{dx} \right)^2 + \frac{E^2 \cdot P_0}{\sigma} \left(e^{\sigma(T-T_0)} - e^{\sigma(T_m-T_0)} \right) = 0 \tag{III.19}$$

La séparation des variables conduit à l'intégrale :

$$\int_{T_m}^{T_u} \frac{dT}{\sqrt{1 - e^{\sigma(T-T_m)}}} = E \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_0}{\lambda \cdot \sigma}} \cdot e^{\frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot (T_m - T_0)} \cdot \int_0^{\frac{s}{2}} dx \tag{III.20}$$

III.3.3. Détermination de la température maximale

Faisons maintenant l'intégrale du côté gauche et en remplaçant $U=E.S$ (tel que S distance); On obtient finalement la relation entre la tension et la température maximale

$$U = 2 \cdot \sqrt{\frac{2\lambda}{P_0 \cdot \sigma}} \cdot \frac{\cosh^{-1} \left(e^{\frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot (T_m - T_u)} \right)}{e^{\frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot (T_m - T_u)}} \quad (\text{III.21})$$

Pour une analyse plus approfondie, l'équation ci-dessus doit être écrite sous la forme suivante:

$$U = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{P_0 \cdot \sigma \cdot e^{\sigma \cdot (T_m - T_u)}}} \cdot f(\sigma \cdot \Delta T_m) \quad (\text{III.22})$$

$$\text{Avec ; } \Delta T_m = T_m - T_u \quad (\text{III.23})$$

Une solution physiquement significative nécessite apparemment qu'avec l'augmentation de la tension U à une valeur plus élevée de la température maximale T_m , mais cette condition n'est plus satisfaite dans la région à droite du maximum, la valeur la plus élevée de 0,663 se produit à $\sigma \Delta T_m \approx 1.2$ et correspond à la tension critique U_c du claquage thermique[14].

Pour cela nous obtenons :

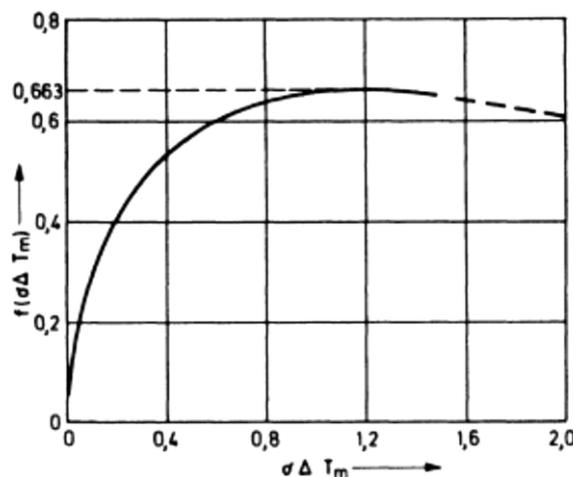


Figure III.6 : Fonction pour le calcul de la Tension critique.

$$U_C = 1,875 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{P_0 \cdot \sigma \cdot e^{\sigma(T_u - T_0)}}} \quad (\text{III.24})$$

Avec ; $p_0 = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta_0$

Dans le cas du courant de refroidissement sur un seul côté du diélectrique met entre les deux électrodes et lors de l'intégration de $x = 0$ à $x = s$, la moitié de la valeur de U_c est obtenue.

La tension critique ne dépend pas de l'épaisseur du diélectrique S , mais pour une température ambiante donnée, uniquement de propriétés du matériau diélectrique. Pour les isolants en haute tension usuels, des valeurs dans la plage de 50kV à 500kV sont obtenus à 50Hz ; lorsque la température ambiante augmente, U_c diminue rapidement.

III.4. Conclusion

Le vieillissement du matériau diélectrique dépend de beaucoup de facteurs comme la température, l'intensité du champ électrique et la contamination ou bien le non pureté du diélectrique.

Dans les matériaux isolants solides, des pertes diélectriques P se produisent à cause de plusieurs phénomènes tel que, la conduction, la polarisation et les pertes par ionisation. Ces pertes augmentent la température du diélectrique et favorise ainsi leur destruction.

Conclusion générale

Conclusion générale

La rupture diélectrique des solides est un phénomène destructif qui modifie, de façon irréversible, la structure du matériau. Il existe un champ maximal que peut supporter un matériau diélectrique. Au-delà de ce champ, le matériau ne peut plus contenir les charges électriques sur ses électrodes et devient brusquement conducteur.

Les phénomènes de décharges et de claquage peuvent être de différents types, tant dans leur déroulement que dans leur nature et leurs formes.

La tenue diélectrique des isolants solides est influencée par plusieurs facteurs électriques, physiques et d'environnement. Donc tous ces facteurs peuvent causer des phénomènes de conceptions dans les gaz et dans les solides qui peuvent menacer et réduire la performance électrique des matériaux diélectriques.

Dans les matériaux isolants, des pertes diélectriques P diélectrique se produisent qui comprennent la conduction, la polarisation et les pertes par ionisation. Ces pertes augmentent la température du diélectrique et sont eux-mêmes dépendant de la température.

La durée de vie de l'isolation est définie par le temps, après lequel les propriétés de l'isolant sont modifiées jusqu'à un niveau défini.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] K. Dieter, K. Hermann., «High –Voltage Insulation Technology», textbook for electro.Engineers, Transl. from the German by Y. Narayana Rao. -Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1985.
- [2] Abdelouahab Mekhaldi , "Étude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz" Thèse de doctorat d'État en Génie Électrique, École National Polytechnique Alger 199.
- [3] J P Detrie et P, Barrault, "La pollution atmosphérique" Dunod Paris, France, 1969.
- [4] N. Boukhdena, L.Bourebia, I. Arki, " Les isolants en haute tension - caractéristiques et contraintes-", mémoire de licence en électrotechnique, université 8 mai 1945-Guelma, 2021.
- [5] A. Bekhti, R. Badriane, " Impact des décharges électriques dans les isolateurs sur la tension du réseau électrique", mémoire de licence en protection des réseaux électriques, université 8 mai 1945-Guelma, 2020.
- [6] J.S.T. Looms, " Insulators for high voltages", Published by The Institution of Engineering and Technology, London, 1990.
- [7] F.Mebarki, "Caractérisation des propriétés diélectriques de matériaux composites à base de polyéthylène téréphtalate recyclé ", mémoire de maîtrise en génie mécanique, Montréal, 2012.
- [8] N. Azzi, M. Bouksil, " Effet du Vieillissement thermique sur la rigidité diélectrique du polyméthacrylate de méthyle (PMMA)", mémoire d'ingénieur d'état en Électrotechnique, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2008.
- [9] N. Lellouche, T. Khan, "Caractérisation électrique des matériaux isolants soumis à une décharge électrique", mémoire de master en électrotechnique, université 8 mai 1945-Guelma, 2020.
- [10] T. K. Basak, "Electrical engineering materials", British library cataloguing in publication data, New Academic Science Limited ,Tunbridge Wells, UK, 2012.
- [11] L. Leghrib, "Contribution à l'étude de l'effet de la température sur le transport des charges et le claquage diélectrique dans les isolants solides", mémoire de magister en physique des

matériaux électrotechnique, université des sciences et de la technologie «houari Boumediene», Alger, 2011.

[12] A. Boubakeur," Vieillissement du PRC, Claquage des isolants solides", document, Ecole Nationale Polytechnique.

[13] C.L. Wadhwa, «high voltage engineering», faculty of technology, university of Delhi, 2007.

[14] H. Miller, «An introduction to high voltage experimental technique», textbook for electro engineers, - 1. cd. - Braunschweig: Vieweg, 1978.