

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..... /2020



MEMOIRE

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

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Réseaux électriques

Par: LELLOUCHE Nadir et KHAN Taqiyeddine

Thème

**Caractérisation électrique des matériaux isolants soumis à
une décharge électrique**

Soutenu publiquement, le 03 Octobre 2020, devant le jury composé de:

M. LEMZADMI Ahcène	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. BELOUCIF Faissel	MCB	Univ. Guelma	Encadreur
M. BOUDEFEL Amar	MCA	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire: 2019/2020

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A Ma Très Chère Mère :

La plus douce et la plus merveilleuse de toutes les mamans. Sans toi, je ne suis rien J'implore DIEU qu'il te procure santé et qu'il m'aide à te compenser tous les malheurs passés. Pour que plus jamais le chagrin ne pénètre ton cœur, car j'aurais encore besoin de ton amour.

A Mon Très Cher Père :

A celui qui m'a aidé à découvrir le `savoir' le trésor inépuisable.

Tu as su m'entourer d'attention, m'inculquer les valeurs nobles de la vie, m'apprendre le sens du travail, de l'honnêteté et de la responsabilité.

A Mes beaux Frères ; A Mes belles sœurs.

A toutes mes familles.

A Mes Grands Amis Et Collègues.

...Merci a tous

TAQIYEDDINE ET NADIR

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout d'abord Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Dr. Beloucif faïssel pour ses précieux conseils et son aide.

Enfin, nous tenons également à remercier tous les personnels enseignants de département de Génie électrotechnique et Automatique qui nous ont permis d'acquérir beaucoup de connaissance dans le domaine d'électrotechnique et spécialement le chef du département Dr. MENDACI Sofiane et l'adjoint chef de département Dr. BELOUCIF Faïssel.

Résumé :

Dans le présent travail, nous abordons une problématique essentielle liée aux propriétés Diélectriques des matériaux isolants soumis à des champs très intenses.

La rupture diélectrique des isolants est à l'origine de nombreuses pannes auxquelles les utilisateurs de matériels électriques sont confrontés.

La tenue diélectrique des isolants 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.

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

Donc l'amélioration des connaissances sur la performance des matériaux isolants sous l'existence des plusieurs phénomènes est nécessaires et elle doit être obtenu par la caractérisation électrique de ces derniers en présence des décharges électriques, afin d'augmenter leur propriétés diélectriques pour assurer une continuité den bonne qualité de l'énergie électrique.

Mots-clés : isolants, conceptions, décharges, claquage.

Abstract :

The present work sheds light on an essential problem related to the dielectric properties of insulating materials that are subject to very intense fields. The dielectric breakage of the insulators is caused by a number of breakdowns which the users of the electrical equipment are confronted with.

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

The phenomena of discharges and breakdown can be of different types, both in their unfolding only in their nature and their forms.

Therefore the improvement of knowledge on the performance of insulating materials under the existence of several phenomena is necessary and it must be obtained by the electrical characterization of these in the presence of electric discharges, in order to increase their dielectric properties to ensure continuity in good quality of electric power.

Keywords: insulators , conduction, discharges, breakdown.

ملخص :

في هذا العمل تطرقنا أساسا إلى مشكلة أساسية تتعلق بخصائص العزل الكهربائي للمواد العازلة الخاضعة لمجال حقل كهربائي جد عالي . إن انهيار العوازل هو أصل العديد من العطب التي يواجهها مستخدمو المعدات الكهربائية. كما أن المصنعين الكهربائيين و الالكترونيين يبحثون باستمرار عن تقنيات جديدة لضمان تشغيل أفضل لمنتجاتهم.

تتأثر القوة العازلة للعوازل بعدة عوامل كهربائية المادية و البيئية ، لذلك كلها يمكن أن تسبب ظواهر التوصيل في العوازل الغازية و الصلبة التي يمكن أن تقلل من خصائصها .
يمكن أن تكون ظاهرة التفريغ و الانهيار بأنواع مختلفة حسب طبيعتها أو شكلها .
لذلك فإن تحسين المعرفة بأداء المواد العازلة في ظل وجود عدة ظواهر أمر ضروري و يجب الحصول عليه من خلال الخصائص الكهربائية لهذه المواد في وجود التفريغ الكهربائي من أجل زيادة خواصها العازلة لضمان الاستمرارية ذات نوعية جيدة من الطاقة الكهربائية.

كلمات البحث : عوازل . توصيلات . تفريغ . انفصال .

Sommaire

Dédicace	
Remerciements	
Liste des figures	
Introduction générale	- 13 -
CHAPITRE I: Matériaux utilisés dans les systèmes des isolations électriques	- 15 -
1. Introduction.....	- 16 -
2. Nécessité de la haute tension.....	- 16 -
3. Évolution et niveaux des tensions normalisées.....	- 17 -
4. Moyen de transport de grande puissance.....	- 18 -
4.1. Ligne électrique en haute tension.....	- 18 -
4.2. Composants d'une ligne à haute tension	-18-
4.3. Types des conducteurs en hautes tensions.....	-18-
4.4. Supports.. ..	- 20-
4.5. Câbles de garde.....	- 21 -
4.6. Isolateur.....	- 22 -
5. Classification des matériaux diélectriques utilisé dans les systèmes électrique.....	- 22 -
5.1. Différents types des Isolants solides.....	- 22 -
5.1.1. Isolants naturels.....	- 22-
5.1.2. Isolants synthétiques.....	- 24 -
5.2. Différents types des isolants gazeux.....	- 25 -
5.3. Différents types des isolants liquides.....	- 26 -
5.3.1. Huiles minérales.....	- 26-
5.3.2. Huiles synthétiques.....	- 26 -

6	Caractéristique des matériaux isolants	- 27 -
6.1.	Résistivité.....	- 27 -
6.2.	Permittivité.....	- 27 -
6.3.	Rigidité diélectrique.....	- 27 -
6.4.	Calcul de l'angle de perte diélectrique.....	- 28 -
7.	Conclusion.....	- 29 -
	CHAPITRE II: Processus de développement des décharges électriques.....	- 30 -
1.	Introduction.....	- 31 -
2.	Champ électrique élevé.....	- 31 -
3.	Phénomène d'ionisation et de conduction dans les gaz.....	- 32 -
3.1.	Changement du comportement du gaz.....	- 32 -
3.2.	Ionisation du gaz.....	- 32 -
3.2.1.	Ionisation par collision.....	- 32 -
3.2.2.	Photo ionisation.....	- 33 -
3.2.3.	Ionisation thermique.....	- 33 -
3.2.4.	Ionisation par interaction avec les métastables.....	- 34 -
3.2.5.	Attachement et détachement d'électrons.....	- 34 -
3.2.6.	Processus inverse d'ionisation	- 34 -
3.3.	Conduction dans les gaz.....	- 35 -
3.3.1.	Vitesse d'ionisation.....	- 35 -
3.3.2.	Modélisation de conduction du courant.....	- 36 -
3.3.2.1.	Émission photo électronique.....	- 36 -
3.3.2.2.	Émission des ions positifs et négatifs.....	- 39 -
3.3.2.3.	Émission thermo-ionique.....	- 39 -
4.	Conduction électrique dans les solides.....	- 40 -
4.1.	Bandes d'énergie	- 40 -
4.2.	Polarisation du solide.....	- 41 -

4.3. Conduction dans les solides.....	- 42 -
4.3.1. Conduction ohmique.....	- 42 -
4.3.2. Conduction électronique.....	- 42 -
4.3.3. Conduction ionique.....	- 43 -
5. Conclusion.....	- 44 -
CHAPITRE III: Effet des décharges électriques sur les propriétés diélectriques des matériaux isolants.....	-45-
1. Introduction.....	- 46 -
2. Rigidité diélectrique.....	- 46 -
3. Processus de Claquage dans les gaz isolants.....	-47 -
3.1. L'avalanche électronique.....	- 47 -
3.2. Différents régimes de décharges électriques.....	- 47 -
3.3. Claquage de type Townsend.....	- 49 -
3.3.1. Première phase	- 49 -
3.3.2. Deuxième phase.....	- 50 -
3.3.3. Détermination de tension de claquage du gaz	- 52 -
4. Claquage des isolants solides.....	- 54 -
4.1. Différents Mécanismes de claquage dans les isolants solides.....	- 54 -
4.1.1. Claquage intrinsèque.....	- 55 -
4.1.2. Claquage électronique ou avalanche.....	- 56 -
4.1.3. Claquage thermique.....	- 56 -
4.1.4. Claquage électromécanique.....	- 62 -
4.1.5. Claquage par décharge partielle (arborescences électriques).....	- 63 -
5. Paramètres influent sur la dégradation.....	- 65 -
5.1. Forme des électrodes.....	- 65 -
5.2. Homogénéité du champ appliquée.....	- 65 -
5.3. Nature de tension.....	- 65 -

5.4. Influence de la température	- 65 -
5.5. Influence de la pression.....	- 66-
5.6. Influence des impuretés.....	- 66-
5.7. Influence d'autres paramètres.....	- 66 -
6. Conclusion.....	- 66-
Conclusion générale.....	- 69 -
Références bibliographiques.....	- 71 -

Liste des figures

Figure I.1 : Chronologie de l'évolution de la tension et leur installation... ..	17
Figure I.2 : Niveaux de tension normalisés.....	18
Figure I.3 : Conducteur conventionnel sur la gauche et à âme en fibre composite à droite, l'âme au centre assure les propriétés mécaniques, l'aluminium à l'extérieur les propriétés électriques du conducteur	19
Figure I.4 : Conducteurs en faisceau.....	20
Figure I.5 : Types usuels de pylônes en treillis pour lignes à deux ou plusieurs ternes.....	21
Figure I.6 : Pylônes électrique de type chat	21
Figure I.7 : Isolateur En Verre De Ligne Electrique	22
Figure I.8 : Isolateur Electrique En Céramique Destiné Aux Lignes Electrique	23
Figure I.9 : Câble 12 KV A Isolation De Caoutchouc De Type XLPE	24
Figure I.10 : l'angle de perte diélectrique	28
Figure II.1: Champ entre deux points de potentiels différents.....	31
Figure II.2 : a)Emission photo-électronique de la cathode. b) Emission photo-électronique du volume du gaz	36
Figure II.3 : Variation de densité du courant en fonction du champ... ..	38
Figure II.4 : Diagramme représentatif des bandes d'énergie.....	41
Figure III.1 : Schéma de base de claquage d'un isolant.	46
Figure III.2 : Représentation schématique d'une avalanche électronique	47
Figure III.3 : Caractéristique courant-tension pour différents régimes de décharges.....	48
Figure III.4 : Courbes de Paschen pour l'air ; a/ pour $p= 1$ bar et b/ pour $p=6$ bar	53
Figure III.5 : Différents types de claquage des isolants solides.....	55
Figure III.6 : Modèle pour l'explication qualitative de la dégradation thermique	57

Figure III.7 : Schéma du modèle utilisé pour la détermination de tension critique de claquage thermique global.....	60
Figure III.8 : Fonction pour le calcul de la Tension critique	62
Figure III.9 : Effet de la décharge partielle.....	63
Figure III.10 : Phénomène d'arborescence.....	64
Figure III.11 : Claquage d'un isolant solide «claquage dans le plexiglas entre deux électrodes pointe-plan ».....	64

Introduction Générale

Introduction générale

Le progrès technologique caractérisant le 20ème siècle a demandé l'augmentation de la puissance électrique fournie (la première ligne HT supérieure à 100kV a été réalisée en 1912, en Allemagne et en 1985, au Japon, une ligne de 1200kV a été construite).

Le développement des réseaux électriques a constitué la première utilisation, à grande échelle, des hautes tensions. Les centrales de production d'énergie électrique sont fréquemment situées à de grandes distances de lieux de consommation.

Cela a influencé l'évolution de l'appareillage à haute tension et a nécessité la construction d'appareillage qui peut gérer des tensions et des courants de plus en plus élevés.

Les isolateurs sont parmi les composants les plus importants des réseaux aériens de transport et de distribution de l'énergie électrique puisqu'ils assurent à la fois le support mécanique des parties portées à la haute tension et l'isolation électrique.

Le but poursuivi est de présenter les phénomènes physiques fondamentaux de principales formes du passage du courant électrique dans les diélectriques. Dans le désir d'approfondir nos connaissances sur le comportement de ces isolants en haute tension et de caractériser les différentes décharges électriques produites en cas d'élévation et variation des champs électriques.

Dans le premier chapitre nous avons parlé d'un aperçu de la haute tension qui joue un rôle fondamental dans le transport de l'énergie électrique et les différents matériaux isolants utilisés dans les systèmes énergétiques. tel que La technologie de la haute tension est un domaine du génie électrique dont les principes scientifiques que l'on retrouve essentiellement en physique et qui, par son application, est intimement liée avec la pratique industrielle.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté des phénomènes essentiels lors l'augmentation du champ électrique dans matériaux diélectriques, cependant nous avons présenté le processus de développement de l'ionisation et à l'amorçage de la décharge électrique en passant par une analyse de conduction du courant à travers les isolants.

Dans le dernier chapitre nous avons consacré sur des études analytiques pour la détermination de la tenue diélectrique des isolants en présence d'un champ électrique uniforme,

et, en conséquence, les tensions de claquage des isolants gazeux et solides en fonction des paramètres caractéristiques des diélectriques et des conditions environnementales.

CHAPITRE I:

Matériaux utilisés dans les systèmes des isolations électriques

1. Introduction

L'énergie électrique sort des centrales avec une tension de quelques kV (5 à 10 kV), le transport se fait avec une haute tension (220 kV et plus) pour minimiser les pertes Joule dans la ligne et de pouvoir transiter de grandes puissances a des grandes distances aux consommateurs.

2. Nécessité de la haute tension

La haute tension est le domaine du champ électrique élevé, une haute tension est toute tension qui engendre, dans les composants d'un système, des champs électriques suffisamment intenses pour modifier, de manière significative, les propriétés de la matière, en particulier des matériaux isolants.

Alors, l'étude de la haute tension aboutit à la conception et à la réalisation de produits, appareils et systèmes aptes à générer et à supporter des champs électriques élevés.

Pour une puissance donnée, le courant à transporter sera inversement proportionnel à la tension de transport. Par exemple, pour évacuer l'énergie d'un groupe de 100MVA, le courant sera de 260 A sous 220 kV mais de 4 000 A sous 15 kV. Le transport de 4 000 A sous 15 KV entraînerait des coûts d'équipement et surtout de pertes par effet Joule inadmissibles.

Pour utiliser pleinement la production économique le réseau de transport doit être adaptée à la production avec une interconnexion pour la mutualisation de la production dans un système intégré. En outre, le développement potentiel de l'énergie hydroélectrique et la nécessité de transporter la puissance sur de longues distances jusqu'aux centres de consommation était reconnue.

La puissance électrique (P) transmise sur une ligne aérienne d'impédance de surtension ($Z_L = 250 \Omega$) et sous un courant alternatif, dont la capacité de transfert de puissance est d'environ.

$$P = \frac{U^2}{Z_l} \quad (I.1)$$

Le système conduit aux résultats suivants ;

U(kv)	400	700	1000	1200	1500
P(MW)	640	2000	4000	5800	9000

3. Évolution et niveaux des tensions normalisées

Le niveau de tension de transmission en augmentation rapide au cours des dernières décennies est un résultat de la demande croissante d'énergie électrique, couplée au développement de grandes centrales électriques sur des sites éloignés des centres de l'activité industrielle et de la nécessité de transmettre l'énergie sur de longues distances aux centres.

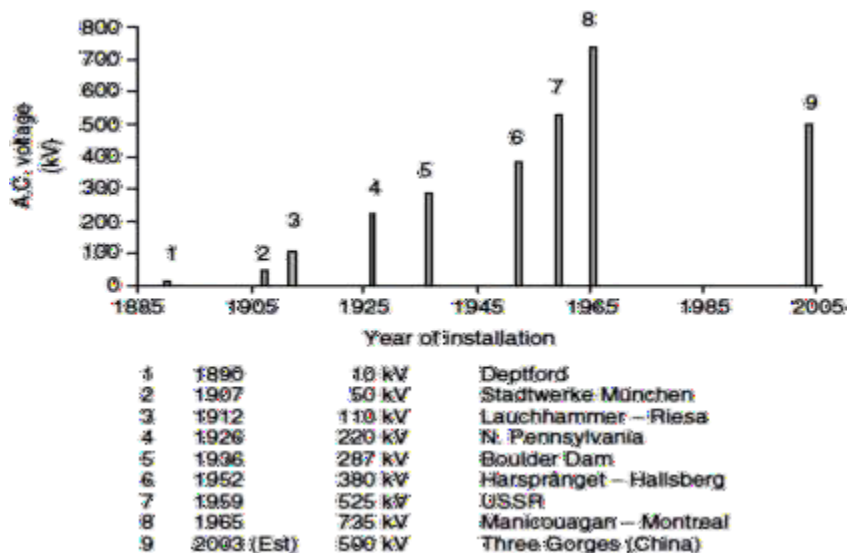


Figure I.1 : Chronologie de l'évolution de la tension et leur installation.

Les tensions normalisées selon la CEI (Commission électrotechnique internationale). La nouvelle norme CEI (ainsi que les textes législatifs en vigueur en Algérie depuis juin 2002) définissent les niveaux de tension alternative comme suit :

- HTB : pour une tension composée supérieure à 50 kV.
- HTA : pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV.
- BTB : pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV.
- BTA : pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V.
- TBT : pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V.

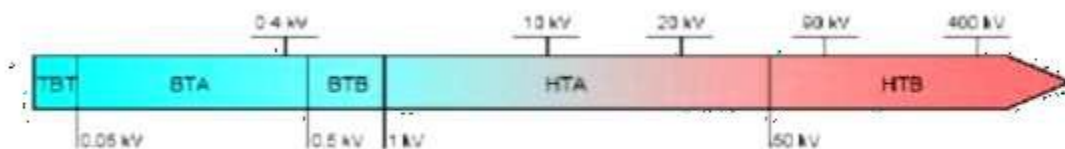


Figure I.2 : Niveaux de tension normalisés.

4. Moyen de transport de grande puissance

4.1. Ligne électrique en haute tension

La ligne à haute tension constitue l'élément essentiel dans les infrastructures énergétiques de transport d'électricité. Elle permet l'acheminement de l'électricité des centrales électriques vers les centres de consommation.

Les lignes peuvent être aériennes, souterraines, et parfois sous-marines. Dans notre étude, nous intéressons exclusivement à la ligne à haute tension aérienne.

Les lignes à haute tension aériennes sont composées de câbles conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, pylônes ou poteaux.

Ces supports peuvent être faits de bois, d'acier, de béton, d'aluminium ou parfois en matière plastique renforcée.

Aujourd'hui, certaines lignes sont régulièrement exploitées à des tensions supérieures à 765 kV. Les lignes à courant continu haute tension permettent de transporter l'énergie avec moins de pertes sur de très grandes distances et éventuellement sous l'eau.

4.2. Composants d'une ligne à haute tension

Une ligne de transport se compose de conducteurs, d'isolateurs, de supports et de câbles de garde...

4.3. Types des conducteurs en hautes tensions

Sont aériens ou souterrains (et parfois-marins). Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques : (température, vent, pluie, verglas etc.).

Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne haute-tension : type de conducteur, hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximale sur le conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisante, etc.

Le choix de ces paramètres a une grande influence sur les coûts de construction et d'entretien d'une ligne de transport, ainsi que sur sa fiabilité et sur sa longévité. Pour toutes choses égales par ailleurs la position des conducteurs influe sur l'intensité et la disposition du champ électromagnétique.



Figure I.3 : Conducteur conventionnel sur la gauche et à âme en fibre composite à droite, l'âme au centre assure les propriétés mécaniques, l'aluminium à l'extérieur les propriétés électriques du conducteur.

Les conducteurs des lignes aériennes à très haute tension sont toujours nus, on emploie presque exclusivement des câbles en cuivre et des câbles en aluminium avec âme en acier, ces derniers sont généralement les plus économiques.

Pour le domaine de la THT, le mode d'utilisation des conducteurs est identifié selon des causes technico-économiques pour remédier à plusieurs phénomènes, qu'ils sont souvent rencontrés en vue le transport l'énergie électrique, comme les pertes par effet couronne, les pertes réactives de la ligne, les pertes par effet Joules...etc.

Afin de réduire l'effet couronne par exemple, il est préférable d'utiliser la technologie des lignes en faisceau de conducteurs. Le faisceau est composé de 2, 3 ou 4 conducteurs.

Parmi les effets de l'utilisation des faisceaux, l'augmentation de rayon équivalent de la phase et la réduction de l'intensité du champ électrique aux alentours du conducteur.

«L'avantage le plus important de l'utilisation du faisceau de conducteurs est la réduction de la réactance de la ligne et des pertes par effet couronne ».

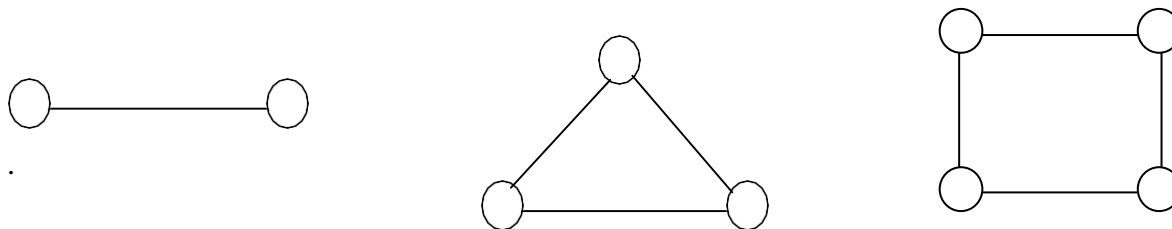


Figure I.4 : Conducteurs en faisceau.

4.4. Supports

Pour les lignes aériennes, des pylônes, généralement réalisés en treillis d'acier supportent et maintiennent les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles : ceci permet de garantir la sécurité et l'isolement par rapport à la terre, les câbles étant nus (non isolés) pour en limiter le poids et le coût.

L'inconvénient est leur exposition aux intempéries (embruns salés, tempêtes, poids de la glace qui peut les endommager).

La distance entre les fils conducteurs doit être suffisante pour empêcher leur contact, même sous l'action d'un vent violent. L'écartement entre les fils doit être d'autant plus grand que la distance entre les pylônes est plus grande et que la tension de la ligne est plus élevée. Par exemple, l'écartement entre les phases est habituellement de 12 m sur les lignes à 735 kV.

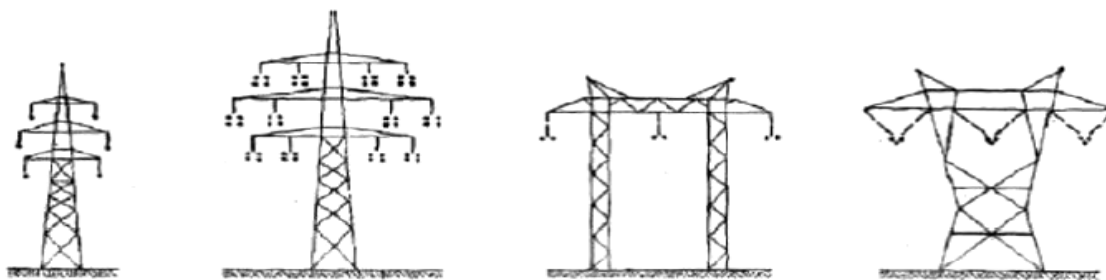


Figure I.5 : Types usuels de pylônes en treillis pour lignes à deux ou plusieurs ternes.

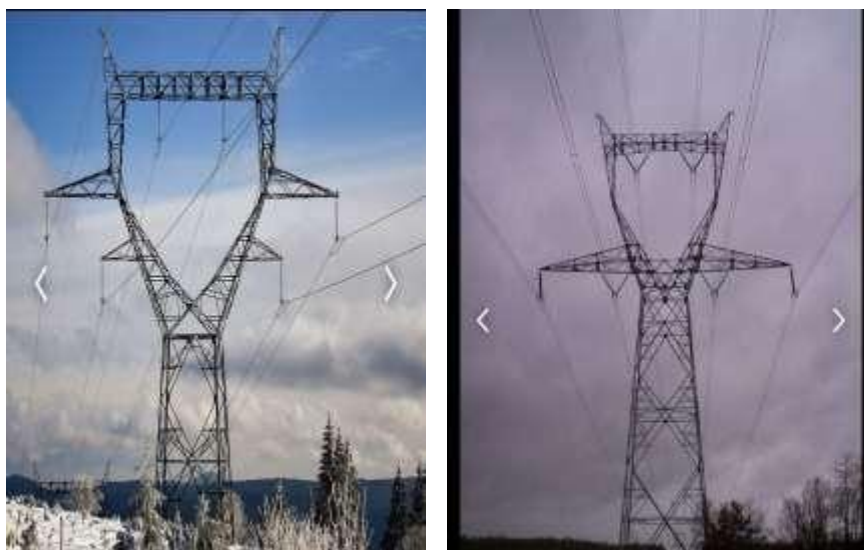


Figure I.6 : Pylônes électrique de type chat.

4.5. Câbles de garde

Le câble de garde protège contre la foudre car il est placé juste au-dessus des conducteurs, en cas de coup de foudre c'est lui qui est touché en premier. Après l'impact de la foudre il transfère le courant vers la terre à travers le pylône.

La présence des câbles de garde n'empêche pas à coup sûr d'éviter les coups de foudre, ils sont néanmoins utiles dans la mesure où leur présence fait diminuer leur probabilité dans un rapport de 1,5 à 5 environ, selon l'activité orageuse de la région.

4.6. Isolateur

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. L'isolateur est un matériau solide, liquide ou gaz qui a une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle.

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, son mouvement en présence de vent.

5. Classification des matériaux diélectriques utilisé dans les systèmes électrique

Les isolants sont classés en trois types ; solides, liquides et gazeux.

5.1. Différents types des Isolants solides

5.1.1. Isolants naturels

a- Minéraux

- **Verres** : constitué de (sable siliceux + chaux + soude).

Utilisation : pour les isolateurs Résistent à la chaleur et aux agents chimiques.

Caractéristique: $T_{max} = 400 \text{ à } 500 \text{ } ^\circ\text{C}$; $E \approx 70 \text{ kV/cm}$; $\tan \delta = 0,02 \text{ à } 0,04$; $\epsilon_r = 7$.



Figure I.7 : Isolateur en verre de ligne électrique.

- Céramiques :

Constitué de (argile, quartz, fondants et oxydes métalliques).

Utilisation : dans les isolateurs de lignes aériennes et d'antennes,

Les supports d'inductances HF et UHF,

Les condensateurs HF, les composants piézo-électriques.

Propriétés

$T_{\max} = 200 \text{ à } 500 \text{ } ^\circ\text{C}$; $E \approx 100 \text{ à } 200 \text{ kV/cm}$; $\tan\delta = 5.10^{-4} \text{ à } 1,2.10^{-2}$ $\epsilon_r = 10 \text{ à } 3000$.



Figure I.8 : Isolateur électrique en céramique destiné aux lignes électriques.

b-Organiques

- Caoutchouc :

Résine naturelle, latex de l'hévéa. Isolation de conducteurs et de câbles.

Propriétés :

$T_{\max} = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$; $E \approx 200 \text{ à } 300 \text{ kV/cm}$; $\epsilon_r = 3$.



Figure I.9 : Câble 12 KV à isolation de caoutchouc de type XLPE.

5.1.2. Isolants synthétiques

a- Matières plastiques

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

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

Les procédés de fabrication des matières plastiques sont principalement basés sur des traitements à haute température, sous des pressions élevées.

b- Caractéristiques des matières plastiques

- très bonne rigidité diélectrique : toujours ≥ 100 kV/cm.
- résistivité élevée : $10^8 \leq \rho \leq 10^{17} \Omega\text{m}$.
- faibles pertes diélectriques.
- propriétés mécaniques inférieures à celles des métaux mais pouvant être améliorées par les procédés.

Généralement les matières plastiques utilisées en électrotechnique dans l'appareillage électrique basse tension, les câbles et dans les disjoncteurs à haute tension sont :

Bakélite, Epoxydes, PVC, Polyéthylène, Téflon.

5.2. Différents types des isolants gazeux

Les diélectriques ou Les isolateurs de gaz sont largement utilisés dans les équipements électriques et les plus importants de ces gaz utilisés sont :

a- L'air.

Les composantes de l'air sont : l'oxygène (O_2), le gaz carbonique (CO_2), et l'azote (N_2).

- L'oxygène : 21%, incolore, inodore, non toxique.
- Le gaz carbonique : incolore, inodore, faiblement toxique.
- La masse molaire : 28,96 g, a une pression $p= 1 \text{ ATM}$ (1,013bar).
- La masse volumique à 0°C : $1,2929 \text{ kg /m}^3$
- La conductivité thermique à 0°C : $23,547 * 10^{-3} \text{ w/m.k}$.

L'air est utilisé dans l'isolation : les lignes aériennes, transformateur, disjoncteurs.

b- l'hexafluorure de soufre.

Découvert par **Maison** et **Lebeau** en 1900, et fabriqué industriellement aux états unis par synthèse du soufre et du fluor. Sa molécule parfaitement symétrie et dont les liaisons sont saturées possède une grande stabilité concrétisée par une énergie de formation élevée (1100 kJ / mole).

- Il est chimiquement inerte, inodore, incolore et incombustible, c'est un gaz lourd sa masse spécifique 6.14g/dm^3 dans les conditions normales.
- Sa rigidité diélectrique est égale 3 fois celle de l'air à pression atmosphérique.
- Point d'ébullition (sublimation) : $-63,9^\circ\text{C}$
- Chaleur latente de vaporisation (1,013 bar au point d'ébullition) : 162,2 k
- Pression de vapeur (à 21°C) : 21,5 bar.
- Viscosité (0°C et 1,013 bar) : 0,000142 poise.
- Conductivité thermique (0°C et 1.013 bar) : 12,58 mw/m.k
- Solubilité dans l'eau (20°C et 1 bar) : 0,007 vol/vol.

Domaine d'utilisation : disjoncteur, pote blindés, transformateurs, câble électrique

c- L'azote.

Se trouve principalement dans l'atmosphère. En effet, il représente en volume 78,08 % de l'air que nous respirons, à pression atmosphérique, pour des températures inférieures à -196°C , c'est un liquide incolore, un peu plus léger que l'eau.

Il ne peut entretenir ni la respiration, ni la combustion. La molécule d'azote de formule brute N₂ est formée de deux atomes N séparés par 109,8 pm.

- Incolore, inodore, absolument inoffensif.
- La masse molaire : 28,013g
- La masse volumique : 1,251 kg/m³ à 0 °C.
- Température de fusion : 259,14 °C
- Rigidité diélectrique : 1

5.3. Différents types des isolants liquides

Les isolants liquides présentent l'avantage de se régénérer après un claquage ; ils servent aussi au Refroidissement par convection ou par évaporation (les isolants liquides ont généralement une bonne Conductivité thermique). Ils sont utilisés seuls ou bien ils imbibent un isolant solide dont ils remplissent les vides.

5.3.1. Huiles minérales

Dérivés du pétrole, utilisées dans les transformateurs, les disjoncteurs, les condensateurs et les câbles.

Propriétés :

- rigidité diélectrique : $E \approx 90$ à 100 kV/cm
- facteur de dissipation : $\tan \delta = 4.10^{-4}$
- permittivité relative : $\epsilon_r = 4$ à 6

5.3.2. Huiles synthétiques

Huiles chlorées :

Ininflammables (pas de risque d'incendies), utilisées pour les transformateurs, les disjoncteurs, les condensateurs.

Huiles végétales :

Plastifiant dans la fabrication des vernis et des résines.

6. Caractéristique des matériaux isolants

6.1. Résistivité

La résistivité d'un matériau, généralement symbolisée par la lettre *rho* (ρ), représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique. Elle correspond à la résistance d'un tronçon de matériau d'un mètre de longueur et d'un mètre carré de section et est exprimée en ohms-mètres ($\Omega \cdot m$).

6.2. Permittivité

Elle permet de décrire la réponse d'un milieu donné à un champ électrique. Elle est exprimée en farad par mètre [F/m].

Dans la pratique on utilise de façon quasi exclusive la permittivité relative ϵ_r représentant le rapport de la permittivité absolue à la permittivité du vide ϵ_0 .

On peut la calculer selon la formule suivante :

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (I.2)$$

C : capacité d'un condensateur ayant le matériau comme diélectrique,

C_0 : capacité du même condensateur mais avec le vide.

6.3. Rigidité diélectrique

Si on augmente la tension à laquelle est soumis un isolant au-delà d'une certaine valeur appelée tension de claquage, il apparaît un arc électrique dans l'isolant : courant intense traversant l'isolant en suivant un chemin formé par l'arc lui-même.

Dans ce cas, l'isolant est percé : il y a rupture diélectrique ou claquage, destruction de l'isolant, irréversible pour les isolants solides (carbonisation), réversible pour les isolants gazeux et liquides (recombinaison des ions avec des électrons).

Par rapport aux positions relatives de la direction du champ électrique et des surfaces principales de l'isolant, la rigidité diélectrique peut être transversale ou longitudinale.

La rigidité diélectrique d'un matériau se définit comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit le claquage et la distance séparant les électrodes entre les quelles est appliquée la tension.

La rigidité diélectrique dépend de :

- la fréquence, la forme et la durée d'application de la tension, la température, la pression et l'humidité de l'atmosphère ;
- la présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité, ...).

6.4. Calcul de l'angle de perte diélectrique

L'angle de pertes δ est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage entre la tension U entre les conducteurs et le courant de fuite I traversant l'isolant :

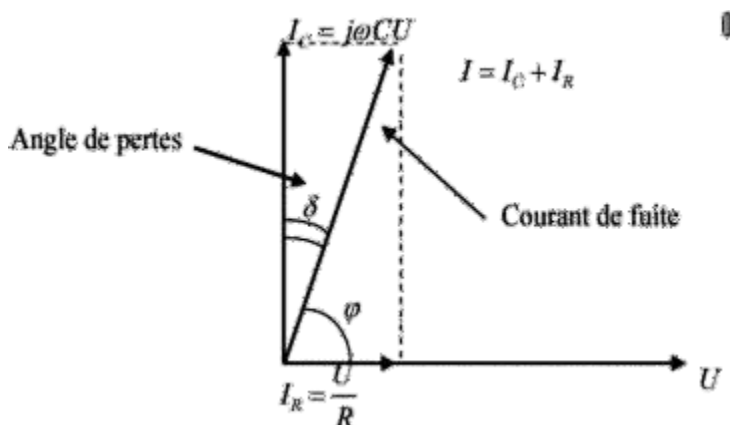


Figure I.10 : l'angle de perte diélectrique.

Le facteur des pertes est donné par :

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega.C.R} \quad (I.3)$$

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

C : Capacité entre les deux conducteurs

R : Résistance d'isolement de l'isolant

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.

7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé du concept de haute tension et de son importance dans le transport de l'énergie électrique.

La ligne électrique est un composant principal de réseaux de transport de l'énergie électrique. Ces lignes sont aériennes ou souterraines et parfois sous-marines.

Dans le réseau électrique la ligne à haute tension constitué des isolateurs électriques jouent un rôle important ces derniers sont également disponibles avec différents types et nombreuse propriétés.

CHAPITRE II:

Processus de développement des décharges électriques

1. Introduction

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. Ils sont caractérisés principalement par une conductivité nulle ou très faible à cause de l'absence totale des électrons libres dans leurs structures moléculaires.

2. Champ électrique élevé

Le champ est une quantité qui est fonction de l'espace. La présence d'un champ est détectée par la force exercée sur une particule ou un corps. Ce champ peut être défini par :

- une description quantitative de l'attraction ou de la répulsion d'une charge électrique par un autre à tout moment.

- le rapport de la force exercée sur une charge d'essai positive, placée en ce point, à l'ampleur de la charge.

- la source de l'intensité du champ électrique est la charge électrique.

L'intensité du champ électrique est souvent plus spécifiquement mentionnée comme " électrique stress » subi par un diélectrique ou un isolant électrique.

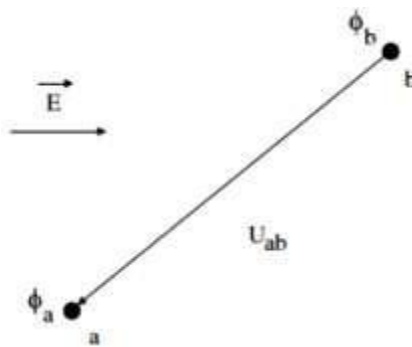


Figure II.1: Champ entre deux points de potentiels différents.

$$U_{ab} = -\int_b^a |\vec{E}| \cdot dx = \Phi_a - \Phi_b \quad (\text{II.1})$$

Avec ; Φ_a et Φ_b ; sont les potentiels scalaires des points a et b

La magnitude maximale de l'intensité du champ, peut donc être obtenue lorsque la direction de la distance est opposée à la direction du champ E.

$$\left. \frac{dU_{ab}}{dx} \right|_{max} = -|\vec{E}|_{max} \quad (\text{II.2})$$

L'équation (II.2) sert à fournir une interprétation physique du processus de détermination de l'intensité du champ électrique à partir du potentiel scalaire Φ . L'opérateur sur Φ par lequel E est obtenu est donc appelé «gradient». La relation entre Φ et E s'écrit,

$$\vec{E} = -\text{grad } \Phi \quad (\text{II.3})$$

L'intensité du champ électrique est donc numériquement égale au «potentiel gradient »

3. Phénomène d'ionisation et de conduction dans les gaz

3.1. Changement du comportement du gaz

Lorsque la tension d'alimentation est augmenté et par conséquent le champ électrique devient important, le gaz dans ce cas commence à changer leur état diélectrique et un cascade d'électrons et des d'ions libres formant des particules électriquement chargées à l'intérieur des gaz isolants.

3.2. Ionisation du gaz

Sous l'effet d'agents ionisants naturels (rayonnement cosmique) ou artificiels (rayons ultras violets, X et γ), ces gaz peuvent perdre leurs propriétés diélectriques et devenir des conducteurs en présence d'un champ électrique plus au moins intense.

3.2.1. Ionisation par collision

Les interactions entre les atomes et les molécules à l'intérieur du gaz, et au cours de leurs mouvements vont provoquer des collisions et produire ainsi des échanges de quantité de mouvements et d'énergie cinétique.

Lorsque l'énergie de la particule incidente est suffisamment supérieure à l'énergie d'ionisation de celle bombardée (atome cible), des électrons peuvent être libérés et ionisent les molécules du gaz, comme le montre la relation suivante.

$$\frac{1}{2} m \cdot v_0^2 \geq e \cdot v_i \quad (\text{II.4})$$

Avec : m , v_0 , respectivement la masse et la vitesse de la particule incidente.

e : la charge d'un électron, et v_i le potentiel d'ionisation de l'atome ou la molécule.

3.2.2. Photo ionisation

La photo ionisation est toujours associée au rayonnement **UV**, des rayons **X** et des rayons γ qui sont suffisamment énergétiques de l'ordre de 1 MeV, qui peuvent ioniser ou même exciter une particule neutre suivant la réaction :



Dès que

$$W_{ph} = h \cdot \nu \geq W_i \quad (\text{II.6})$$

Où h est la constante de Planck et ΔW une différence d'énergie fournie à l'électron libre sous forme d'énergie cinétique :

$$\Delta W = h \cdot \nu - e \cdot V \quad (\text{II.7})$$

Avec

ν : Fréquence du photon

V_i : Potentiel d'ionisation de l'atome du gaz.

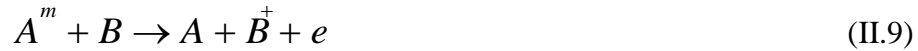
3.2.3. Ionisation thermique

L'élévation de température du gaz jusqu'à son échauffement, pourra rendre un tel processus d'ionisation efficace, à cause de la forte densité des atomes et des molécules qui peuvent s'accélérer et acquérir ainsi suffisamment d'énergie cinétique, pour provoquer des ionisations par des collisions d'autres particules, cela est expliqué par la réaction :



3.2.4. Ionisation par interaction avec les métastables

Les atomes métastables sont les atomes excités par les différents processus précédents peuvent être des sources importantes d'ionisation, lorsque l'énergie du métastable devient supérieure à l'énergie d'ionisation de la particule cible comme le montre la réaction suivante :



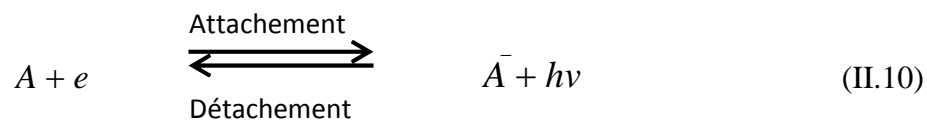
A^m : étant l'atome métastable

3.2.5. Attachement et détachement d'électrons

La diminution du nombre des électrons libres dans un gaz est obtenue généralement lorsque ces électrons se fixent à des molécules ou des atomes neutres, d'où la formation des ions négatifs.

Par conséquent, ce processus est exprimé par le coefficient d'attachement noté η , qui caractérise le nombre des électrons disparus par unité de longueur dans la direction du champ électrique à l'intérieur du gaz.

Un phénomène inverse est appelé le détachement, dans ce cas un ion négatif relâche son électron supplémentaire, et devient un atome ou molécule neutre.



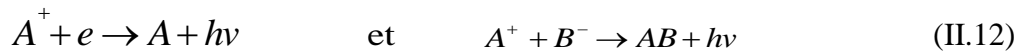
Où bien



3.2.6. Processus inverse d'ionisation

Un autre processus est considéré important dans les gaz est traduit par tous les phénomènes permettant de diminuer le nombre des électrons libérées pendant le processus d'ionisation par collision des ions positifs avec les électrons libres ou les ions négatifs ou par

de recombinaison des électrons. Les gaz électronégatifs présentent cette importante caractéristique.



Ce taux de recombinaison dépend essentiellement de la concentration des ions positifs et les ions négatifs où les électrons par unité de volume.

Le coefficient de recombinaison ζ , peut se déterminer par l'expression :

$$\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_-}{dt} = -\zeta \cdot n_+ \cdot n_- \quad (\text{II.13})$$

Sachons que n_+ et n_- sont respectivement le nombre des ions positifs et négatifs par unité de volume, généralement on a $n_+ = n_-$ et on obtient alors :

$$\frac{dn}{dt} = -\zeta \cdot n^2 \quad (\text{II.14})$$

L'intégrale de l'équation (II.14) dans les limites $t=0$ où $n = n_0$ et $t = t$ donne la relation.

$$n(t) = \frac{n_0}{1 + n_0 \cdot \zeta \cdot t} \quad (\text{II.15})$$

3.3. Conduction dans les gaz

Entre deux électrodes planes et parallèles placés dans un milieu gazeux l'air, un faible courant produit dans le circuit extérieur due principalement de plusieurs mécanismes développés à l'intérieur du gaz, permettant le mouvement des particules chargées.

3.3.1. Vitesse d'ionisation

Il n'existe pas de gaz qui soient des isolants électriques parfait ; il existe, tout au plus, des gaz dont la conductibilité électrique très réduite ne peut être mesurée qu'à l'aide d'appareils de grande sensibilité. Cela dû aux concentrations n_+ et n_- très faibles des ions positifs et négatifs, ainsi que la vitesse d'ionisation donnée par l'expression (II.16) qui est aussi faible dans l'atmosphère, donc une conductivité électrique est de l'ordre de $10^{-16} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$.

$$\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_-}{dt} = \frac{dn}{dt} \quad (\text{II.16})$$

3.3.2. Modélisation de conduction du courant

Nous souhaitons d'abord déterminer le passage du courant électrique à travers les gaz, dans le cas de décharge non autonome, décharge qui se maintient aussi longtemps que le gaz se trouve sous l'influence d'un agent ionisant extérieur suffisamment intense.

En premier lieu, nous supposons que le champ électrique est suffisamment faible pour que les électrons, dans leur mouvement à travers le gaz est ralenties c.-à-d. ils n'acquièrent pas une énergie plus grande que l'énergie d'ionisation des atomes, de sorte que l'ionisation du gaz par multiplication électronique qui sera plus détaillé dans le chapitre qui suit ne se produit pas.

Il ne reste que la charge superficielle des électrodes puis que le champ électrostatique est supposé constant et ne subit pratiquement, aucune déformation.

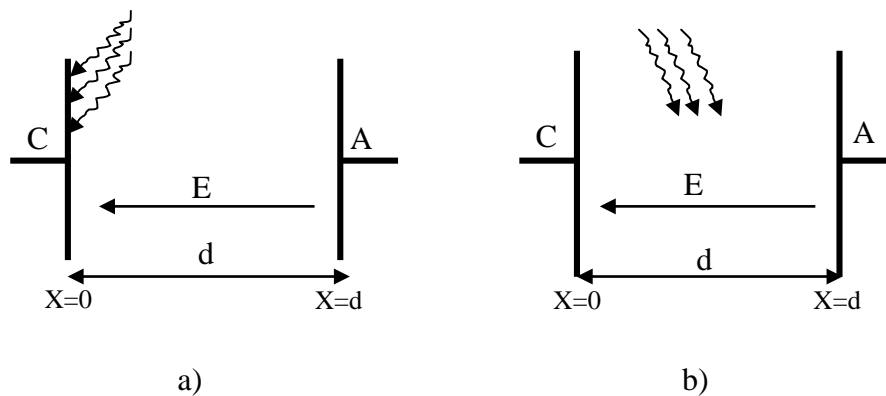


Figure II.2 : a) Emission photo-électronique de la cathode. b) Emission photo-électronique du volume du gaz.

La circulation du courant à l'extérieur résulte de plusieurs émissions la plus importante est :

3.3.2.1. Émission photo électronique

L'action des rayonnements extérieurs sur la cathode et dans le volume du gaz est caractérisé par le coefficient d'émission γ_0 , nous analysons d'abord le passage du courant

électrique à travers le gaz, dans le cas de la décharge non autonome et nous supposons, dans ce qui suit, le champ électrique suffisamment faible, de sorte que l'ionisation du gaz par multiplication électronique ne se produit pas, et négligeons aussi la charge d'espace devant la charge superficielle des électrodes.

Dans ce cas la densité de courant j dans le plan de la cathode est égale à la différence entre la densité du courant d'émission produit juste à la surface cathodique j_0 et la densité du courant rétrodiffusé j_r , dû à la diffusion des électrons vers la cathode.

$$j_0 = e \cdot \gamma_0 \quad (\text{II.17})$$

$$j_r = \frac{n_e \cdot v_e^-}{4} \quad (\text{II.18})$$

La différence des deux courants, nous donne la densité du courant résultant à l'extérieur du plan.

$$j = e \cdot \left(\gamma_0 - \frac{n_e \cdot v_e^-}{4} \right) \quad (\text{II.19})$$

Avec, v_e^- désigné la vitesse d'agitation thermique, autrement dit la vitesse moyenne des électrons dans leur mouvement et γ_0 est le nombre de paires d'ions créés par une source extérieure (ionisante) par unité de temps et de volume. L'équation de continuité du courant impose la relation.

$$j = e \cdot n_e \cdot u_e = e \cdot n_e \cdot \mu_e \cdot E \quad (\text{II.20})$$

u_e , μ_e , , sont respectivement la vitesse de dérive des électrons et leur mobilité.

De l'équation (II.19) et (II.20) et après quelques simplifications, on trouve la densité du courant sous la forme suivante.

$$j = \frac{e \cdot \gamma_0 \cdot \mu_e \cdot E}{\mu_e E + \frac{v_e^-}{4}} \quad (\text{II.21})$$

Pour un champ électrique très faible où $\mu_e E \leq \frac{v_e^-}{4}$, l'expression (II.21) se réduit à :

$$j = \frac{4.e.\gamma_0.\mu_e.E}{v_e^-} = \sigma.E \quad (\text{II.22})$$

Et la densité du courant dans ce cas est proportionnelle au champ électrique E, et σ étant la conductivité du gaz isolant.

Par contre lorsque le champ est suffisamment intense $\mu_e E \geq \frac{v_e^-}{4}$, les charges électriques tombent sur les électrodes avant de se neutraliser par recombinaison et le courant électrique atteint sa valeur de saturation qui peut être défini par sa densité.

$$j = j_0 = e.\gamma_0 \quad (\text{II.23})$$

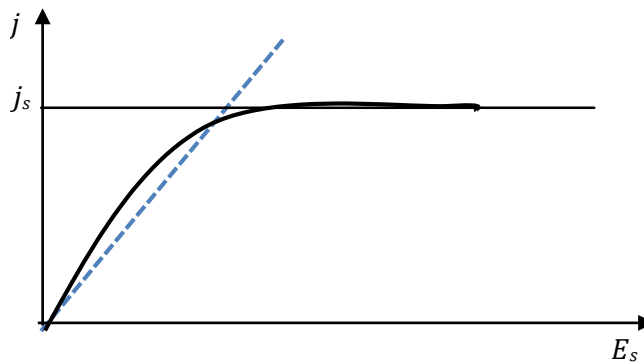


Figure II.3 : Variation de densité du courant en fonction du champ.

Dans ce cas le champ électrique est constant et uniforme et égal à $E = \frac{U}{d}$, en effet,

comme d'habitude $\mu_+ \prec \mu_-$, le nombre des charges positives tombant sur la cathodes serait plus petit que le nombre des charges négatives tombant sur l'anode, bien que, dans le reste du volume du gaz (milieu) se forme et se recombinaison le même nombre des charges électriques de signes différents où $n_+ = n_-$. Mais en réalité des charges d'espace positives et des charges d'espace négatives faibles sont formées respectivement devant la cathode et l'anode.

Il est nécessaire de mentionner que lorsque le champ électrique est suffisamment intense et non uniforme, des charges d'espace se forment dans le volume inter électrode et leur étude devient plus au moins compliquée selon plusieurs conditions.

3.3.2.2. Émission des ions positifs et négatifs

Une ionisation secondaire se développe dans le volume de gaz par une multiplication électronique due principalement des différents ioniseurs, des ions, atomes excités et aussi des photons en présence toujours des électrons, se déplacent en opposition sous l'effet de l'augmentation successive du champ électrique.

Dans ce cas, les charges d'espace s'imposent, le courant total développé est de densité :

$$j = e.(n_e u_e + n_i u_i) \quad , \text{ avec } u_e = \frac{e E}{m v_e} \quad (\text{II.24})$$

En introduisant la mobilité des électrons et des ions, l'équation (II.21) devient :

$$j = e.(n_e \mu_e + n_i \mu_i).E \quad (\text{II.25})$$

Qui peut être réduite à une simple forme ; $j = \sigma . E$

$$\text{avec : } \sigma = e.(n_e \mu_e + n_+ \mu_+ + n_- \mu_-) \quad (\text{II.26})$$

Où n_e , n_+ et n_- sont les densités des électrons, ions positifs et négatifs, et leurs mobilités sont respectivement, μ_e , μ_+ et μ_- .

Les électrons ayant une masse beaucoup plus faible que les molécules du gaz, ils sont beaucoup plus mobiles que les ions créés dans les avalanches et en raison de cette différence de masse et sous un champ extérieur, les électrons vont dériver beaucoup plus vite que les ions. Les charges positives et négatives vont se séparer en créant un champ induit qui peut modifier le champ extérieur appliqué.

3.3.2.3. Émission thermo-ionique

Lorsque la température du métal de la surface cathodique dépasse 1500° K, des électrons acquièrent suffisamment d'énergie pour traverser la barrière de potentiel et s'accumulent auprès de la surface de la cathode. Richardson a développé une expression de densité du courant de saturation produit pendant cette émission et lié à la température du métal comme suite.

$$j_s = \frac{4 \cdot \pi \cdot m \cdot e \cdot k^2 \cdot T^2 \exp\left[-\frac{W_a}{kT}\right]}{h^3}, \quad A = \frac{4 \cdot \pi \cdot m \cdot e \cdot k^2}{h^3} \quad (\text{II.27})$$

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

$$W_{eff} = W_a - \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}} \quad (\text{II.28})$$

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

$$j_s = A \cdot T^2 \exp\left[-\frac{e}{K \cdot T} \left(W_a - \sqrt{\frac{e \cdot E}{4\pi \cdot \epsilon_0}}\right)\right] \quad (\text{II.29})$$

Si j_0 est la densité de courant en absence du champ électrique extérieur l'équation (II.27) peut prendre la forme :

$$j_s = j_0 \exp\left[\frac{e}{K \cdot T} \left(W_a - \sqrt{\frac{e \cdot E}{4\pi \cdot \epsilon_0}}\right)\right] = j_0 \exp\left[\frac{B\sqrt{E}}{T}\right] \quad (\text{II.30})$$

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

4. Conduction électrique dans les solides

4.1. Bandes d'énergie

Les propriétés de conduction électrique des matériaux solides peuvent être expliquées par leur structure électronique décrite par la théorie des bandes. La bande d'énergie associée aux électrons dans leur état fondamental est appelée bande de valence. Dans cette bande les le mouvement des électrons est faible, ils sont donc fortement liés. Lorsque le matériau solide est mis sous une excitation élévation des champs, température...agitation, ces électrons bougent et peuvent franchir la bande interdite vers la bande de conduction.

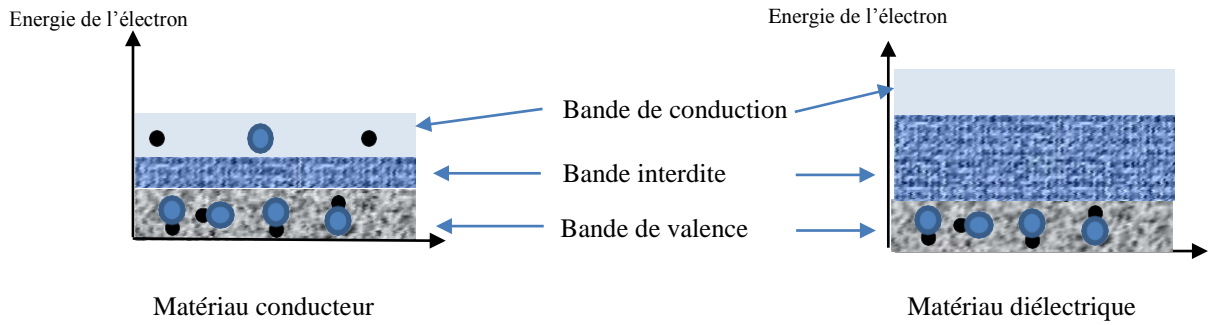


Figure II.4 : Diagramme représentatif des bandes d'énergie.

4.2. Polarisation du solide

Le phénomène de polarisation correspond à l'apparition ou à l'orientation de moments dipolaires sous l'effet d'un champ électrique extérieur. Il se traduit soit par une séparation des barycentres des charges positives et négatives des atomes et molécules.

L'état de polarisation d'un matériau peut être quantifié par le vecteur polarisation \vec{P} , qui représente la densité volumique $d\vec{p} / dv$ de moments dipolaires $\vec{P} = q \cdot \vec{r}$, où q est la charge du type de dipôle concerné (molécule, chaîne moléculaire...) et r sa longueur. Ce phénomène de polarisation se manifeste selon quatre mécanismes :

- Polarisation électronique
- Polarisation ionique ou atomique
- Polarisation par orientation
- Polarisation inter-faciale
- Polarisation par charge d'espace

La polarisation peut être considérée comme un mouvement élastique. Quand l'effet du champ électrique externe disparaît, les charges reviennent à leur position initiale, ce qui ne se passe jamais pour la conduction.

Durant la polarisation, les charges sont mises en mouvement mais ne peuvent jamais quitter la molécule. Par contre, la conduction est le déplacement des charges sur de grandes distances, qui se libèrent et quittent les particules.

4.3. Conduction dans les solides

L'application d'un champ entraîne d'abord une polarisation du diélectrique (si le matériau est polaire) et une séparation des charges intrinsèques positives et négatives, qui vont migrer et s'accumuler sur les électrodes de signes opposés.

La mesure du courant de conduction et son évolution en fonction du champ électrique appliqué présente une étape importante pour la caractérisation des matériaux diélectriques. En effet, l'apparition et l'évolution du courant de conduction sont souvent la principale cause d'une dégradation des propriétés diélectriques du matériau.

4.3.1. Conduction ohmique

La densité de courant circulant dans un matériau s'exprime en fonction du champ électrique par la loi d'Ohm :

$$j = \sigma \cdot E \quad (\text{II.31})$$

j étant la densité de courant (A/m²), E le champ électrique appliqué (V/m) et σ la conductivité du matériau (S/m). La conductivité est liée au déplacement des porteurs de charges intrinsèques libres dans le volume et s'exprime par :

$$\sigma = n_{\sigma} q \cdot \mu \quad (\text{II.32})$$

Où n_0 est la densité des porteurs de charge intrinsèques (m⁻³), μ est leur mobilité (m².V⁻¹.s⁻¹) et q est leur charge électrique (c).

4.3.2. Conduction électronique

La dissociation radiative et l'agitation thermique sont les deux processus essentiels de génération d'électrons de conduction dans un isolant solide. En effet, lorsqu'un porteur de charge acquiert une énergie suffisante, il peut quitter son environnement électronique créant ainsi une charge libre. Le courant mesuré dans le circuit extérieur est le résultat des effets de l'interface électrode/isolant et du volume. Cependant, ces deux processus sont découplés pour la description analytique de la conduction électrique dans les isolants solides qui est résulté de plusieurs effets, tel que l'effet Schottky.

L'effet Schottky est un phénomène caractérisé par l'émission d'électrons de l'électrode négative dans un diélectrique. L'injection Schottky correspond à une activation thermique d'électrons à travers l'interface métal-isolant, l'expression du courant crée dans le solide est donné par l'équation suivante :

$$j = A.T^2 . \exp\left(-\frac{\phi_0 - \beta_s \cdot \sqrt{E_{cat}}}{k.T}\right) \quad (\text{II.33})$$

$$\text{Et } \beta_s = \frac{q^{3/2}}{\sqrt{4.\pi.\epsilon_0.\epsilon_r}} \quad (\text{II.34})$$

où A est la constante de Richardson-Dushman, β_s la constante de Schottky, k la constante de Boltzman, T la température, E_{cat} le champ électrique à la cathode et ϕ_0 le travail de sortie du métal dans le vide.

4.3.3. Conduction ionique

L'origine et les mécanismes de génération des ions participant à la conduction électrique dans les matériaux isolants solides sont divers, les ions présents se déplacent dans le diélectrique par série de sauts au-dessus de la barrière de potentiel lui permettant de se mouvoir d'une région à une autre.

Sous l'action du champ électrique, un processus de diffusion peut avoir lieu et les ions générés vers le matériau circulent et contribuent aussi à la création des autres particules (ions).



Pour des champs forts ($> 10^7$ V/m), le courant total peut être donné par l'expression :

$$j = j_0 \cdot \exp\left(-\frac{\phi - qlE}{kT}\right) \quad (\text{II.36})$$

Lorsque le champ est faible $q.l.E \ll kT$; le courant peut s'écrire comme suit :

$$j = j_0 \frac{q.l.E}{k.T} \quad (\text{II.37})$$

Avec, ϕ le potentiel, q la charge de la particule ou ion, l est la longueur parcouru par la charge.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les phénomènes physiques fondamentaux de principales formes du passage du courant électrique dans les matériaux isolants solides et gaz qui provoque l'amorçage des décharges électriques et le changement de la tenue diélectrique de ces matériaux.

CHAPITRE III:

Effet des décharges électriques sur les propriétés diélectriques des matériaux isolants

1. Introduction

La connaissance des propriétés électriques des matériaux pour les concepteurs des Systèmes électriques ou autres est impérative.

En effet, la considération des propriétés électriques est souvent très importante, particulièrement lors du choix des matériaux pour la conception d'un système donné. Le comportement électrique, pour un grand nombre de matériaux, est varié selon l'application et l'environnement de travail auquel il est destiné. Certains matériaux doivent être de très bons conducteurs par contre d'autres, doivent être de très bons isolants (diélectrique).

Les isolations des matériels sont non seulement soumises aux conditions physiques et chimiques imposées par l'environnement telles que l'oxydation par l'oxygène atmosphérique ou l'humidité qui affecte fortement la tenue diélectrique, mais aussi à des contraintes électriques et mécaniques tels que les surtensions, les vibrations et les chocs thermiques.

2. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau correspond à la valeur maximale du champ électrique que l'on peut appliquer à un échantillon du matériau isolant d'épaisseur d mis entre deux électrodes identiques ou de formes différentes, lorsque se produit un claquage avant l'apparition d'une dégradation totale de l'isolant. Cette caractéristique est définie comme le rapport entre la tension U_c de claquage et l'épaisseur de l'isolant d .

$$E_c = \frac{U_c}{d} \quad (\text{III.1})$$

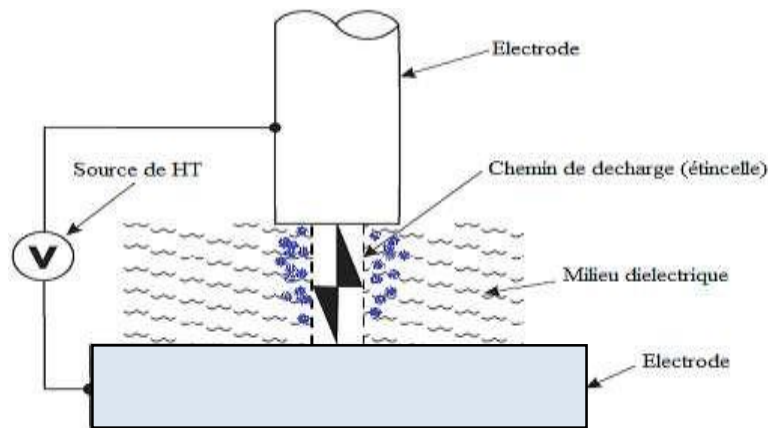


Figure III.1 : Schéma de base de claquage d'un isolant.

3. Processus de Claquage dans les gaz isolants

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

3.1. L'avalanche électronique

Un électron libre, placé dans un champ électrique uniforme $E = U/d$ où U est la différence de potentiel appliquée entre deux électrodes planes séparées par une distance d (**Figure III.2**) est de plus en plus accéléré sous l'effet du champ électrique par l'action de la force. Il parvient ainsi à gagner une énergie suffisante pour ioniser par collisions des particules neutres, donnant naissance à des ions positifs et à de nouveaux électrons.

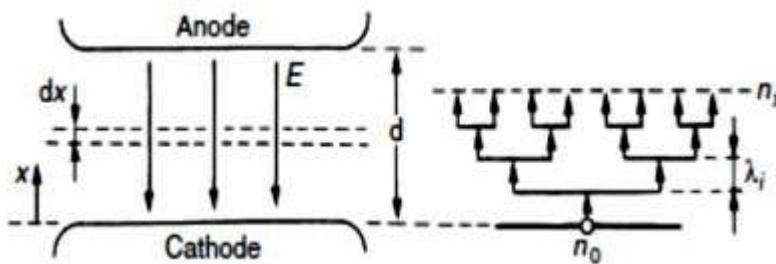


Figure III.2 : Représentation schématique d'une avalanche électronique.

3.2. Différents régimes de décharges électriques

Sur la caractéristique tension – courant représentée par la (Figure III.3), nous avons représenté les différentes zones, chacune correspond à un régime donnée de décharge électrique produite dans le gaz mis entre les deux électrodes planes.

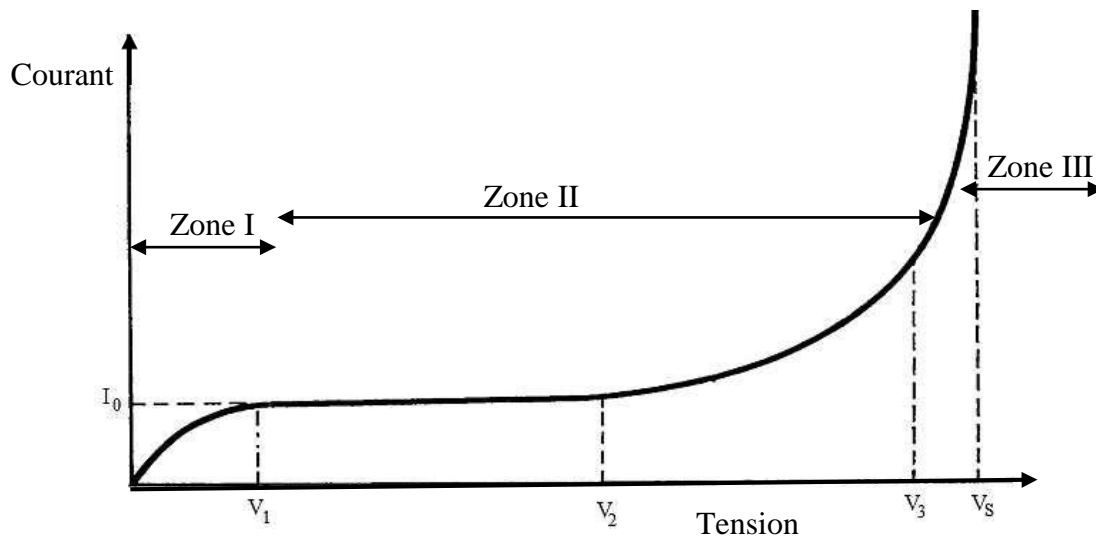


Figure III.3 : Caractéristique courant-tension pour différents régimes de décharges.

Lorsqu'on augmente progressivement la tension V , le courant croît linéairement jusqu'à une certaine valeur I_0 dite de saturation. I_0 se maintiendra à cette valeur tant que V reste inférieur à la tension d'ionisation V_2 du gaz considéré. Dès que V dépasse V_2 , le courant croît de façon très rapide. A ce stade, la décharge dépend encore des sources extérieures d'ionisation. Cette croissance rapide du courant résulte de la multiplication électronique.

Lorsque le champ électrique E augmente, les électrons émis par la cathode (électrons primaires), sous l'effet d'un rayonnement quelconque, sont de plus en plus accélérés.

Zone I : c'est la zone correspond aux des décharges non autonomes ou dépendantes, la présence de l'agent extérieur ionisant est nécessaire pour que ce type de décharges reste en développement.

Zone II : L'augmentation du champ électrique accélère la vitesse de bombardement des ions sur la cathode. Ce mouvement génère des électrons supplémentaires qui à leur tour font augmenter le courant. La décharge électrique est suffisante, n'a pas de dépendance avec la source extérieure et peut entraîner une décharge luminescente dite décharge couronne.

Zone III : Au-delà du régime de décharge luminescente anormale, une nouvelle augmentation du courant peut provoquer un court-circuit. C'est le régime de décharge d'arc. La tension chute brutalement alors que le courant augmente rapidement.

3.3. Claquage de type Townsend

3.3.1. Première phase

Pour expliquer la montée exponentielle du courant, Townsend a introduit un coefficient α dit Le premier coefficient d'ionisation de Townsend et est défini comme le nombre d'électrons produits par un électron par unité de longueur de chemin dans le sens du champ.

Si N_0 est le nombre d'électrons émis par la cathode par unité de temps et Nx le nombre d'électrons traversant le plan d'abscisse x par unité de temps et a la distance inter électrodes, l'augmentation de ce nombre sous l'effet de chocs ionisants sur un parcours dx , en admettant a constant,

S'écrira :

$$dn = \alpha n \cdot dx \quad (\text{III.2})$$

Donc on peut écrire ;

$$\frac{dn}{n} = \alpha \cdot dx \quad (\text{III.3})$$

On obtient ainsi ;
$$\ln n = \alpha x + A \quad (\text{III.4})$$

Remplaçons $x = 0$ et $n = n_0$ donc, on aura

$$\ln n_0 = A \quad (\text{III.5})$$

Ou
$$\ln n = \alpha x + \ln n_0 \quad (\text{III.6})$$

Donc ;
$$\ln \frac{n}{n_0} = \alpha x \quad (\text{III.7})$$

à $x = d$, $n = n_0 e^{\alpha d}$; donc, en termes de courant

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (\text{III.8})$$

Le terme e^{ad} , s'appelle l'avalanche d'électrons et représente le nombre d'électron produits par un électron en se déplaçant de la cathode à l'anode.

Ces n électrons se déplacent sur une distance dx produisent des électrons dn supplémentaires par collision.

3.3.2. Deuxième phase

La cathode joue un rôle important dans les décharges de gaz en fournissant des électrons pour l'initiation de l'avalanche électronique, les électrons ne sont pas autorisés de sortir de la surface car ils sont liés ensemble en raison de la force électrostatique entre les électrons et les ions dans le gaz.

Une fois la tension appliquée est croit chaque ionisation donne naissance à un électron libre et un ion positif qui se dirige vers la cathode où il donnera à son tour naissance à un nombre γ de nouveaux électrons arrachés de la cathode par son bombardement par ces ions positifs, si son énergie est suffisante (supérieure à l'énergie d'ionisation du matériau constituant la cathode).

Le coefficient γ , caractérisant l'ionisation en surface au niveau de la cathode, est appelé deuxième coefficient de Townsend, qui représente donc l'ensemble des effets secondaires et quantitativement fourni par l'expression.

$$\gamma = \gamma_i + \gamma_{ph} + \gamma_m \cdots \gamma_n \quad (\text{III.9})$$

Où n indique le type d'effet secondaire. Et n le nombre de électrons atteignant l'anode. Soit \mathcal{Y} , connu sous le nom de second coefficient d'ionisation de Townsend défini par le nombre d'électrons libérés de la cathode par ion positif incident.

Maintenant, le nombre total d'électrons libérés par la cathode est $(n_0 + n_+)$ et ceux atteignant l'anode sont n , donc, le nombre d'électrons libérés par le gaz = $n - (n_0 + n_+)$, et correspondant chaque électron libéré du gaz, il y aura un ion positif et en supposant que chaque ion positif libère ν les électrons effectifs de la cathode puis En tenant compte maintenant ces effets secondaires représentés par le deuxième coefficient de Townsend γ .

$$N'_0 = N_0 + N'_0 \quad (\text{III.10})$$

N'_0 , le nombre total des nouveaux électrons arrachés de la cathode dans le deuxième processus, l'expression de la densité des électrons doit être recalculée de la façon suivante.

$$N_d = N_0'' \cdot e^{\alpha \cdot d} = (N_0 + N'_0) \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (\text{III.11})$$

Remplaçons maintenant $N'_0 = \gamma[N - (N_0 + N'_0)]$ on obtient ;

$$n_+ = \gamma[n - (n_0 + n_+)]\eta \quad (\text{III.12})$$

Où
$$n_+ = \gamma n - \gamma n_0 - \gamma n_+ \quad (\text{III.13})$$

Où
$$(1 + \gamma)n_+ = \gamma(n - n_0) \quad (\text{III.14})$$

Où
$$n_+ = \frac{\gamma(n - n_0)}{1 + \gamma} \quad (\text{III.15})$$

Remplacement n_+ dans l'expression précédente pour n , on aura

$$n = \left[n_0 + \frac{\gamma(n - n_0)}{1 + \gamma} \right] e^{\alpha d} = \frac{(1 + \gamma)n_0 + \gamma n - \gamma n_0}{1 + \gamma} e^{\alpha d} \quad (\text{III.16})$$

$$= \frac{n_0 + \gamma n}{1 + \gamma} e^{\alpha d} \quad (\text{III.17})$$

Où
$$(n + \gamma n) = n_0 e^{\alpha d} + \gamma n e^{\alpha d} \quad (\text{III.18})$$

Où
$$n + \gamma n - \gamma n e^{\alpha d} = n_0 e^{\alpha d} \quad (\text{III.19})$$

On trouve
$$n[1 + \gamma - \gamma e^{\alpha d}] = n_0 e^{\alpha d} \quad (\text{III.20})$$

D'où
$$n = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 + \gamma(1 - e^{\alpha d})} = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{III.21})$$

En termes de courant

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{III.22})$$

3.3.3. Détermination de tension de claquage du gaz

L'expression de α peut se mettre sous la forme :

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right) \quad (\text{III.23})$$

Avec :

p : pression exprimée en Torr.

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

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

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

À partir de l'équation (III.23) donnant la condition de claquage, on aura :

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

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

$$U = E \cdot d \quad (\text{III.25})$$

Substituons les équations (III.24), (III.25) dans (III.23), nous trouvons par la suite une relation entre la tension de claquage U_c et le produit pd exprimée comme suit:

$$U_C = \frac{B.Pd}{\ln \left[\frac{A.Pd}{\ln \left(1 + \left(\frac{1}{\gamma} \right) \right)} \right]} \quad (\text{III.26})$$

À partir de cette expression, nous remarquons que la tension de claquage du gaz, dépend de plusieurs facteurs, Pression, distance, état de la surface de la cathode, température et l'humidité et d'autre facteurs moins influençant sur la tenue diélectrique.

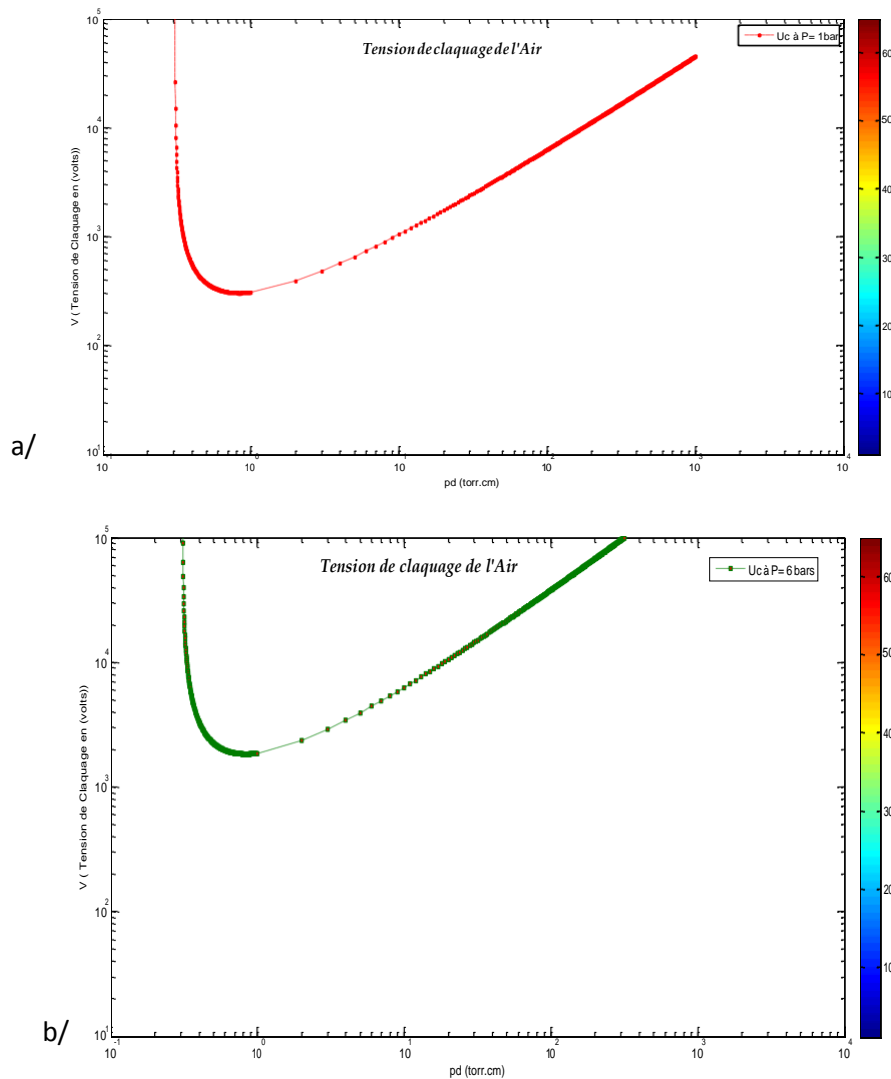


Figure III.4 : Courbes de Paschen pour l'air ; a/ pour $p= 1$ bar et b/ pour $p=6$ bar.

Avec l'augmentation de la pression on voit que la tension de claquage du gaz augmente progressivement, cela est expliqué par le freinage des phénomènes d'ionisation (vitesse minimale des (e) c-à-d pas de collision).

4. Claquage des isolants solides

➤ **Dans les isolants 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.

➤ **Dans les isolants liquides et gazeux :**

Si le claquage survient dans les isolants liquides ou gazeux, la grande mobilité des particules permet à la trace de disparaître et l'isolant est ainsi régénéré (si le claquage n'a pas eu lieu pendant une durée assez grande pour changer les propriétés intrinsèques de l'isolant).

Chaque type de matériau possède une résistance au claquage (rigidité diélectrique) différente des autres.

La rigidité diélectrique dépend considérablement de :

- la fréquence du réseau : la rigidité diélectrique diminuant avec l'augmentation de la fréquence.
- la température : la rigidité diélectrique diminuant avec l'augmentation de la température.
- durée d'application de la tension.

4.1. Différents Mécanismes de claquage dans les isolants solides

Bien que de nombreux investigateurs ont 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.

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 ;

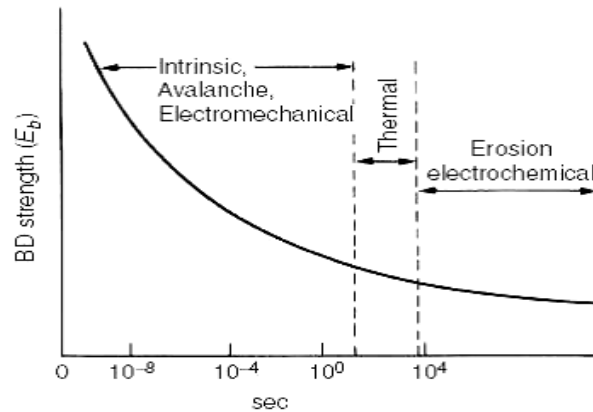


Figure III.5 : Différents types de claquage des isolants solides.

4.1.1. 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.

4.1.2. 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.

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.

La Destruction du matériau par avalanche électronique nécessite 40 générations soit 2^{40} électrons ($\approx 1.0995116.10^{12}$).

➤ Description de l'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 à 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.

4.1.3. Claquage thermique

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.

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.

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 :

$$\rho.C. \frac{dT}{dt} = \sigma .E^2 - \Phi \quad (\text{III.27})$$

Avec ;

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

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

$\rho \cdot C \cdot \frac{dT}{dt}$; 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.

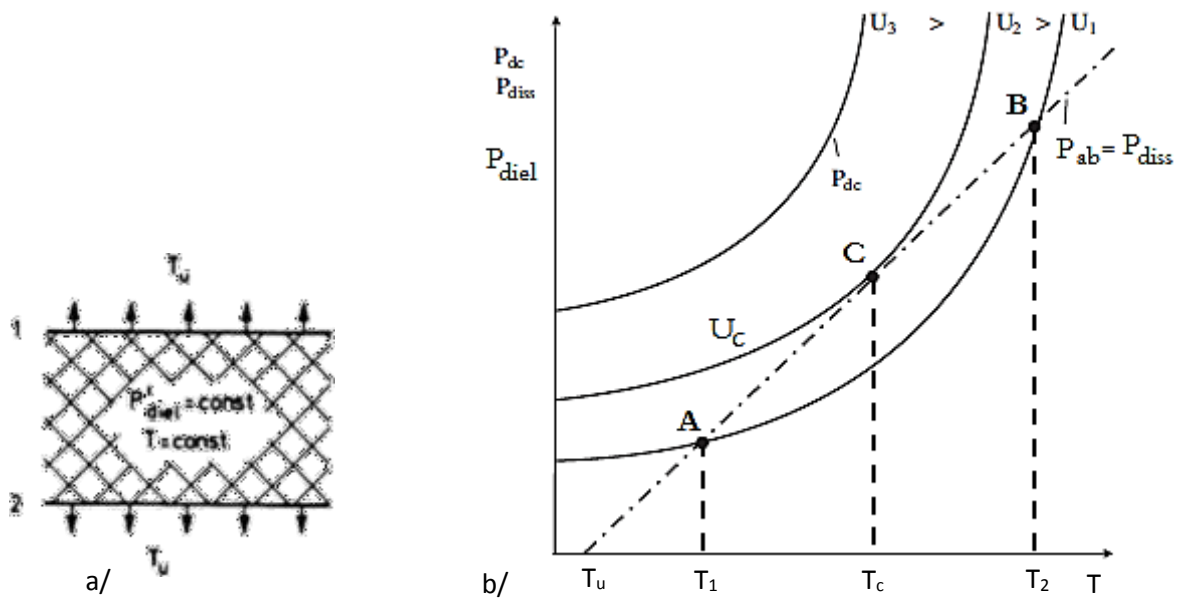


Figure III.6 : Modèle pour l'explication qualitative de la dégradation thermique.

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.28).

$$P'_{diel} = E^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta \quad (III.28)$$

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 :

$$P'_{diel} = E^2 \cdot k \quad (III.29)$$

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

$$P'_{diel} = E^2 \cdot p(T) \quad (III.30)$$

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

$$p(T) = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta \quad (III.31)$$

Et pour la tension continue ;

$$p(T) = k \quad (III.32)$$

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

$$p(T) = p_o \cdot e^{\sigma(T - T_o)} \quad (III.33)$$

Où T_o et p_o 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.6 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 1 et 2 avec la puissance de refroidissement (dissipation) P_{ab} qui doit être proportionnel à la différence de température réelle et ambiante T_u :

$$P_{ab} \propto (T - T_u) \quad (\text{III.34})$$

Un point de fonctionnement stable doit satisfaire aux conditions suivantes ;

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

$\frac{dP_{ab}}{dT} > \frac{dP_{diel}}{dT}$; 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.6-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.7.

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:

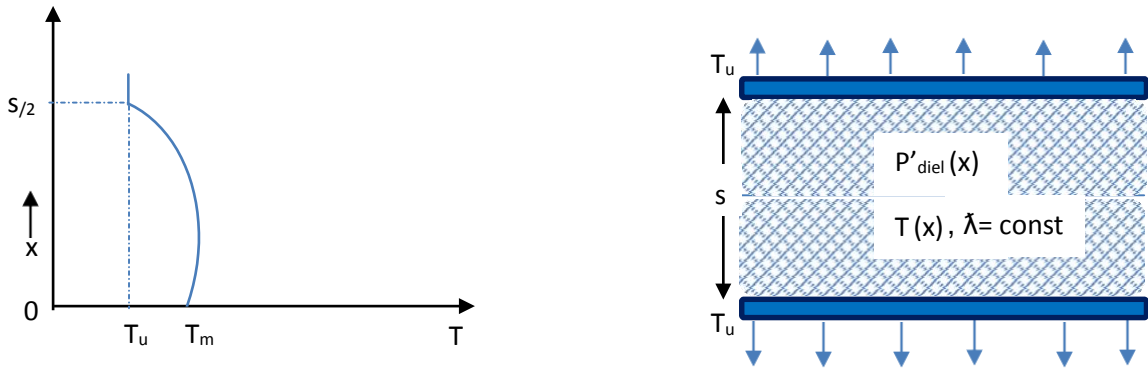


Figure III.7 : Schéma du modèle utilisé pour la détermination de tension critique de claquage thermique global.

$$\begin{aligned}
 x = 0; \quad T = T_m \quad \text{et} \quad \frac{dT}{dx} = 0 \\
 x = \frac{s}{2}; \quad T = T_u
 \end{aligned}
 \tag{III.35}$$

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

$$P'_{ab} = -\text{div} \lambda \text{ grad} T
 \tag{III.36}$$

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

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + E^2 \cdot P_0 \cdot e^{\sigma(T-T_0)} = 0
 \tag{III.37}$$

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

$$\lambda \frac{d}{dx} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{dT}{dx} \right)^2 \right] + E^2 \cdot P_0 \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{\sigma} e^{\sigma(T-T_0)} \right) = 0
 \tag{III.38}$$

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

$$\frac{\lambda}{2} \cdot \left(\frac{dT}{dx} \right)^2 + \frac{E^2 \cdot P_0}{\sigma} (e^{\sigma(T-T_0)} - e^{\sigma(T_m-T_0)}) = 0 \quad (\text{III.39})$$

La séparation des variables conduit à l'intégrale :

$$\int_{T_m}^{T_u} \frac{dT}{\sqrt{1 - e^{\sigma(T-T_m)}}} = E \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_0}{\lambda \cdot \sigma}} \cdot e^{\frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot (T_m - T_0)} \cdot \int_0^x dx \quad (\text{III.40})$$

Faisons maintenant l'intégrale du côté gauche et en remplaçant $U = E \cdot S$; On obtient finalement la relation entre la tension et la température maximale

$$U = 2 \cdot \sqrt{\frac{2\lambda}{P_0 \cdot \sigma}} \cdot \frac{\cosh^{-1} \left(e^{\frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot (T_u - T_m)} \right)}{e^{\frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot (T_m - T_u)}} \quad (\text{III.41})$$

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

$$U = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{P_0 \cdot \sigma \cdot e^{\frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot (T_m - T_u)}}} \cdot f(\sigma \cdot \Delta T_m) \quad (\text{III.42})$$

Avec ; $\Delta T_m = T_m - T_u$ (III.43)

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.

Pour cela nous obtenons :

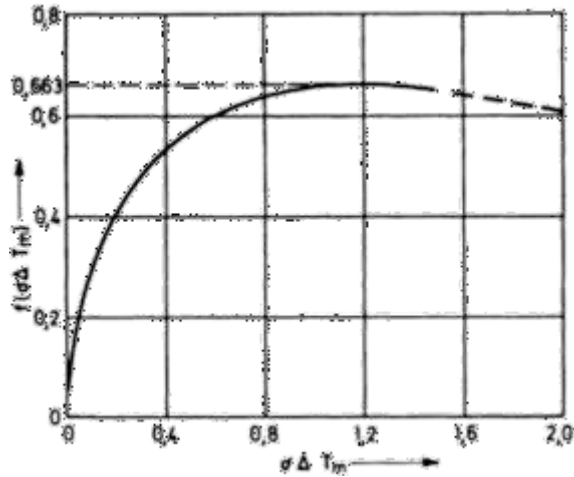


Figure III.8 : Fonction pour le calcul de la Tension critique.

$$U_c = 1,875 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{P_o \cdot \sigma \cdot e^{o(T_a, T)}}} \quad (\text{III.44})$$

Avec ; $p_o = \omega \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta_o$

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.

4.1.4. Claquage électromécanique

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.

4.1.5. Claquage par décharge partielle (arborescences électriques)

Le claquage des isolants est généralement anticipé par une période de croissance d'un défaut, comme la cavité, ou vacuole, dans le matériau. Cette cavité, lorsqu'elle atteint une taille suffisante, est le siège de décharges partielles dont la répétition détruit le matériau et conduit à la formation d'une arborescence où intervient en dernier l'arc électrique Figure III.9.

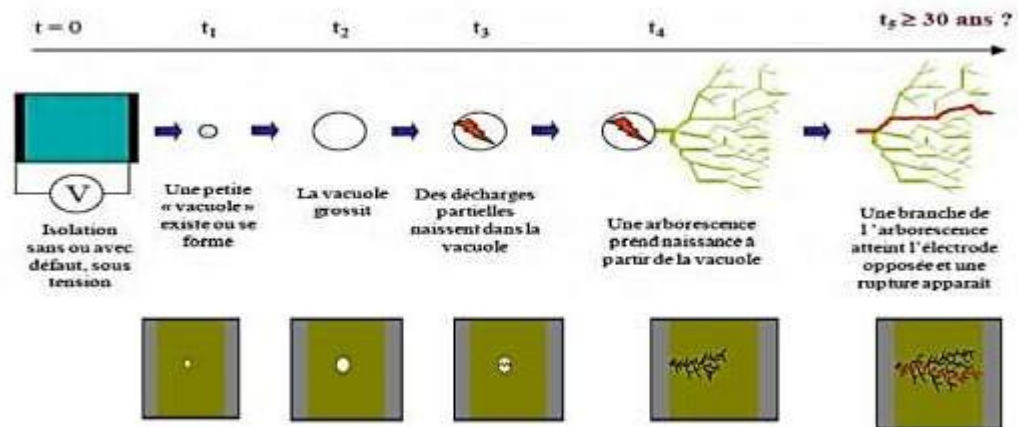


Figure III.9 : Effet de la décharge partielle.

Les phénomènes d'arborescences sont des facteurs précurseurs du vieillissement du diélectrique. Ils constituent une dégradation permanente des matériaux et sont étroitement associés au claquage et à la destruction de tout l'appareillage électrique.

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.

Ce phénomène destructeur peut apparaître sans qu'on le sache dans l'isolation et évoluer pendant plusieurs années jusqu'à la destruction comme le montre la figure III.10 sur une section de l'isolation d'un câble.

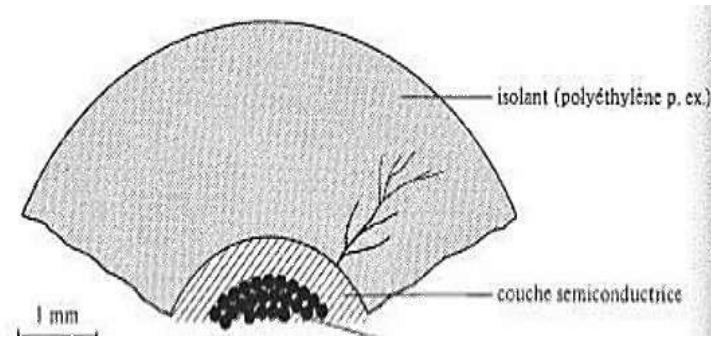


Figure III.10 : Phénomène d'arborescence.

En général, le claquage des isolants solides n'est pas accompli par la formation d'un seul canal de décharge, mais prend une forme à arbre comme montré à la figure suivante, ce qui peut être aisément démontré dans un laboratoire en appliquant une tension d'impulsion entre les électrodes pointe-plan avec la pointe introduite dans un isolant transparent, par exemple le plexiglas.

Le temps requis pour ce type de décharge sous une tension alternative varie de quelques secondes à quelques minutes.

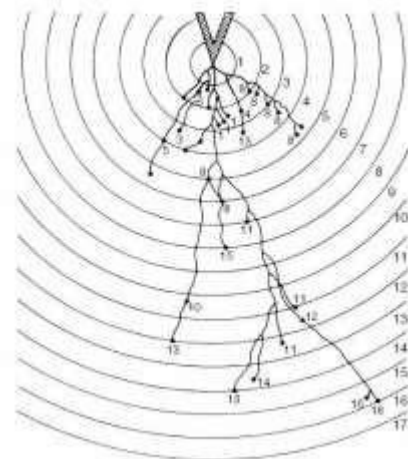


Figure III.11: Claquage d'un isolant solide « claquage dans le plexiglas entre deux électrodes pointe-plan.

5. Paramètres influent sur la dégradation

5.1. Forme des électrodes

La tension de rupture dépend :

- ✓ de la distance inter électrode ;
- ✓ de la géométrie des électrodes qui déterminent la configuration du champ électrique.

C'est un des facteurs qui influence le plus la tenue diélectrique d'un gaz. La forme électrodes utilisées pour appliquer une tension sur le gaz peut être très variée, elle joue fortement sur la distribution du champ électrique dans l'espace.

5.2. Homogénéité du champ appliquée

On distingue deux cas majeurs :

- Si le champ électrique est constant en tout point de l'espace inter-électrode, on parle d'un champ homogène, ou uniforme.
- Lorsque le rayon de courbure d'une des électrodes est très faible (situation trouvée dans des géométries pointe/plan, fil/cylindre), le renforcement du champ électrique au niveau de l'électrode de faible rayon est très important. Le champ est alors fortement inhomogène ou non uniforme. Le claquage peut intervenir suivant la pression et le type de gaz testé.

5.3. Nature de tension

De la forme de l'onde de tension, de la fréquence et de son mode d'application par palier ou par rampe.

Des essais effectués sur des échantillons de câbles ont montré que la tension de claquage est plus importante en continue que en alternatif.

5.4. Influence de la température

L'augmentation de la température dans les isolants solides ou gaz provoque des pertes diélectriques importantes par l'accélération des phénomènes d'ionisation soit par collision, thermique ou par conduction, la température d'un isolant conduit à doubler sa vitesse de vieillissement.

L'élévation de température est provoquée par les pertes diélectriques et l'échauffement des conducteurs, la chaleur est difficilement évacuée à l'extérieur à cause de la faible conductivité thermique des matériaux isolants solides.

5.5. Influence de la pression

En champ non uniforme, l'augmentation de la pression du gaz s'accompagne en général d'une augmentation de la tension de claquage.

Avec l'augmentation de la pression les molécules et les porteurs de charges se rapprochent et l'avalanche électronique se réduit à cause de la faible vitesse des électrons à travers le milieu.

5.6. Influence des impuretés

L'influence des impuretés, principalement l'humidité (la vapeur d'eau) sur la tension de claquage des gaz dépend fortement de la géométrie des électrodes (distribution du champ électrique), de la nature et de la pression des gaz.

La présence des particules étrangères dans les milieux isolants peut favoriser les phénomènes d'apparition de décharges électriques, dans les isolants solides, ces particules sont la cause principale de la décharge partielle.

Lors de la conception, du contrôle ou de la maintenance des systèmes électriques isolés au gaz, des particules étrangères (métalliques) de différentes tailles peuvent apparaître dans l'enceinte du système (entre les électrodes). Une variation de tension provoque le déplacement de ces particules dans l'intervalle inter-électrode causant ainsi la modification du champ appliqué et favorisant la décharge.

5.7. Influence d'autres paramètres

Autres paramètres peuvent influencer sur la dégradation des matériaux isolants, tel que souvent du métal des électrodes, de l'état de la surface des électrodes.

6. Conclusion

Généralement, les gaz sont considérés comme des isolants parfaits car ils ne contiennent qu'une concentration infime de porteurs de charge.

Les causes du claquage des solides sont diverses parmi eux :

- Causes d'origine électrique : des charges électriques sont injectées par les électrodes ou proviennent par dissociation de particules dans le volume du matériau.
- Claquage d'origine thermique : à l'origine il existe un phénomène électrique conduisant à un échauffement du matériau.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons principalement traité le problème fondamental lié aux propriétés d'isolation des systèmes énergétiques, tel que, l'origine de nombreux défauts auxquels sont confrontés les utilisateurs d'équipements électriques.

Les décharges électriques dans les gaz sont liées aux plusieurs facteurs de base, dont la pression du gaz, la distance entre les électrodes, et le champ électrique appliqué, et les décharges électriques dans les solides sont fortement liées à la température au quelle sont exposés ces isolants.

Lorsqu'un champ électrique d'amplitude suffisante est appliqué, un courant nettement plus important est détecté, c'est la décharge électrique qui peut conduire au claquage. En fonction des conditions expérimentales (pression, répartition du champ électrique, type de tension appliquée, etc.).

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

Les équipements électriques utilisés dans les systèmes énergétiques peuvent avoir des diminutions de leur rigidité diélectrique, et réduisent ainsi la fiabilité de ces systèmes (alternateurs, réseaux électriques et équipements).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] J. PASTEAU, « Cahier Technique Merlin Gerin », N°127 : Introduction à l'appareillage très haute tension, édition juin 1984.
- [2] A.TILMATINE, «Techniques de la Haute Tension», support de cours, 2017.
- [3] S. VITET, «La pollution des isolateurs,», EDF-Epure, Juillet, 1990.
- [4] F. BELOUCIF, «Analyse et prédiction des seuils d'apparition des décharges couronnes dans les gaz isolants en haute tension », Thèse de doctorat, université 8 Mai 1945 – Guelma, 2017.
- [5] T. Sayoud. , R. Zaidi, « Etude des décharges électriques produites dans les isolants solides et gaz », mémoire de fin d'études de Master2, université 8 Mai 1945-Guelma, 2017/2018, pp 35-42.
- [6] N. Azzi, «Contribution à l'étude théorique du claquage électrique dans les mélanges de Gaz électronégatifs », Thèse de doctorat, université Paul Sabatier de Toulouse, 1987.
- [7] Z. Mounir, I. Souami, « étude de la tenue diélectrique du matériau polyéthylène utilisé dans l'isolation électrique », université A. Mira-Bejaia , 2017.
- [8] J. J. O D'wyer, «The theory of dielectric breakdown of solids», Oxford University Press, London, 1964.
- [9] H. Miller, «An introduction to high voltage experimental technique», textbook for electro engineers, - 1. cd. - Braunschweig: Vieweg, 1978, pp 135-145.
- [10] K. Dieter, K. Hermann., «High –Voltage Insulation Technology», textbook for electro. Engineers, Transl. from the German by Y. Narayana Rao. -Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1985, pp.38-40.
- [11] J.M, Wetzer, «Vacuum Insulation: Fundamental and Applications», IEEE, Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6 No. 4 , August 1999 , p. 393 .
- [12] R.V. Latham, « Pre - breakdown electron emission », IEEE, Trans. EI – 18, 1983, pp. 194 – 203 .

[13] H. Miller, «Electrical Discharges in Vacuum», 1877 – 1979 ” , IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 25 No. 5 , October, 1990 .

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