

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 : MEHIRA Youssouf

SAANIA Fakher el islam

Sous la direction de Pr. LEMZADMI Ahcene

Thème

Etude des décharges électriques

Soutenu publiquement, le 14/07 /2021, devant le jury composé de:

M. LEMZADMI Ahcene	Professeur	Univ.Guelma	Président/ Encadreur
M. BOUDEFEL Amar	MCA	Univ.Guelma	Examineur
M. BELOUCIF Faissel	MCB	Univ.Guelma	Examineur principal

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 **Pr. AHCENE LEMZADMI**, pour ses précieux conseils, son aide et sa disponibilité.

Nous tenons tout particulièrement à remercier les enseignants du département de **Génie Électrotechnique et Automatique** 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.

Sommaire

Sommaire:

Introduction générale	01
CHAPITRE 1 – Généralités sur les isolants électriques	
I. Généralités sur les isolants électriques	03
I.1. Définition	03
I.2. Types d'isolants	04
I.2.1. Les isolants solides	04
I.2.1.1. Application des principaux isolants	06
I.2.1.2. Etude comparative entre l'EPR contre XLPE	06
I.2.2. Les isolants liquides	07
I.2.3. Les isolants gazeux	08
I.2.3.1. L'air	08
I.2.3.2. L'azote	09
I.2.3.3. L'hexafluorure de soufre ou SF ₆	09
CHAPITRE II – Grandeurs électriques des isolants diélectriques	
II. Grandeurs électriques des isolants diélectriques	12
II.1. La conductivité électrique	12
II.1.1. Conductivité transversale	12
II.1.2. Conductivité superficielle	12
II.2. Permittivité diélectrique	13
II.2.1. Polarisation atomique	14
II.2.2. Polarisation ionique	14
II.2.3. Polarisation par orientation	15
II.2.4. Polarisation interfaciale	15
II.2.5. Permittivité du vide	15
II.2.6. Permittivité d'un milieu	16
II.2.7. Permittivité relative de quelques isolants	16
II.3. Facteur de pertes	17
II.3.1. Valeurs de facteur de pertes	17
II.4. Rigidité diélectrique	18
II.4.1. Définition	18
II.4.2. Valeurs de rigidité diélectrique	18
II.4.3. Rigidité diélectrique du SF ₆	18
II.5. Décharges partielles (DP)	19
II.5.1. Définition	19
II.5.2. Mécanisme des décharges partielles	19
II.5.3. Charge apparente	20
II.5.4. Détection des décharges partielles	21

CHAPITRE III – Théorie de claquage dans les isolants diélectriques

III. Théorie de claquage dans les isolants diélectriques	23
III.1. Claquage diélectrique dans un gaz	23
III.1.1. L'avalanche électronique	23
III.1.2. Théorie de Townsend	23
III.1.2.1. Mécanismes de claquage	23
III.1.2.2. Critère de claquage	24
III.1.3. Théorie du canal (Streamer)	24
III.1.3.1. Mécanismes de claquage	24
III.1.3.2. Critère de claquage	25
III.1.4. Courbes de Paschen	26
III.1.4.1. Critère basé sur les courbes de Paschen	26
III.2. Claquage des Isolants Solides	28
III.2.1. Mécanisme Electrique	29
III.2.2. Mécanisme Thermique	29
III.2.2.1. Rupture locale	29
III.2.2.2. Rupture globale	30
III.2.3. Mécanisme Streamers	30
III.2.4. Rupture par Arborescence	31
III.2.5. Rupture par Erosion (Décharges Partielles)	32
III.2.6. Claquage intrinsèque	32
III.2.7. Claquage associé	32
III.2.8. Claquage par avalanche	32
III.2.8. Claquage électromécanique	32
III.3. Claquage dans les liquides	33
III.3.1. Claquage Electronique	34
III.3.2. Claquage en phase gazeuse	35
III .3.2.1. Mécanisme thermique	35
III.3.2.2. Claquage par cavitation	36
III.3.3. Claquage par pont de particules	37
III.3.4. Claquage par mouvement électro-hydrodynamique. Electrification des liquides isolants	38
III.3.5. Claquage des grands intervalles d'huile	39
III.4. Détermination des pressions de fonctionnement du mélange SF ₆ -N ₂	39
Conclusion générale	44
Bibliographie	46

Introduction

Introduction

Introduction:

Les matériaux dits diélectriques ou isolants sont très présents dans le domaine du génie électrique. Citons quelques exemples d'application: la protection des personnes, la protection contre les claquages, le stockage de charges...

Dans le génie électrique, Le rôle assigné aux matériaux diélectriques consiste à exercer une fonction d'isolation électrique entre pièces métalliques portées à des potentiels différents. Ces matériaux peuvent se présenter sous forme solide, liquide ou gazeuse. Outre ce rôle d'isolation, il arrive que l'on mette à profit une autre caractéristique de ces matériaux très utile pour le stockage de l'énergie. C'est le cas lors de l'utilisation de ces matériaux dans la confection des condensateurs dont on cherche à augmenter la capacité par des matériaux à haute permittivité.

Le présent travail de mémoire de master, se divise en en trois chapitres. Dans le premier chapitre nous avons fait un rappel sur les différents isolants diélectriques (diélectrique solides, gazeux et liquide).

Le deuxième chapitre, est consacré aux différentes grandeurs et certaines lois élémentaires telles que la loi relative aux pertes diélectriques. Nous avons également abordé la permittivité et le phénomène de polarisation diélectrique en expliquant succinctement les différents processus la gouvernant. En dernier lieu nous avons évoqué les décharges partielles d'une façon succincte.

La théorie de calquage des diélectriques isolants pour les isolants solides, liquides et gazeux a été abordée au troisième chapitre. Une attention particulière est donnée aux isolants gazeux et spécialement les mélanges hexafluorure de soufre et azote ($\text{SF}_6\text{-N}_2$). Une étude sur la possibilité du remplacement du SF_6 par un mélange de 10% SF_6 -90% N_2 a été proposée avec la pression correspondante.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale où sont exposés les résultats de nos travaux.

Chapitre I :
Généralités sur les
isolants électriques

I. Généralités sur les isolants électriques:

I.1 Définition:

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée : 10^8 'a 10^{16} $\Omega.m$, car ils contiennent très peu d'électrons libres.

Un diélectrique est une substance dont la propriété électromagnétique fondamentale est d'être polarisable par un champ électrique[1].

Un isolant est une substance dans laquelle la bande de valence est une bande pleine séparée de la première bande d'excitation par une bande interdite d'une largeur telle que, pour faire passer dans la bande de conduction des électrons de la bande de valence, il faut une énergie assez grande pour entraîner une décharge disruptive[1].

La couche de valence d'un atome représente une bande d'un certain niveau énergétique et que les électrons de valence sont confinés à cette bande. Lorsqu'un un électron acquiert assez d'énergie additionnelle d'une source externe, il peut quitter la couche de valence, devenir un électron libre et exister dans ce que l'on désigne comme étant la bande de conduction.

En terme d'énergie, la différence entre la bande de valence et la bande de conduction est appelée un écart énergétique.

La figure .1, montre les diagrammes d'énergie pour un isolant, semi-conducteur et métal.

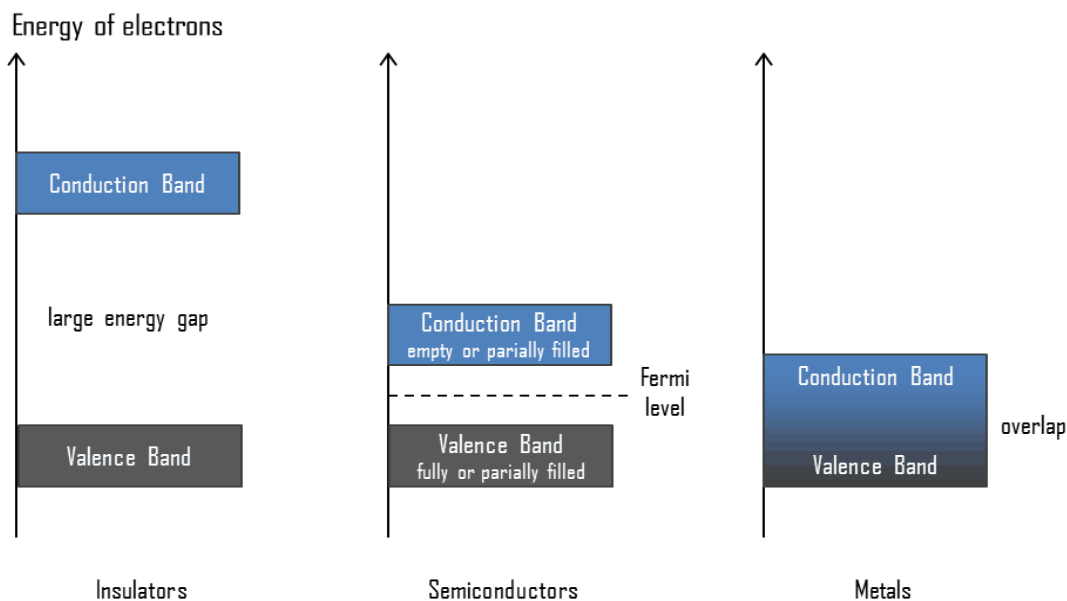


Figure I.1 : Diagramme d'énergie.

I.2 Types d'isolants:

On distingue deux types d'isolants selon leur mode de formation.

- Isolants naturels
 - minéraux;
 - organiques.
- Isolants synthétiques
 - matières plastiques
 - élastomères;
 - composites.
- Les isolants sont classés en trois types selon leur nature
 - solides
 - liquides
 - gazeux

I.2.1 Les isolants solides:

✓ Les polymères:

Les polymères (appelés plastiques dans la vie courante), formés par assemblages d'un grand nombre de monomères identiques, se répartissent en deux grandes catégories :

✓ Les thermoplastiques:

Les thermoplastiques, structures chimiques à deux dimensions qui se ramollissent plus ou moins lorsque la température augmente, cela de manière quasiment réversible. Inversement, lorsque la température baisse, les thermoplastiques passent par une transition vitreuse et deviennent alors tout à fait rigide. En général la transition vitreuse des plastiques utilisés quotidiennement survient à une température T_v plus élevée que la température ambiante [2].

Tableau I1: température de la transition vitreuse [2].

Polymère	T_v [°C]
Teflon (polyfluoroéthylène)	327
Polycarbonate	145
Plexiglas (polyméthylmétacrylate)	114
Polystyrène	100
PVC (polyvinyle chloride)	85
PET (polyéthylène téréphtalate)	76
Nylon	47

Toutefois, certains thermoplastiques, font exception et sont utilisé pour leur souplesse à température ambiante, en particulier comme emballage.

Les principaux thermoplastiques utilisés comme isolants en haute tension sont le polystyrène (isolation de condensateur), le polyéthylène (PE) que l'on trouve sous différentes formes – polyéthylène basse densité (LDPE) ou haute-densité (HDPE), ainsi que le polyéthylène réticulé (XLPE) et le téflon, très cher, et surtout utilisé pour des câbles moyennes tensions qui sont soumis à des contraintes de dimensionnement. Il supporte en effet des champs électriques très intenses tout

en présentant une certaine souplesse. Certains thermoplastiques synthétiques ont été développés spécialement pour leur résistance à la chaleur. Ils servent de substituts à l'amiante et à la cellulose. Ces produits sont connus sous leurs noms commerciaux : Nomex, Kevlar, Prespan..., et sont couramment utilisés en haute tension, en combinaison avec des huiles isolantes (du fait de leur porosité)[2].

✓ **Les thermodurcissables:**

Structures chimiques à trois dimensions, qui durcissent de manière irréversible lorsque la température augmente, sous l'effet d'une réaction chimique particulière. Beaucoup de ces matériaux sont appelés résines mais pour ces dernières, la réaction chimique qui assure le durcissement peut être induite par un catalyseur. De telles résines sont utilisées en haute tension pour « noyer » un dispositif dans l'isolant, comme on le fait par exemple pour des transformateurs de mesure. De telles isolations ne demandent aucun entretien et durent des dizaines d'années, tout au moins en utilisation intérieure. En revanche, à l'extérieur, les résines subissent une corrosion due aux effets combinés du champ électrique et des variations météorologiques. Elles ont en outre l'inconvénient de présenter des pertes diélectriques relativement importantes, et excluent toute possibilité de réparation de l'objet [2].

✓ **Polymérisation:**

La polymérisation est un processus au cours duquel des molécules de relativement petite taille se lient les unes aux autres pour former des chaînes. Il s'agit essentiellement d'un processus chimique obtenu par des réactifs appropriés, dans des conditions de température spécifiée. La polymérisation est généralement obtenue par un processus chimique, en présence de catalyseurs appropriés et dans certaines conditions de température. Le degré de polymérisation est quantifié par le nombre de monomères présents dans les chaînes du polymère peut atteindre généralement plusieurs milliers [2].

✓ **Réticulation:**

La réticulation consiste en un branchement de chaînes de polymères entre elles, par des ponts ou des liaisons chimiques, sous l'action par exemple de radiations, et cela afin de constituer un réseau de masse moléculaire plus élevée. Le polymère réticulé présente des propriétés physico-chimiques différentes du polymère initial. On caractérise l'efficacité du processus par le taux de réticulation : fraction d'unités de la chaîne effectivement pontées, par rapport au nombre total d'unités. Les câbles à haute tension sont souvent isolés au polyéthylène réticulé (XLPE). Il présente l'avantage de supporter des températures plus élevées que le polyéthylène non réticulé. Selon le procédé utilisé, le taux de réticulation va de 70% à 90%. Le caoutchouc synthétique EPR peut aussi être réticulé [2].

✓ **Les élastomères:**

Les élastomères sont caractérisés par leur élasticité exceptionnelle. Il existe des élastomères thermoplastiques, qui présentent une transition vitreuse à une température inférieure à la température ambiante, et des élastomères thermodurcissables ou chez lesquels le durcissement est obtenu par un catalyseur. Le caoutchouc naturel est un élastomère tiré d'une sécrétion de latex produite par l'hévéa, un arbre originaire d'Amazonie, exploité depuis 3000 ans. Toutefois, le caoutchouc naturel se comporte comme un liquide visqueux et collant, tant qu'il ne subit pas une vulcanisation : procédé thermo-chimique de pontage des chaînes du polymère (en présence de soufre), qui permet d'en faire un solide élastique. La plus remarquable propriété du caoutchouc est en effet son élasticité, soit la capacité de s'allonger de plus de 600%, et de manière réversible, sous

l'effet d'une force extérieure. Les pneus des voitures constituèrent la première application industrielle du caoutchouc. La demande croissante en élastomères a conduit à l'élaboration de caoutchoucs synthétiques, dont il existe trois principales sortes :

Le Néoprène, qui est le nom commercial de la famille des polychloroprènes, a été obtenu par polymérisation du chloroprène pour la première fois en 1931 aux États-Unis. Le Néoprène, vingt fois plus cher que le caoutchouc synthétique, est en particulier utilisé comme joint d'étanchéité, du fait qu'il résiste bien aux huiles et aux graisses ; mais sa résistance à toutes sortes de produits corrosifs le prédisposent à de nombreuses applications, telles des combinaisons vestimentaires professionnelles, des bottes, des gants, des récipients, des boîtiers d'appareils, etc[2].

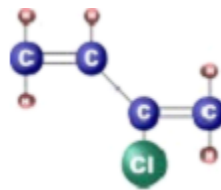


Figure I.2: Chloroprène [2].

I.2.1.1 Application des principaux isolants:

✓ Le SBR (styrene-butadienerubber) a été développé en Europe à partir de 1955, pour concurrencer le Néoprène. Certaines de ses variantes présentent une très bonne résistance mécanique ce qui en fait un matériau de choix pour les pneumatiques des voitures.

✓ l'EPR (Éthylène-Propylène-Rubber) a également de nombreuses applications et il est couramment utilisé comme isolation des câbles à haute tension, et même à très haute tension. Sa température T_v de transition vitreuse se situe vers -50°C [2].

✓ XLPE Un câble électrique à haute tension est un câble utilisé pour le transport d'électricité, que ce soit en courant alternatif ou en courant continu. Il est composé de différentes parties assemblées de manière concentrique, les principales sont : au centre un conducteur permet de transporter l'électricité, ensuite vient une isolation électrique pour empêcher le courant de s'écouler vers la terre, le tout est entouré d'une gaine métallique afin de confiner le champ électrique à l'intérieur du câble et d'une protection extérieure qui assure de bonnes propriétés mécaniques et le protège des agressions extérieures. Les câbles électriques à haute tension, utilisés pour des liaisons souterraines ou sous-marines est donc à distinguer des Conductrices hautes tensions pour Ligne à haute tension qui eux ne comportent pas d'isolation [3].

I.2.1.2 Étude comparative entre l'EPR contre XLPE:

Le caoutchouc synthétique de type EPR s'est imposé dès la fin des années 70 dans les réseaux moyenne tension (MT) et haute tension (HT), pour l'isolation des câbles.

Effet de réticulation. XLPE est l'abréviation reconnue de polyéthylène réticulé. Ce matériau et d'autres matériaux synthétiques réticulés, dont l'EPR (caoutchouc éthylène-propylène) en est un exemple notable, sont de plus en plus utilisés comme isolants de câbles pour une large gamme de tensions[2].

✓ Avantages de l'EPR:

- sa flexibilité ;
- sa bonne tenue thermique (120°C) ;
- peut être sujet aux arborescences d'eau[2].

✓ **Inconvénients de l'EPR:**

- fabrication et mise en forme relativement complexe.
- pertes diélectriques 4 à 5 fois plus élevées[2].



Figure I.3: Câble 12kV à isolation XLPE [2].

Aujourd'hui, les fabricants préfèrent offrir des câbles XLPE, du fait que la fabrication en est plus simple. Cette situation ne fait pas le bonheur des exploitants de réseaux électriques, qui déplorent le manque de flexibilité de ces câbles (difficultés lors de la pose) et leur température de fonctionnement limitée à 90°C (problème en cas de surcharge momentanée du réseau) [2].

I.2.2 Les isolants liquides:

• **Les huiles minérales:**

Les huiles minérales, dont les molécules sont basées sur des composés de carbone et d'hydrogène, sont utilisées en haute tension dans les transformateurs (puissance, distribution, mesure), dans les condensateurs et dans les appareils de coupure (disjoncteurs, sectionneurs). Leur première qualité est de pouvoir supporter des champs électriques élevés (rigidité diélectrique). Par ailleurs, elles sont généralement très fluides, de manière à assurer, en plus de l'isolation électrique, le refroidissement par convection naturelle ou forcée. C'est le cas en particulier dans les transformateurs de puissance où la chaleur doit être efficacement évacuée. Or les huiles s'épaississent lorsque la température baisse (leur viscosité augmente) et au-dessous d'une certaine température, appelée point d'écoulement, elle ne coule plus du tout. Les huiles minérales couramment utilisées présentent l'avantage d'être utilisables jusque vers - 40°C. À l'inverse, à température élevée, le risque existe toujours de voir l'huile prendre feu; les grandes quantités d'huile présentes dans un transformateur de puissance, par exemple, constituent donc évidemment un risque d'incendie. Enfin, compte tenu de la longue durée de vie des équipements utilisés dans les réseaux d'énergie électrique, on attend de ces huiles qu'elles conservent des spécifications électriques acceptables durant plusieurs décennies. Ainsi, les principaux paramètres servant à caractériser les performances d'une huile utilisée comme isolant sont :

- ❖ rigidité diélectrique (de 20 à 30 kV/mm).
- ❖ viscosité cinématique (de 3 à 16 mm² /s à 40 °C ; jusqu'à 1800 mm² /s à - 30°C).
- ❖ point d'écoulement (de - 30 à - 60°C).
- ❖ point d'éclair ou : point d'inflammabilité (de 95 à 140 °C).
- ❖ stabilité physico-chimique .[4]

• **Les huiles végétales:**

Pour des raisons économiques (épuisement des ressources en pétrole, augmentation progressive de son prix) et aussi écologiques (biodégradabilité), de nombreuses recherches tentent de trouver des huiles végétales de substitution. Différentes plantes ont été testées à cette fin : le colza, le tournesol, l'arachide, l'olive, le ricin, etc. C'est ainsi qu'Électricité de France (EDF) a mis en service en 2008, douze transformateurs isolés à l'huile de colza, dans la région Poitou-

Charentes.

Plusieurs problèmes se posent toutefois:

- Le fait que les huiles végétales se solidifient déjà vers -15°C . Une entreprise québécoise (Oléotek) a toutefois développé une huile végétale liquide jusqu'à -75°C .
- La stabilité physico-chimique : les huiles végétales sont généralement moins stables chimiquement (oxydation) et plus sensibles aux rayonnements ultraviolets que les huiles minérales (raison pour laquelle on met les huiles alimentaires dans des bouteilles opaques).
- Les huiles végétales passent pour être plus chères que les huiles minérales : à voir à l'avenir, selon l'évolution des prix du pétrole [4].

- **Le cas des PCB:**

Parmi les additifs célèbres, il faut citer les PCB (polychlorobiphényles, qui existent sous 209 formes différentes). Ces produits ont été largement utilisés en raison de leur résistance au feu et de leur faible coût. Ils permettaient ainsi d'atténuer un défaut des huiles isolantes qui est leur haute inflammabilité, avec des dégagements de chaleur qui atteignent 50 MJ/kg . À titre de comparaison, le bois produit environ $3,5\text{ MJ/kg}$. Toutefois, les PCB sont totalement interdits, au niveau international, depuis plus de vingt ans, en raison de leur toxicité : ils s'accumulent progressivement dans le corps, aussi bien que dans l'environnement, ils causent des dégâts à pratiquement tous les organes, de la peau aux reins, en passant par le foie, la rate et le cerveau ou encore le système immunitaire. L'élimination des transformateurs et des condensateurs contenant des PCB n'est pas encore totalement achevée, la durée de vie de ces équipements pouvant aller jusqu'à un demi-siècle. Tous les équipements présentant des concentrations de PCB dans l'huile supérieures à 500 ppm devront toutefois être éliminés d'ici l'an 2010.

- **Les additifs:**

Les huiles contiennent des additifs, destinés à améliorer les différents paramètres mentionnés précédemment. Il s'agit principalement:

- des antioxydants, qui servent à retarder la dégradation physico-chimique des huiles ;
- des abaisseurs de point d'écoulement, qui améliore les caractéristiques à basse température ;
- les retardateurs de flamme, qui vise à réduire le risque d'incendie.

I.2.3 Les isolants gazeux:

Les principaux gaz isolants sont: Air, azote, gaz carbonique (CO_2), hexafluorure de soufre (SF_6).

Les isolants gazeux peuvent être mélangés dans différentes proportions et sont utilisés sous différentes pressions. Le vide n'est jamais totalement vide. Les phénomènes qui s'y déroulent dépendent de manière critique des traces de gaz résiduelles et aussi des impuretés présentes sur les électrodes, que le champ électrique, à partir d'une certaine intensité, peut vaporiser dans l'intervalle supposé vide.

Le vide a été considéré comme un bon conducteur jusqu'à la fin du 19e siècle! La raison en est que les pompes à vide ne permettaient d'obtenir qu'un gaz plus ou moins raréfié, dans lequel les ions ont une mobilité élevée.

I.2.3.1. L'air :

Tous les gaz sont isolants à la température ambiante, l'air est le plus utilisé, à la pression atmosphérique ou sous pression. Comprimé à 10 bars, sa rigidité diélectrique est de 225 kV/mm , à la pression atmosphérique elle n'est que de 3 kV/mm . Isolation des lignes aériennes, disjoncteurs pneumatiques, condensateurs à air.

I.2.3.2 L'azote:

L'azote est chimiquement neutre. Transformateurs à atmosphère d'azote sous pression, câbles HT, parafoudres.

I.2.3.3 L'hexafluorure de soufre ou SF₆ :

L'hexafluorure de soufre ou SF₆ est un gaz artificiel largement utilisé dans les équipements électriques de haute tension. Il est incolore, inodore, non combustible et chimiquement très stable. Il ne réagit donc pas avec d'autres substances à température ambiante. Sa grande stabilité est basée sur l'arrangement symétrique parfait de ses six atomes de fluor autour de son atome de soufre central.

C'est précisément cette stabilité qui rend ce gaz très utile dans l'industrie. Le SF₆ est un excellent isolant électrique et peut efficacement éteindre un arc électrique. Cela l'a rendu très populaire et c'est pourquoi on trouve aujourd'hui des milliers d'équipements électriques dans le monde entier en moyenne et haute tension qui l'utilisent.

Le SF₆ dans sa forme pure n'est pas toxique ni dangereux lorsqu'il est inhalé, mais comme il est presque six fois plus lourd que l'air, dans les environnements fermés il déplace l'oxygène et par conséquent il y a un risque de suffocation pour les personnes [5].

- **En quoi et comment le SF₆ est-il utilisé?:**

Le SF₆ est utilisé comme gaz isolant dans les postes sous enveloppe métallique (PSEM), comme isolant et moyen de refroidissement dans les transformateurs de puissance et comme isolant et moyen d'extinction dans les interrupteurs haute et moyenne tension. Toutes ces applications sont des systèmes fermés, très sûrs et idéalement sans possibilité de fuite.

Dans le cas des interrupteurs, ils doivent être capables d'interrompre les courants de défaut des systèmes d'alimentation électrique pour lesquels ils ont été conçus. Le SF₆ remplit efficacement les fonctions d'agent d'isolation et d'extinction en raison de sa capacité calorifique élevée et de ses propriétés électronégatives. Les postes sous enveloppe métallique se trouvent généralement dans les zones urbaines ou avec de fortes contraintes d'espace.

Ces postes réduisent considérablement le champ magnétique et éliminent complètement le champ électrique. C'est un avantage important pour les installateurs, le personnel de maintenance et les personnes qui peuvent vivre à proximité d'un PSEM. Le SF₆ est également utilisé dans d'autres types d'applications, comme dans l'industrie métallurgique, par exemple pour la purification du magnésium. Le SF₆ peut être utilisé comme agent d'extinction d'incendie car il n'est pas combustible et qu'il a une capacité thermique élevée. Pour les applications électriques, le SF₆ n'est utilisé que dans des systèmes fermés et, dans des conditions normales, ne fuit pas [5].

- **Quels sont les avantages du SF₆ ?:**

Le SF₆ fournit une excellente isolation électrique et une résistance très efficace aux arcs électriques. Ces propriétés étonnantes permettent de construire un équipement très compact qui utilise moins de matériaux, est plus sûr et a une durée de vie plus longue. Le SF₆ a une résistance diélectrique 2,5 fois supérieure à celle de l'air pour les pressions atmosphériques. Il est généralement utilisé entre 3 et 5 fois la pression atmosphérique et dans ce cas la force diélectrique atteint jusqu'à 10 fois celle de l'air.

Le SF₆ est un excellent isolant car il est fortement électronégatif. Cela signifie que les molécules de gaz piègent les électrons libres formant des ions négatifs très forts et qu'ils n'ont pas beaucoup de mobilité. C'est très efficace contre les avalanches d'électrons qui peuvent causer un embrasement.

Cette propriété le rend particulièrement utile pour éteindre l'arc électrique à l'intérieur de la chambre d'un interrupteur. Lors de la dissociation du SF₆, il faut une grande énergie pour obtenir un effet de refroidissement.

Les postes sous enveloppe métallique sont utilisées là où les contraintes d'espace sont importantes et ne nécessitent pratiquement aucun entretien. Les équipements électriques isolés avec du gaz SF₆ ont été utilisés avec succès au cours des 40 dernières années et avec de très bons résultats [5].

- **Le SF₆ est-il dangereux pour l'atmosphère:**

Certains gaz libérés détruisent la couche d'ozone. L'amincissement de la couche d'ozone signifie qu'une plus grande quantité de lumière ultraviolette peut atteindre la surface de la terre, causant, entre autres choses, l'augmentation des cancers de la peau. Les gaz qui affectent la couche d'ozone contiennent tous du chlore. Le SF₆ ne contient pas de chlore dans sa formule et n'endommage donc pas la couche d'ozone.

Le terme effet de serre est utilisé pour décrire le lent réchauffement de l'atmosphère dû à l'émission de gaz d'origine humaine. Certaines molécules de gaz dans l'atmosphère, principalement le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄), réfléchissent les ondes de radiation thermique émises par la terre et par conséquent la chaleur est piégée dans l'atmosphère au lieu d'être dissipée dans l'espace.

La molécule de SF₆ est hautement réfléchissante et contribue à l'effet de serre, mais sa concentration est extrêmement faible. Cela signifie que la contribution du SF₆ au réchauffement de la planète est très faible, inférieure à 0,1% de l'effet total en comparaison au dioxyde de carbone qui contribue à 60% [5].

- **Le SF₆ peut-il être réutilisé ?:**

Aujourd'hui, les équipements utilisant le SF₆ sont très sûrs et, dans des conditions normales, ne doivent pas libérer de gaz dans l'atmosphère. L'équipement est surveillé en permanence et toute fuite doit être détectée tôt et corrigée. Dans le cas où l'équipement doit être ouvert, le gaz peut être recompressé dans une cuve et après un simple processus de filtrage, il peut être réutilisé. Il existe divers équipements qui permettent la manipulation de SF₆ soit en grande quantité lorsqu'il s'agit des postes sous enveloppe métallique mais il existe aussi des équipements pour manipuler de plus petites quantités. Le gaz contaminé peut être nettoyé et filtré par un fournisseur de gaz spécialisé et réutilisé à nouveau. Si le gaz n'est plus utilisé, il peut être détruit en le chauffant avec du calcaire dans un four à haute température. Avec ce processus, le gaz est transformé en deux sous-produits appelés gypse et spath fluor qui sont non toxiques, naturels et totalement inoffensifs pour l'environnement [5].

Chapitre II :
Grandeurs
électriques des
isolants diélectriques

II Grandeurs électriques des isolants diélectriques:

Cinq principales grandeurs électriques caractérisent les isolants utilisés en haute tension. La conductivité électrique, de volume ou de surface, qui n'est jamais nulle. La permittivité diélectrique qui varie passablement selon le type de polarisation en jeu. Le facteur de pertes qui relie la conductivité et la permittivité. La rigidité diélectrique, qui joue un rôle primordial en limitant les possibilités d'utilisation d'un isolant.

L'intensité des décharges partielles qui ne caractérise pas le matériau en tant que tel, mais plutôt la qualité du procédé de fabrication, ainsi que sa dégradation au cours du temps [1].

II.1. La conductivité électrique:

II.1.1 Conductivité transversale:

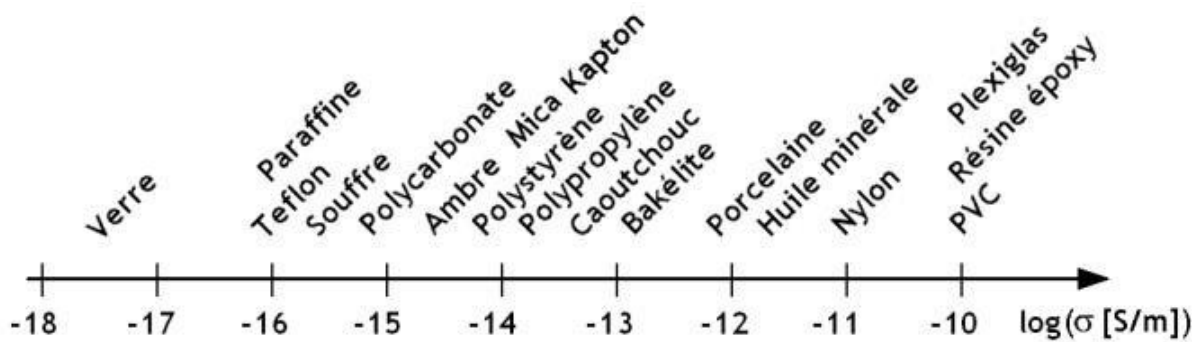


Figure II.1: Conductivité transversale des solides [1].

II.1.2. Conductivité superficielle:

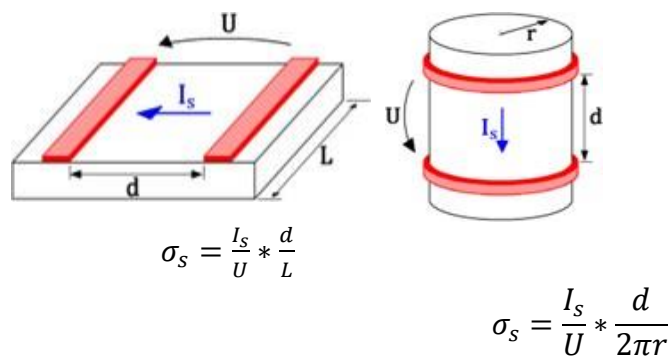


Figure II.2: dispositif permettant de mesurer la conductivité superficielle [1].

II.2. Permittivité diélectrique:

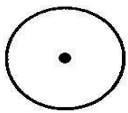
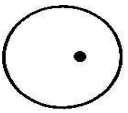
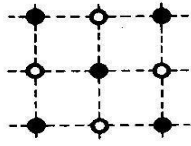
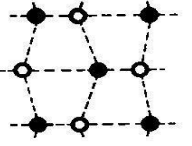
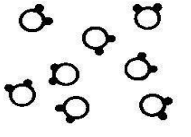
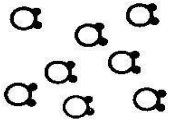

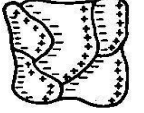
La permittivité traduit l'existence d'un mécanisme de polarisation interne au matériau. Il en existe quatre types de polarisation:






- ❖ Polarisation atomique.
- ❖ Polarisation ionique.
- ❖ Polarisation par orientation.
- ❖ Polarisation interfaciale.

Plusieurs types de polarisation peuvent coexister dans le même matériau [1].

Les plus importants mécanismes concourant à l'apparition de p sont représentés schématiquement dans le tableau II.1.

Tableau II.1: Mécanisme de polarisation.

Type de polarisation	$E = 0$	\xrightarrow{E}
Electronique		
Ionique		
par orientation		
Interfaciale		

 atome noyau	 anion	 cation	 molécule polaire	 grain
--	---	--	---	---

II.2.1. Polarisation atomique:

Maxwell a montré que, pour un solide dans lequel seule intervient la polarisation atomique, la permittivité relative vaut exactement 2. La polarisation atomique concerne tous les matériaux et s'établit en un temps très court, de l'ordre de 10^{-12} à 10^{-15} s[1].

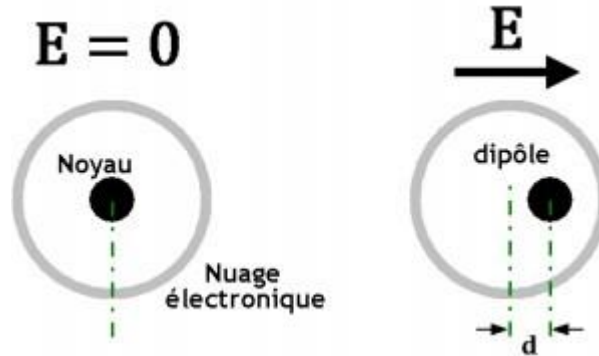


Figure II.3: La polarisation atomique [1].

- Les fréquences concernées sont très éloignées de celles qui interviennent habituellement dans les systèmes à haute tension.

II.2.2. Polarisation ionique:

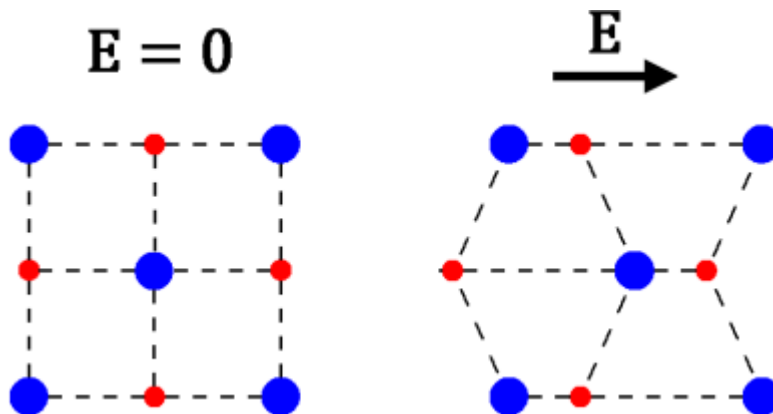


Figure II.4: La polarisation ionique [1].

La polarisation ionique concerne les cristaux (comme le sel par exemple) et s'établit en un temps de l'ordre de 10^{-10} à 10^{-13} s.

II.2.3. Polarisation par orientation:

La polarisation par orientation concerne les molécules polaires comme l'eau par exemple. Certains solides ont aussi des monomères polaires, comme les caoutchoucs ou les nylons, ainsi que certains thermodurcissables, telle la bakélite.

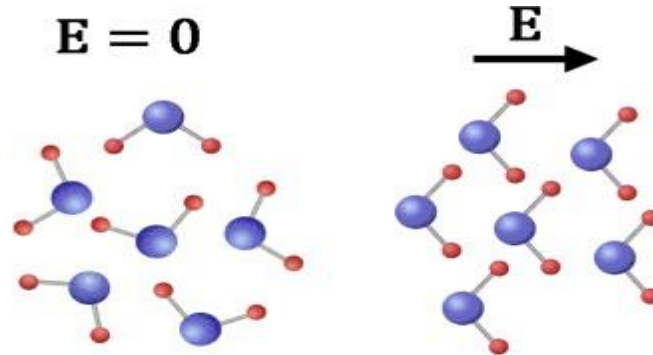


Figure II.5: polarisation par orientation [1]

La polarisation par orientation donne des permittivités particulièrement élevées dans les liquides, du fait de la mobilité des molécules[1].

II.2.4. Polarisation interfaciale:

La polarisation inter faciale concerne les diélectriques formés de grains de différentes natures ou de structures différentes, comportant des charges résiduelles, pour lesquelles les joints de grains constituent une barrière d'énergie. Les charges se déplacent très lentement dans le diélectrique de sorte que le temps d'établissement de cette polarisation va de 10^{-2} s à plusieurs minutes. Ce phénomène apparaît dans certains cristaux mauvais conducteurs comme le BSTO (Baryum – Strontium – Titane – Oxygène, en proportions non stœchiométriques) [1].

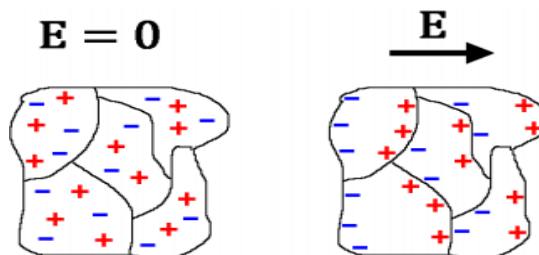


Figure II.6: polarisation interracciale [1].

II.2.5. Permittivité du vide:

La permittivité est exprimée en ampères-seconde par volt par mètre (As/Vm). Elle peut aussi être exprimée par une quantité adimensionnelle: la permittivité relative ou constante diélectrique, normalisée par rapport à la permittivité du vide.

$$\varepsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} \text{ A.s.V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

II.2.6. Permittivité d'un milieu:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_R$$

avec ϵ : permittivité du diélectrique, ϵ_0 : permittivité du vide et ϵ_R : permittivité relative.

Au niveau microscopique, la permittivité d'un matériau est liée à la polarisabilité électrique des molécules ou atomes constituant le matériau.

La permittivité d'un matériau est une grandeur tensorielle (la réponse du matériau peut dépendre de l'orientation des axes cristallographiques du matériau), qui se réduit à un scalaire dans les milieux isotropes. Elle est très généralement complexe, la partie imaginaire étant liée au phénomène d'absorption ou d'émission du champ électromagnétique par le matériau.

La constante diélectrique est également notée k dans le domaine des circuits intégrés et des semi-conducteurs. Les matériaux dits low- k sont des diélectriques à faible permittivité.

II.2.7. Permittivité relative de quelques isolants:

Tableau II.2: Permittivité relative de quelques isolants

Matériaux	Minimal	Maximal
Acétate de cellulose	2.9	4.5
Air	1.0005	22
Bakélite	5	
Bois sec	1.4	2.9
Caoutchouc	2	4
Formica	3.6	6
Gutta-percha	2.4	2.6
Kevlar	3.5	4.5
Mica	4	9
Mica rouge	5.4	
Néoprène	4	6.7
Nylon	3.4	22.4
Papier	1.5	3
Paraffine	2	3
Plexiglas	2.6	3.5
Polycarbonate	2.9	3.2
Polyester	3.3	
Polyéthylène	2.5	
Polyamide	3.4	3.5
Polystyrène	2.4	3
porcelaine	5	6.5
PVC	5	
Pyrex de verre	4.6	5
Quartz	5	5
Résine époxyde	3.4	3.7
Silicone	3.2	4.7
Téflon	2.1	

Verre	3.8	14.5
Vide	1(par définition)	

permittivité de quelques liquides polaires:

Alcool: $\epsilon_r = 25,8$

Glycérine : $\epsilon_r = 47$

Eau : $\epsilon_r = 80$

Huiles minérales : $\epsilon_r = 2 \sim 2,5$.

Permittivité des gaz, du fait de leur faible masse volumique, leurs permittivités sont très proches de 1.

II.3. Facteur de pertes:

□ **Diélectrique en régime sinusoïdal:**

Dans un condensateur comportant un isolant réel, le courant n'est pas en parfaite quadrature avec la tension. On caractérise le condensateur réel par son facteur de pertes: $\text{tg } \delta$ [1].

□ **Relation avec la puissance:**

Le facteur de pertes peut être exprimé à partir des puissances active, P, et réactive, Q : [6]

$$\text{tg } \delta = \text{ctg } \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{UI_{\text{tot}} \cos \alpha}{UI_{\text{tot}} \sin \alpha} = \frac{P}{Q} \dots \dots \dots (2)$$

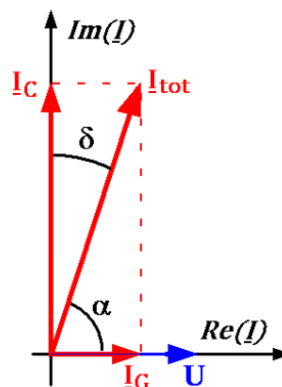


Figure II.7: facteur de pertes.

II.3.1. Valeurs de facteur de pertes:

□ **Solides:**

- ❖ Plexiglas $2 \cdot 10^{-2}$
- ❖ Téflon $2 \cdot 10^{-4}$
- ❖ Polystyrène 10^{-4}
- ❖ Résine époxy $4 \cdot 10^{-3}$
- ❖ Polyéthylène $3 \cdot 10^{-4}$
- ❖ Paraffine $5 \cdot 10^{-5}$

- **Liquide:**
- ❖ Huiles minérales $3 \cdot 10^{-4} \sim 5 \cdot 10^{-3}$
- **Gaz:**
- ❖ Hexafluorure de soufre (SF_6) = $2 \cdot 10^{-7}$ [1]

II.4. Rigidité diélectrique:

II.4.1. Définition:

La rigidité diélectrique est le champ électrique maximal que peut supporter un isolant avant que se produise une décharge disruptive [1].

II.4.2. Valeurs de rigidité diélectrique:

Tableau II.3: Valeurs de rigidité diélectrique [1].

Les isolateurs	Rigidité diélectrique
Kapton	290kv/m m
Porcelaine	28kv/mm
Plexiglas	20kv/mm
Huiles minérales	28kv/mm
Azote liquide (77k)	28kv/mm
Teflon	18~80kv/mm gaz (1atm, 25°C)
Polystyrène	16kv/mm
Caoutchouc	15kv/mm
Air	3kv/mm
SF ₆	8.9kv/mm

La rigidité diélectrique se mesure en kV/mm ou MV/mm.

II.4.3. Rigidité diélectrique du SF₆:

La rigidité du SF₆ est une tension de claquage nettement plus élevée que l'air permet de réduire d'autant les distances entre les éléments entre lesquels existe une différence de potentiel (distance d'isolement) et par conséquent réduire le dimensionnement des appareils électriques en haute tension [1].

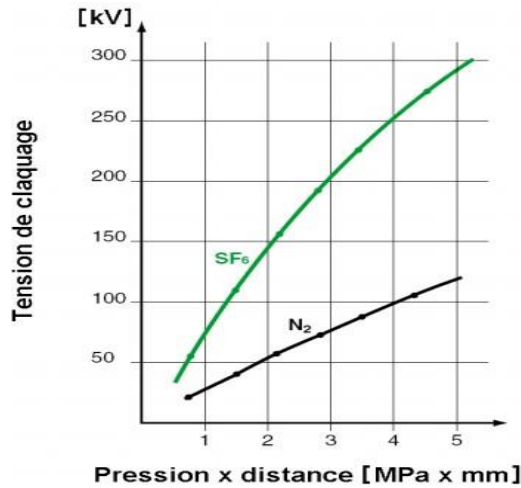


Figure II.8: Rigidité diélectrique du SF₆ et de l'azote N₂ [6]

II.5. Décharges partielles (DP):

II.5.1 Définition:

Une décharge partielle est une décharge électrique qui se développe sur une partie seulement de l'intervalle isolant soumis à la tension.

En pratique, une décharge partielle se produit dans les cavités ou les fissures qui existent à l'intérieur d'un isolant solide; ou dans les bulles d'un isolant liquide[1].

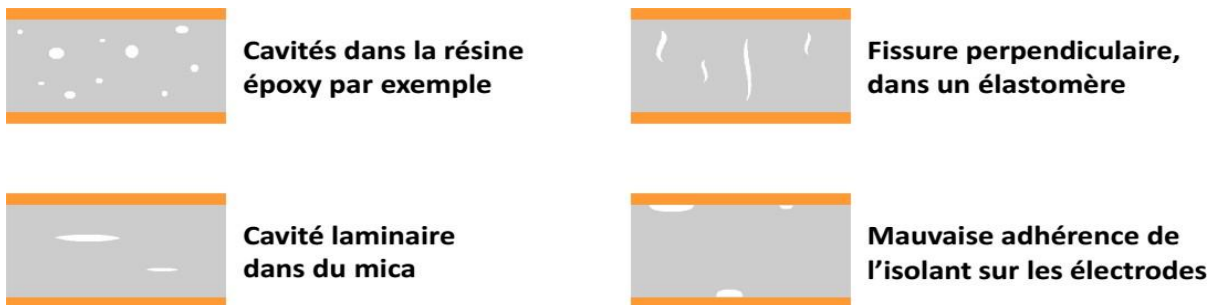


Figure II.9: Décharges partielles (DP) [1].

II.5.2. Mécanisme des décharges partielles:

Deux raisons contribuent à provoquer des décharges partielles dans les isolants :

- ❖ Le champ électrique dans les cavités E_c est plus élevé que le champ électrique dans le diélectrique.
- ❖ La rigidité diélectrique est plus faible dans les cavités que dans le diélectrique[1].

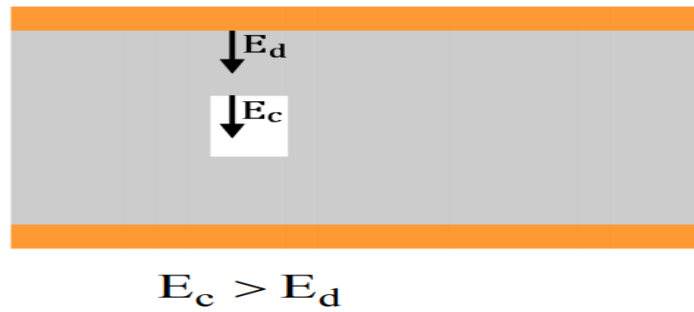


Figure II.10: Mécanisme des décharges partielles [1].

II.5.3. Charge apparente:

La charge électrique apparente d’une décharge partielle est la charge, injectée entre les bornes de l’isolant, produirait la même variation de tension que la décharge partielle elle-même. L’isolant imparfait (comportant une cavité) peut être représenté par une combinaison de capacités :

- C_c : capacité de la cavité
- C' et C'' capacité de l’isolant en série avec la cavité
- C_p' et C_p'' capacité de l’isolant en parallèle avec la cavité

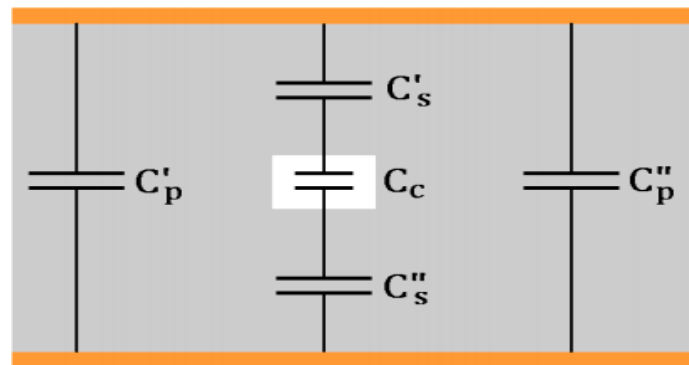


Figure II.11: Charge apparente [1].

Chaque fois que la tension $u_c(t)$ sur la cavité dépasse une tension de seuil U_s , une décharge se produit et une charge est transférée à travers la cavité. Avec le modèle ci-contre, on trouve la charge apparente Q_{app} en fonction de la charge effectivement transférée dans la cavité Q_c [1].

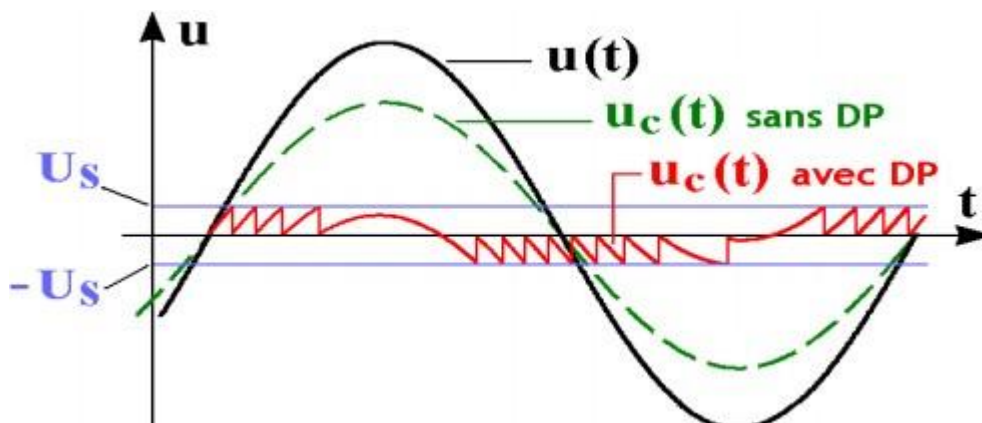


Figure II.12: Mécanisme de décharges partielles [1]

II.5.4. Détection des décharges partielles

Le niveau de décharges partielles est une intégrale temporelle de la charge électrique apparente. Il se mesure en pico coulombs (pC). Le circuit de détection des DP comporte un condensateur de couplage (C_k) en parallèle avec l'échantillon et une impédance de mesure (Z_m) en série. Les décharges partielles produisent un courant circulant essentiellement dans la boucle $Z_m - C_k - C_x$ [1].

**Chapitre III :
Théorie de claquage
dans les isolants
diélectriques**

III Théorie de claquage dans les isolants diélectriques:

III.1. Claquage diélectrique dans un gaz:

Un gaz est théoriquement un isolant parfait puisqu'il ne contient que des atomes ou des molécules neutres. Pour que l'initiation de la décharge disruptive se produise, il faut qu'au moins une particule chargée dite particule germe, généralement un électron, soit présent dans ce gaz. Dès lors que cet électron est créé, il est accéléré par le champ électrique appliqué et entre en collision avec les molécules neutres du gaz. Quand le champ est suffisant, cette charge, entre deux chocs, prend assez d'énergie pour ioniser une molécule et créer d'autres charges libres qui à leurs tours peuvent ioniser d'autres molécules. C'est l'effet d'avalanche électronique. Plusieurs avalanches peuvent ainsi être créées dans le gaz. Ces dernières peuvent conduire au claquage électrique suivant deux mécanismes : le mécanisme de Townsend ou le mécanisme du canal (Streamer en anglo-saxon) en fonction de plusieurs paramètres tels que la distribution du champ électrique entre les électrodes, l'intensité de ce champ, la forme de la tension appliquée, le taux d'humidité, ... etc[6].

III.1.1. L'avalanche électronique:

Considérons un système de deux électrodes planes et parallèles plongées dans un gaz isolant et entre lesquelles il y a un électron libre. Lorsqu'on applique une tension, l'électron est de plus en plus accéléré sous l'effet du champ électrique. 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. Ce phénomène est caractérisé par un coefficient α appelé coefficient d'ionisation (ou premier coefficient de Townsend). Chaque électron nouvellement créé contribue à son tour, par ionisation par collisions au cours de son déplacement vers l'anode (électrode positive), à la création d'une avalanche électronique [6].

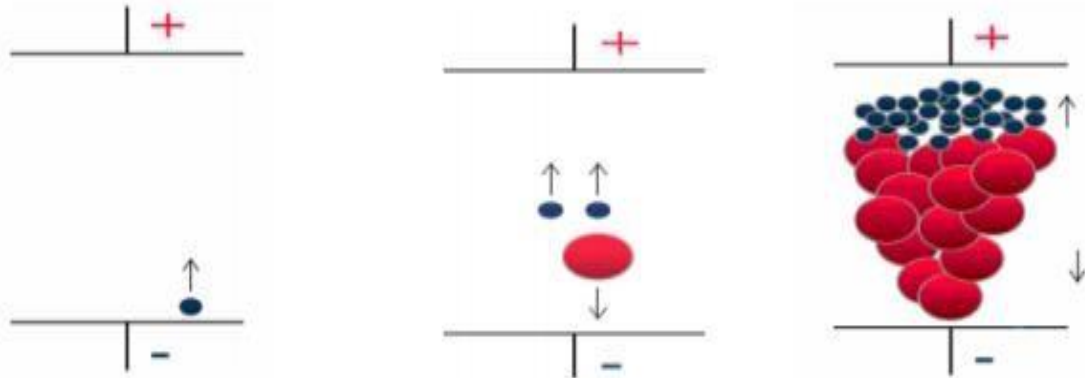


Figure III.1 : Avalanche électronique [6].

III.1.2. Théorie de Townsend:

III.1.2.1 Mécanismes de claquage:

Dans la théorie de Townsend, les ions positifs de l'avalanche électronique vont vers la cathode (électrode négative). Si ces derniers ont une énergie suffisante, ils peuvent arracher des électrons par bombardement de la cathode qui vont venir renforcer l'avalanche. Lorsque l'intensité du champ électrique est suffisante, ce phénomène devient important. L'avalanche s'auto entretient et le claquage se produit même si la tension n'est plus appliquée. On définit le coefficient γ appelé

Chapitre III : Théorie de claquage dans les isolants diélectriques

coefficient d'émission secondaire ou (second coefficient) de Townsend qui représente le nombre d'électrons arrachés à la cathode par un ion positif. Ce coefficient dépend de la nature du matériau constituant la cathode et du gaz[6].

III.1.2.2. Critère de claquage:

L'équation générale de Townsend reliant le courant d'avalanche I au courant initial I_0 en champ non uniforme est :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1 + \int_0^a \exp\left[\int_0^x (\alpha - \eta) dx\right] \alpha dx}{1 - \int_0^d \exp\left[\int_0^x (\alpha - \eta) dx\right] \alpha dx} \dots\dots\dots(1)$$

d : distance inter-électrodes en mm.

α : coefficient d'ionisation.

γ : coefficient d'émissions secondaires.

η : coefficient d'attachement.

Ce dernier caractérise la propriété qu'ont certains gaz à capturer des électrons (gaz dits électronégatifs).

Dans ce cas, le critère de claquage est :

$$\gamma \int_0^d \exp\left[\int_0^x (\alpha - \eta) dx\right] \alpha dx = 1 \dots\dots\dots(2)$$

Pour un champ uniforme, ce critère devient :

$$\frac{\alpha \gamma}{\alpha - \eta} [\exp(\alpha - \eta) d - 1] = 1 \dots\dots\dots(3)$$

Pour un champ uniforme et un gaz non électronégatif, le critère devient :

$$\gamma(\exp \alpha d - 1) = 1$$

Dans le cas d'intervalles inter-électrodes de plus d'un centimètre et des pressions proches de la pression atmosphérique, la théorie de Townsend ne peut pas expliquer les temps de développement de la décharge mesurés (10^{-9} à 10^{-7} s). Ces temps étant beaucoup plus courts que ceux nécessaires à l'apparition d'effets secondaires à la cathode. Cette théorie ne peut également pas expliquer le fait que la tension de claquage ne dépende pas du matériau de la cathode qui doit intervenir par l'intermédiaire du coefficient d'émissions secondaires γ [6].

III.1.3. Théorie du canal (Streamer) :

III.1.3.1. Mécanismes de claquage:

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

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

Chapitre III : Théorie de claquage dans les isolants diélectriques

L'avalanche primaire peut prendre naissance en un point quelconque de l'intervalle inter électrode pour une valeur critique du champ électrique. Cette avalanche est accompagnée de la création d'une charge d'espace. En effet, dans une avalanche, les électrons forment un nuage négatif qui progresse rapidement vers l'anode (électrode positive) alors que de l'autre côté, les ions positifs restent immobiles (la mobilité des électrons est 100 à 1000 fois supérieure à celle des ions). Le champ devient alors non uniforme et plus intense près des pôles de l'avalanche et surtout au voisinage du pôle positif (constitué par les ions positifs) qui joue le rôle d'une pointe conductrice. Le champ électrique sur les flancs de l'avalanche, quant à lui, diminue. Dès que la charge d'espace de l'avalanche primaire atteint une taille critique (soit environ 108 électrons), elle va contribuer à intensifier les collisions ionisantes sur les pôles [6].

III.1.3.2. Critère de claquage:

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

$$\alpha_x \exp\left[\int_0^x \alpha dx\right] = k E_x \left(\frac{x}{\rho}\right) \dots \dots \dots (4)$$

avec :

- x en indice : position du front de l'avalanche.
- α : coefficient d'ionisation.
- x : longueur critique de l'avalanche
- K : constante caractéristique du gaz.
- E : champ électrique.
- ρ : masse volumique du gaz.
- Raether a proposé une relation semblable :

$$\int_0^x \alpha dx = k \dots \dots \dots (5)$$

où :

k : constante du gaz.

Pour l'air atmosphérique, elle est voisine de 20. Pedersen a proposé la relation suivante pour l'air :

$$\alpha_x \exp\left[\int_0^x \alpha dx\right] = G(x, p) \dots \dots (6)$$

Où

ù, G(x,p) est une fonction de la longueur critique de l'avalanche et de la masse volumique du gaz. Pour le SF₆ , il a proposé la relation suivante :

$$\int_0^x [(\alpha - \eta) dx] = 18 \dots \dots \dots (7)$$

Donc, on conclut que "le modèle du Streamer est important d'un point de vue quantitatif puisqu'il permet de connaître la probabilité conditionnant le mécanisme de décharges pour les grandes valeurs du produit (pd). Malheureusement, à cause du grand nombre de phénomènes qui interviennent, l'obtention de résultats qualitatifs sur la base de ce mécanisme est pratiquement impossible. Les considérations théoriques doivent être complétées par des résultats expérimentaux, permettant d'établir des relations quantitatives nécessaires à la conception de systèmes d'isolation"[6].

III.1.4. Courbes de Paschen:

D'après la loi de Paschen, la tension de claquage U_d , d'un gaz dans un champ électrique uniforme est une fonction simple du produit $p.d$ de la pression p par la distance d'inter électrode. Cette loi est valable pour une température constante et est représentée par des courbes dites de Paschen. [6]

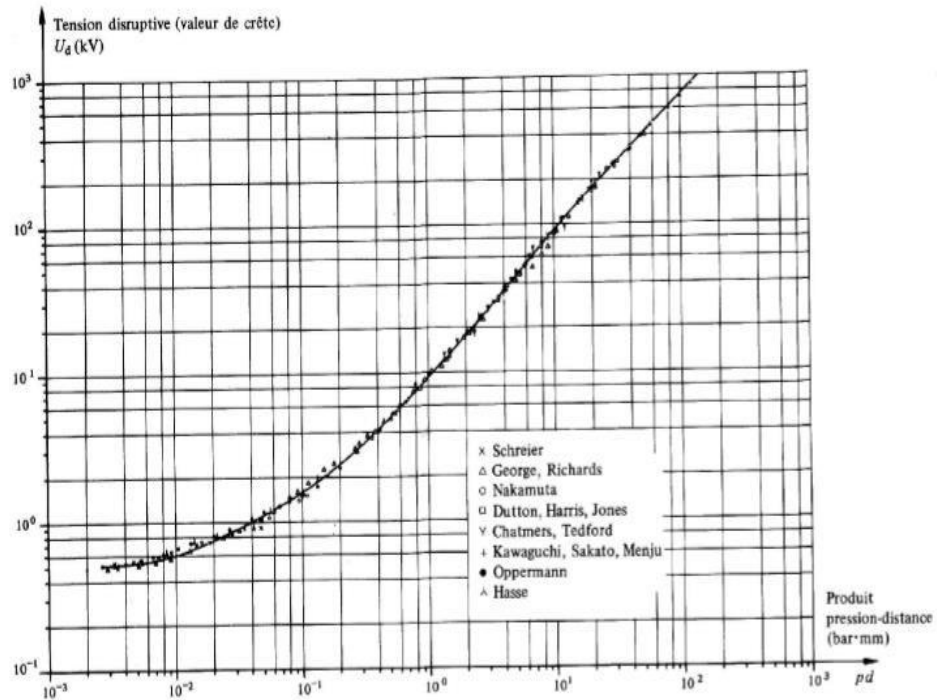


Figure III.2: Courbes de Paschen pour Le SF₆.

III.1.4.1 Critère basé sur les courbes de Paschen:

On peut formuler simplement une théorie correspondant au début de l'ionisation et qui explique les courbes de Paschen. La pression p et n le nombre de molécules par m^3 sont liés par la relation suivante :

$$p = nkT \dots\dots\dots (8)$$

Chapitre III : Théorie de claquage dans les isolants diélectriques

où :

k : constante de Boltzmann.

T : température absolue en K.

Soit λ le libre parcours moyen (distance moyenne que parcourt un électron entre deux collisions) et σ la section efficace de la molécule du gaz considéré en m². Par définition :

$$\sigma n \lambda = 1$$

L'énergie thermique (à température ambiante) seule ne suffit pas à activer et ioniser une molécule car l'énergie nécessaire est forte (tableau III.1). Il faut donc l'activer par le champ électrique.

Tableau III.1'énergie d'ionisation du N₂ et du SF₆. [6]

Gaz	Energie d'ionisation en eV
N ₂	15,33
SF ₆	19,30

Sous l'effet d'un champ électrique E, un électron ou un ion sur la distance λ prend l'énergie moyenne qV en eV :

$$qV = qE\lambda \dots \dots \dots (9)$$

Avec : q : charge élémentaire. V : tension appliquée en V. La probabilité pour que cette énergie qV ionise la molécule est donnée par la relation suivante:

$$\exp\left(-\frac{qV_c}{qV}\right) = \exp\left(-\frac{V_c}{E\lambda}\right) \dots \dots \dots (10)$$

Avec :

V_c : tension d'ionisation en V.

Le nombre de chocs N_c sur la distance "d" est en moyenne :

$$N_c = \frac{d}{\lambda}$$

Ou encore : $N_{CA} = N_c \exp\left(-\frac{V_c}{\lambda E}\right) \dots \dots \dots (11)$

le nombre de chocs actifs N_{CA} est donné par la relation suivante :

$$N_{CA} = N_c \exp\left(\frac{V_c}{\lambda E}\right) \dots \dots \dots (12)$$

Le claquage a lieu lorsque ce nombre de chocs actifs devient grand devant 1.. Soit C ce nombre et V_D la tension de claquage. Nous pouvons écrire dans le cas d'un champ électrique Uniforme :

$$N_c \exp\left(\frac{V_c}{\lambda E}\right) = C \dots \dots \dots (13) \quad E = \frac{V_D}{d} \dots \dots \dots (14)$$

la relation (14) nous permet d'écrire :

$$dn\sigma \exp\left(-\frac{V_c}{V_D} dn\sigma\right) = C \dots \dots \dots (15)$$

En encore :

$$\frac{dn\sigma}{C} = \exp\left(\frac{V_c}{V_D} dn\sigma\right) \dots \dots \dots (16)$$

En prenant le logarithme de cette relation, nous obtenons la relation de Paschen :

$$\left(\frac{V_C}{V_D} dn\sigma\right) = \ln\left(\frac{dn\sigma}{C}\right) \dots\dots\dots(17)$$

ou encore :

$$V_D = \frac{dn\sigma}{\ln\left(\frac{dn\sigma}{C}\right)} V_C \dots\dots\dots(18)$$

Cette fonction passe par un minimum (minimum de Paschen) pour :

$$dn_0\sigma = eC \dots\dots\dots(19)$$

Et

$$V_D = dn_0\sigma V_C \dots\dots\dots(20)$$

n_0 est le nombre de molécules de gaz au minimum de Paschen[6].

III.2. Claquage des Isolants Solides:

Les deux principaux mécanismes de rupture diélectrique des isolants solides sont:

1. le mécanisme de rupture intrinsèque (rupture électrique),
2. le mécanisme thermique.

Les autres mécanismes sont:

1. rupture par streamers
2. rupture électromécanique
3. rupture par arborescence
4. rupture par érosion (décharges partielles)
5. rupture après vieillissement.

Les mécanismes électrique et thermique peuvent être distingués, d'après la variation de la tension de décharge disruptive (rupture diélectrique) en fonction du temps d'application de la tension ou en fonction de la température :

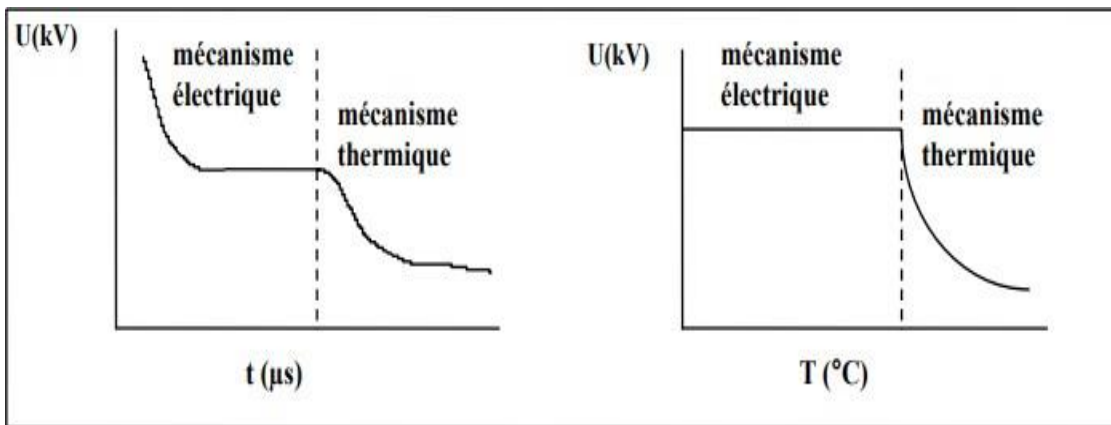


Figure III.3. Les mécanismes électrique et thermique [7].

III.2.1. Mécanisme Electrique:

La rupture intrinsèque est de nature électronique et a lieu à des temps de l'ordre de 10^{-8} s. La rigidité diélectrique est de l'ordre de 1000kV/cm (1MV/cm). La rupture est atteinte quand les électrons acquièrent suffisamment d'énergie dans le champ appliqué, afin de traverser la bande interdite de l'isolant (passage de la bande de valence à la bande de conduction). Selon le degré d'homogénéité et de pureté du matériau, on aura un certain transfert d'énergie entre les électrons de conduction et le réseau cristallin. En pratique, les réseaux cristallins présentent certaines imperfections dans leur structure, dues à des atomes qui manquent ou plus fréquemment à la présence d'impuretés. Ces impuretés constituent des pièges pour les électrons libres. Quand on applique un champ électrique, les électrons acquièrent de l'énergie qui sera fournie au réseau cristallin (interaction électrons - réseau). Dans les diélectriques amorphes, les électrons acquièrent plus rapidement d'énergie qu'ils n'en fournissent. De ce fait, le nombre d'électrons piégés qui atteignent la bande de conduction augmente, engendrant l'augmentation de la conduction dans le matériau, et favorisant ainsi la rupture diélectrique. La rupture diélectrique (claquage) est atteinte lorsque l'intensité du champ appliqué est supérieure ou égale à une valeur critique (E_c)[7].

III.2.2. Mécanisme Thermique:

III.2.2.1. Rupture locale:

D'après K.W.Wagner, la rupture thermique a lieu après la formation d'un canal le long duquel la conductivité du diélectrique devient beaucoup plus importante que dans le reste du volume diélectrique.

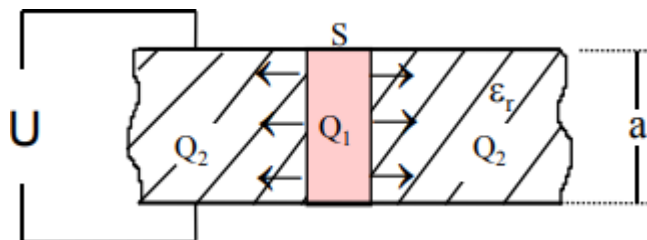


Figure III.4: Rupture locale [7].

La quantité de chaleur dans le canal s'exprime par:

$$Q_1 = 0,24 \cdot I^2 \cdot R = 0,24 \cdot U^2 \cdot \gamma \cdot (S/a) = Cst \cdot \gamma(T) \cdot U^2 \dots\dots\dots(21)$$

avec:

$\gamma(T)$: conductivité moyenne du canal.

$$\gamma_T = \gamma_{T_0} \cdot e^{\alpha(T - T_0)} \dots\dots\dots(22)$$

La quantité de chaleur dissipée Q_2 est donnée par l'expression suivante:

$$Q_2 = \lambda \cdot (T - T_0) \cdot a \dots\dots\dots(28)$$

La rupture diélectrique est atteinte lorsque les conditions suivantes sont réunies:

$$Q_1 = Q_2 \quad \text{et} \quad \frac{\partial Q_1}{\partial T} = \frac{\partial Q_2}{\partial T} \dots\dots\dots(23) [7].$$

III.2.2.2. Rupture globale:

Les pertes diélectriques spécifiques:

$$P_{diel} = E^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \text{tg}(\delta) \quad (\text{cas } U \sim)$$

$$P_{diel} = E^2 \cdot \gamma \quad (\text{cas } U =)$$

$$P_{diel} = E^2 \cdot f(T) \dots \dots \dots (24)$$

En régime stable nous avons les conditions suivantes:

$$P_{diel} = P_{ref} \quad (\text{Conditions statiques})$$

Et :

$$\frac{\partial P_{ref}}{\partial T} > \frac{\partial P_{diel}}{\partial T} \quad (\text{Stabilité}) \dots \dots \dots (25)$$

La puissance dissipée à l'extérieur par conduction thermique est donnée par la formule suivante :

Avec $\lambda = \text{cste}$

$$\lambda(d^2T/dx^2) + E^2 \cdot f(T) = 0 \dots \dots \dots (26)$$

(T variable suivant le direction x) [7].

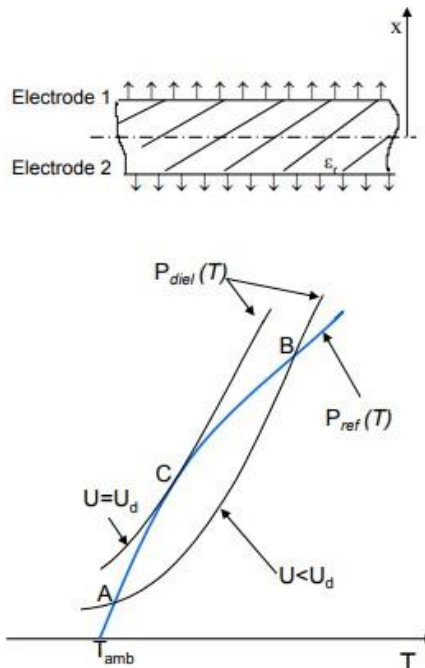


Figure III.5: Rupture globale [7].

III.2.3. Mécanisme Streamers:

Dans certaines conditions, la rupture pourrait avoir lieu après le passage d'une avalanche. L'avalanche peut progresser lorsque l'énergie gagnée par les électrons est supérieure à l'énergie d'ionisation du réseau cristallin (phénomène d'ionisation par choc similaire à celui observé dans le cas des gaz). D'après Seitz, la rupture peut avoir lieu lorsque l'avalanche dépasse une certaine dimension (longueur critique) [7].

III.2.4. Rupture par Arborescence:

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 par la présence de défauts, ou d'impuretés 'impuretés au sein 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 sont classées en deux principales catégories:

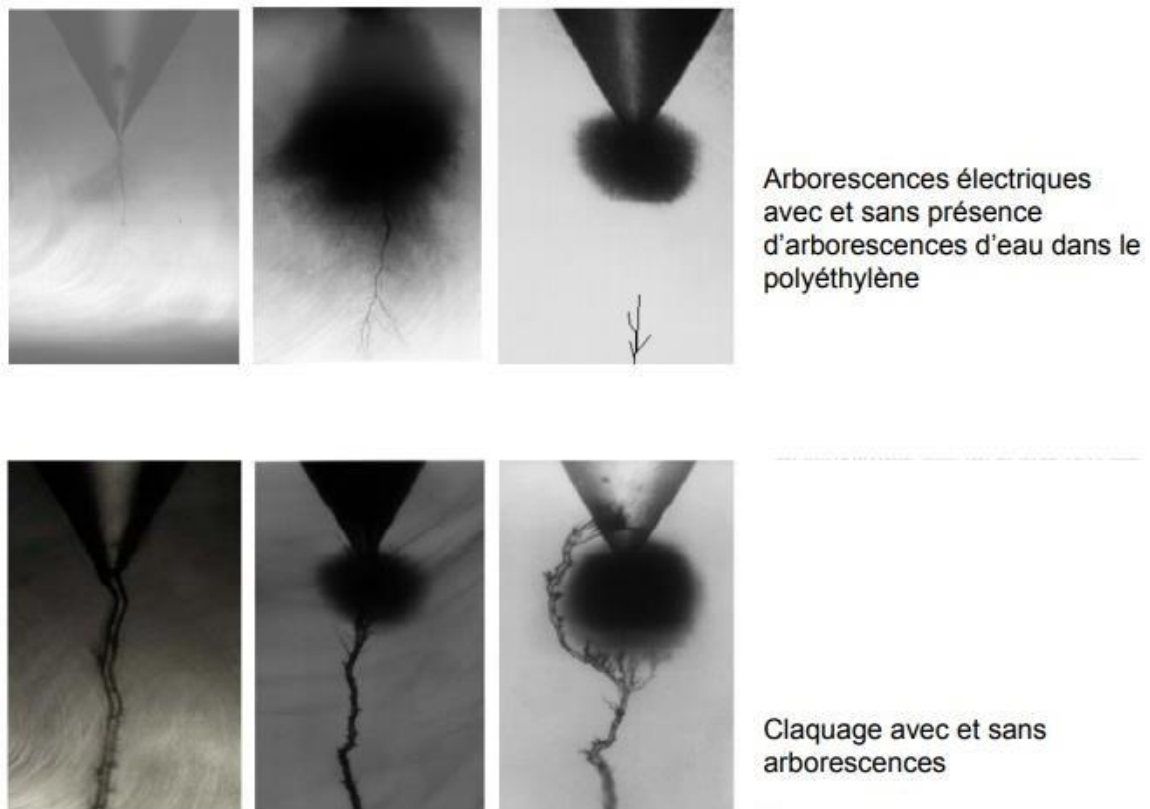
- les arborescences électriques,
- les arborescences d'eau.

D'autres types particuliers d'arborescences peuvent être aussi observés telles que les arborescences appelées (chimiques) 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 généralement inférieure à la sienne (liquide ou gaz).

Dans le cas du système présenté à la figure ci-contre, le champ E1 dans le milieu 1 est donné par la formule suivante:

$$E_1 = U / [\epsilon_1 (d_1 / \epsilon_1 + d_2 / \epsilon_2)] \dots \dots \dots (27)$$

Quand d1 diminue, le champ E1 augmente, et est maximum au point B. Ce champ peut atteindre des niveaux relativement grand (environ 10MV/cm) qui risquent de dépasser la valeur correspondant à la rigidité intrinsèque du matériau Nous aurons dans ce cas une rupture locale 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 de l'isolant solide[7].



(Source EPM)

Figure III.6: Rupture par Arborescence [7].

III.2.5. Rupture par Erosion (Décharges Partielles):

Les décharges partielles peuvent être internes ou externes. Dans le premier cas, elles se produisent à l'intérieur du matériau, et dans le second, à la surface de séparation du matériau solide avec d'autres milieux. Dans ce dernier cas, nous sommes en présence de décharges superficielles.

Lorsque les décharges partielles apparaissent dans les vacuoles de gaz présentes accidentellement dans le volume de l'isolant solide, la température du gaz augmente. Cette augmentation de température est suivie d'une augmentation de la pression du gaz risquant d'engendrer l'érosion du matériau, qui conduirait de proche en proche, à la rupture totale du diélectrique.

Dans la cavité pleine de gaz: $E_c = \epsilon_r E_a$. Si E_c dépasse la rigidité diélectrique du gaz correspondant au produit « p t. » selon la loi de Paschen, il y aura claquage dans la cavité (tenant compte de la nature diélectrique des parois)[7].

III.2.6. Claquage intrinsèque:

Lorsque le champ électrique appliqué à un matériau de telle manière que sa température reste pratiquement inchangée en maintenant ce champ pendant une courte durée et en utilisant des électrodes permettant l'évacuation de la chaleur, on peut assister à un claquage brutal qui n'est pas précédé par une augmentation progressive de la température c'est ce qu'on appelle le claquage intrinsèque [7].

III.2.7. Claquage associé:

Au volume libre Art Bauer est le premier à utiliser la notion de volume libre dans le claquage et ceci en considérant que les électrons peuvent acquérir suffisamment d'énergie avec le champ électrique en traversant le volume libre pour causer la rupture diélectrique. La structure chimique (poids moléculaire, réticulations, additifs) et physique (cristallinité, taille des sphéricités, micro vides, contraintes mécaniques) influent directement sur le claquage. [7]

III.2.8. Claquage par avalanche:

La théorie de la rupture par avalanche envisage le claquage comme la conséquence d'une augmentation régulière du nombre de porteurs créés par ionisation. L'origine de ces porteurs (injection des électrodes, génération dans le volume) est envisagée mais le champ électrique est considéré uniforme. Coelho et Aladenize donnent une explication du processus lors de la collision ionisante avec un atome du matériau, l'électron incident peut céder, à l'atome assez d'énergie pour l'ioniser sans être piégé. L'atome se charge positivement en libérant un nouvel électron, de sorte qu'on a alors 2 électrons libres qui peuvent acquérir dans le champ assez d'énergie pour provoquer chacun une nouvelle collision ionisante donc 2 électrons et ainsi de suite. Chaque électron libre accéléré produirait une avalanche exponentielle d'ions positifs fixes et un nuage d'électrons libres balayé par le champ [7].

III.2.9. Claquage électromécanique:

Stark et Garton ont introduit l'hypothèse d'un claquage électromécanique dans le polyéthylène. La pression qui s'exerce sur le diélectrique lorsque les électrodes sont fixes, ou force de compression de Maxwell est de la forme

$$P = \frac{1}{2} \epsilon E^2 \max \dots \dots \dots (28)$$

Où:

ϵ : Permittivité du diélectrique

Chapitre III : Théorie de claquage dans les isolants diélectriques

Exam: valeur maximale du champ appliqué.

L'application d'une tension V à un échantillon d'épaisseur d_0 provoque l'apparition de forces de compression sur le matériau dues à l'attraction mutuelle des deux électrodes. Cette contrainte mécanique provoque une diminution de l'épaisseur ($d < d_0$). A l'équilibre, la compression d'origine électrique est compensée par la force plastique. La valeur critique de l'épaisseur est donnée par l'expression

$$d_c = d_0 e^{-0.5}$$

Le champ réel de claquage est :

$$G_c = \frac{V}{d_c} = \left(\frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (29)$$

où:

Y: module de Young du matériau

ϵ_r : permittivité relative du diélectrique

ϵ_0 : permittivité du vide.

Le champ apparent expérimental vaut V/d_0 , soit:

$$G_{app} = \frac{V}{d_0} = \frac{G_c d_c}{d_0} = 0,606 \left(\frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (30)$$

$$G_{app} = 0,606 G_c$$

Cette relation n'est valable que dans la zone élastique (zone de réversibilité) du matériau et d'une manière générale, le claquage se produit dans la zone plastique (zone de non réversibilité). Pour cela, on tient compte non plus du module d'Young mais aussi du seuil de plasticité du matériau [7].

III.3. Claquage dans les liquides:

L'état général des connaissances sur le claquage électrique des diélectriques liquides est moins avancé que dans le cas de gaz ou solides. La raison principale pour cette situation est les grandes variétés des liquides utilisés ainsi que des additifs qui leur sont joint. Les plus importants travaux publiés sur le sujet ont été données par Lewis, Sharbaugh et Watson, par Swann et par Beroual. Leur travail fait sortir deux écoles de pensée très distinctes. Notons que Beroual a montré que les deux pensées sont complémentaires. Ainsi, les principaux mécanismes peuvent être présentés en ce qui concerne le claquage des diélectriques liquides:

- mécanisme électronique,
- mécanisme avec phase gazeuse.

En plus de ces mécanismes, le claquage peut être dû à la présence d'impuretés de diverses natures, en suspension dans le diélectrique liquide. On parle dans ce cas de mécanisme de claquage par pont. Ce dernier mécanisme est le plus proche de celui concernant les huiles de transformateur. Ces dernières sont soumises à différentes contraintes en exploitation, plus particulièrement au vieillissement électrique et au vieillissement thermique en présence d'impuretés de différentes natures. Ajoutons à cela, les phénomènes EHD et d'électrisation [8].

III.3.1. Claquage Electronique:

Il a été constaté dans le Xénon et l'Argon liquides, que le courant croit de manière exponentielle lorsque la tension appliquée augmente. Cela a été interprété comme le résultat d'un processus d'avalanche. Le courant cathodique tient son origine des mécanismes d'émission par effet de champ et d'émission thermoélectronique.

D'après Von Hippel, la condition limite d'apparition d'une ionisation électronique des particules du liquide est donnée par :

$$e \cdot E \cdot \lambda = C \cdot h \cdot \mu \dots \dots (31)$$

D'après Lewis, dans les hydrocarbures liquides, l'électron fournit son énergie principalement dans les processus d'excitation, lors des vibrations des liaisons chimiques C-H. La rigidité diélectrique ER, peut être formulée par:

$$E_R = \frac{C \cdot h \cdot \mu_{C-H}}{e} \cdot N \cdot \sum n_i q_i \dots \dots \dots (32)$$

Où h est la constante de Planck, μ_{C-H} est fréquence de vibration des liaisons C-H, N est le nombre de particules par unité de volume, n_i est nombre de groupes (CH, CH 2, CH 3) dont la section efficace correspond à la collision avec un électron de charge q_i .

Il a été constaté dans le Xénon et l'Argon liquides, que le courant croit de manière exponentielle lorsque la tension appliquée augmente. Cela a été interprété comme le résultat d'un processus d'avalanche. Le courant cathodique tient son origine des mécanismes d'émission par effet de champ et d'émission thermoélectronique.

D'après Von Hippel, la condition limite d'apparition d'une ionisation électronique des particules du liquide est donnée par : $e \cdot E \cdot \lambda = C \cdot h \cdot \mu$

où E est le champ appliqué, λ le libre parcourt moyen de l'électron, $h\mu$ est le quantum d'énergie perdu par ionisation de la molécule, C est une constante arbitraire.

D'après Lewis, dans les hydrocarbures liquides, l'électron fournit son énergie principalement dans les processus d'excitation, lors des vibrations des liaisons chimiques C-H. La rigidité diélectrique ER, peut être formulée par:

$$E_R = \frac{C \cdot h \cdot \mu_{C-H}}{e} \cdot N \cdot \sum n_i q_i \dots \dots \dots (33)$$

où h est la constante de Planck, μ_{C-H} est fréquence de vibration des liaisons C-H, N est le nombre de particules par unité de volume, n_i est nombre de groupes (CH, CH 2, CH 3) dont la section efficace correspond à la collision avec un électron de charge q_i .

D'après Adamczewski, les pertes d'énergie des électrons sont essentiellement liées aux processus d'excitation lors des vibrations des liaisons C-C. La rigidité diélectrique est donnée par:

$$E_R = \frac{h \cdot \mu_{C-C}}{e} \cdot d \cdot l(n - 1)N \cdot \frac{\delta}{M} \cdot A \dots \dots \dots (34)$$

Où μ_{C-C} est la fréquence de vibration des liaisons chimiques C-C, d est la distance moyenne entre les axes des molécules, l est la longueur de la projection des liaisons C-C sur l'axe des molécules, n est le nombre d'atomes de carbone dans la molécule, δ est la densité du liquide, M sa masse moléculaire et A le nombre d'Avogadro.

Les théories de Lewis et d'Adamczewski peuvent expliquer la variation expérimentale de la rigidité diélectrique impulsioneille des hydrocarbures liquides très purs, en fonction de leurs propriétés physiques et chimiques. Cependant, la théorie électronique est moins satisfaisante quand elle est utilisée pour prévoir les temps de retard de claquage. Les temps de retard formatifs observés dans les liquides isolants sont beaucoup plus longs que ce qui est prévu par la théorie électronique[8].

III.3.2. Claquage en phase gazeuse:

Dans les liquides ultra-purs, et en géométrie pointe-plan, sous tension continue, il a été observé, qu'à partir d'un certain seuil de tension, des bulles gazeuses se forment au voisinage de la pointe, puis sont violemment chassées vers le plan. Cette phase gazeuse résulterait soit de la vaporisation et de la nucléation des bulles, soit de la cavitation. La phase de génération des bulles a été traitée [8].

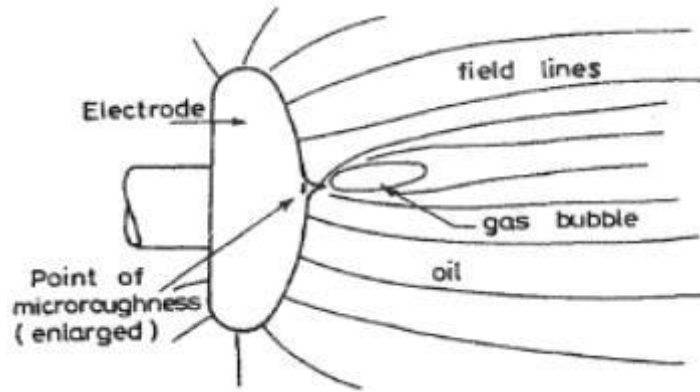


Figure III.7: formation d'une bulle de gaz à un point de microrugosité sur la surface de l'électrode dans un intervalle d'huile [8].

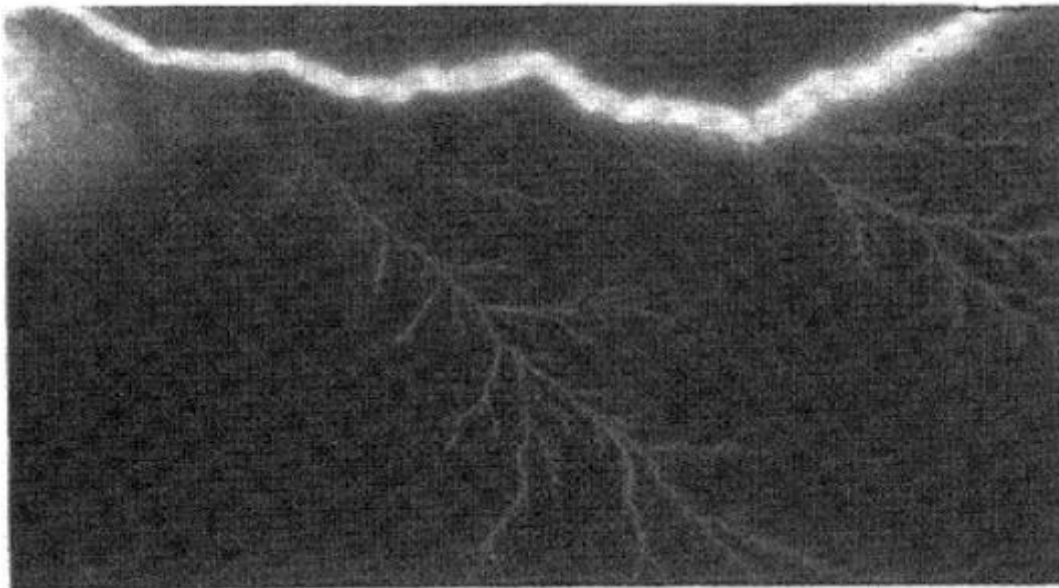


Figure III.8: Décharge dans les bulles [8].

III .3.2.1. Mécanisme thermique:

Watson et Sharbaugh ont établi un critère de claquage vérifié dans les n-alcanes, en identifiant les deux énergies ci-dessus ($\Delta H=H$) :

$$\Delta H = m[C_p(T_b - T_0) + L_V] \dots \dots \dots (35)$$

$$H = a_{cste} E^{3/2} \tau_s \dots \dots \dots (36)$$

Une fois que la bulle est formée le claquage est le résultat de la bulle en croissance à une taille critique ou par son allongement total de l'intervalle. Dans l'un ou l'autre cas la décharge suit la faible rigidité diélectrique de vapeur. Un modèle plus élaboré et tenant compte du régime transitoire a été proposé par Kao. D'après cet auteur, si la densité de courant est suffisante pour ramener la température du liquide à son point d'ébullition, il y a claquage [8].

III.3.2.2. Claquage par cavitation

Les expériences ont montré une forte influence de la pression hydrostatique sur le champ disruptif d'un liquide isolant, indiquant qu'un changement de phase peut être impliqué dans l'état critique du développement de claquage.

Si un liquide est chauffé à pression constante (ébullition), ou s'il est soumis à une dépression à température constante (cavitation), il apparaît des bulles ou cavités de vapeur ou de mélange de vapeur et de gaz. La cavitation désigne toute la séquence de formation, d'expansion et de disparition de la cavité. Elle peut se produire dans le liquide ou sur les parois. Kao a proposé un mécanisme de claquage par bulles. La bulle est supposée être formée par un des procédés suivants :

- (i) des poches de gaz sur la surface des électrodes;
- (ii) Répulsion électrostatique des charges d'espace qui peuvent être suffisantes à créer une tension de surface ;
- (iii) dissociation de produits par collisions des électrons donnant une augmentation de produits gazeux;
- (iv) vaporisation du liquide par des décharges de type couronne produits par les points et irrégularités sur les électrodes.

Une fois que la bulle est formée, elle tendra à s'allonger dans la direction de E de telle sorte à minimiser son énergie potentielle dans le champ. Pour obtenir le critère de claquage, Kao a supposé que le volume de la bulle reste constant pendant son allongement et le claquage survient quand la chute de tension le long de la bulle atteint la valeur minimale sur la courbe de Paschen pour un gaz donné dans la bulle. L'expression du champ électrique disruptif dans la bulle est de la forme:

$$E_0 = \frac{1}{(\epsilon_1 - \epsilon_2)} \left\{ \frac{2\pi\sigma(2\epsilon_1 + \epsilon_2)}{r} \left[\frac{\pi}{4} \sqrt{\left(\frac{V_b}{2rE_0}\right)} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (37)$$

où σ est la tension de surface du liquide, ϵ_1 et ϵ_2 sont respectivement les permittivités du liquide et de la bulle, r est le rayon initial de la bulle, V_b la chute de tension dans la bulle. Cette expression indique que le champ électrique critique nécessaire pour le claquage de liquide dépend de la taille initiale de la bulle, qui est affectée par la température et la pression extérieure [8].

III.3.3. Claquage par pont de particules:

Dans les isolants liquides utilisés en technique, peuvent apparaître, en suspension, des impuretés de différentes natures (bulles de gaz, gouttelettes d'eau, particules solides isolantes ou conductrices). La présence d'impuretés conduit au renforcement local du champ électrique. La déformation du champ dépend de plusieurs paramètres comme: forme et dimensions des impuretés - intervalle et forme des électrodes - permittivité et conductivité des impuretés - concentration des impuretés entre les électrodes - valeur des charges libres existant à la surface des particules. Le champ local E_{local} est généralement déterminé en attribuant aux impuretés des géométries simples (sphères, ellipsoïde). L'élévation du champ peut conduire à des claquages partiels dans le liquide, dans le cas des impuretés solides conductrices. Dans le cas des impuretés solides isolantes, celles-ci se polarisent dans le champ électrique et tendent à se déplacer vers les zones où le champ est le plus intense ($\epsilon_{impuretés/solides} > \epsilon_{liquide}$). Si on considère des particules sphériques polarisées, de permittivité ϵ_p , la force agissant sur une particule serait:

$$F_e = \epsilon_{liq} r^3 \frac{\epsilon - \epsilon_{liq}}{\epsilon + 2\epsilon_{liq}} \text{grad } E \dots \dots (38)$$

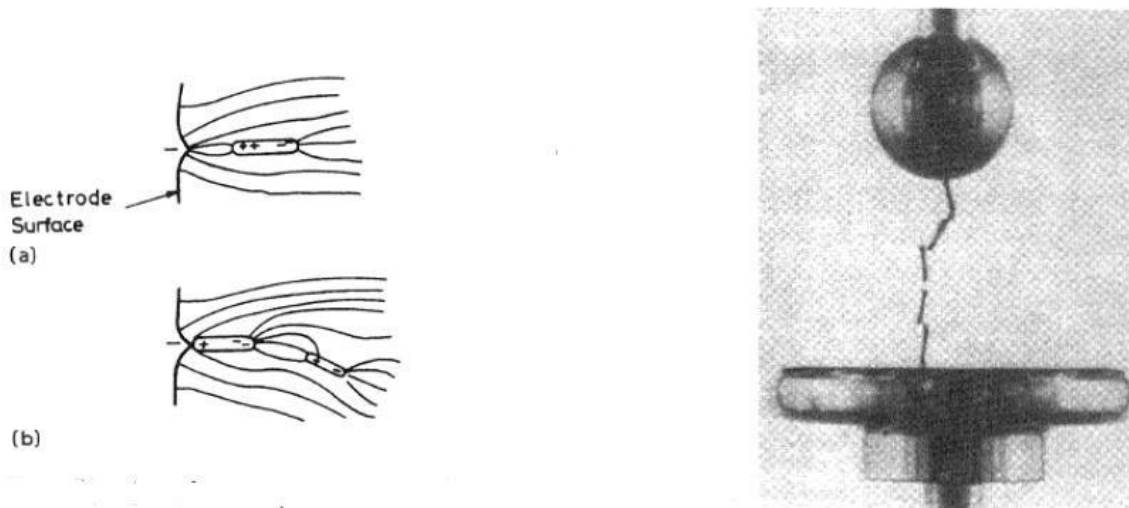


Figure III.9: Etapes de collecte de fibres ou d'autres particules en suspension pour éventuellement combler le trou d'huile qui deviennent polarisés et dirigés par le champ [8].

Pour qu'un pont de particules se forme entre les électrodes, il faut que le temps d'application de la tension soit relativement long. Ce pont nécessite en effet une grande concentration d'impuretés au voisinage des électrodes. Quand ce pont relie les électrodes, il s'établit un fort courant circulant à travers ce pont, qui est plus conducteur que le liquide. On aura ainsi, un échauffement local important, pouvant engendrer le claquage. Le claquage peut aussi avoir lieu durant la formation du pont (champ élevé en tête de pont). Parmi les théories de claquage par pont, la plus connue est celle de Kok. Son critère définit une valeur moyenne du champ électrique, au-dessus de laquelle la vitesse des particules se dirigeant vers le domaine de champ maximum devient supérieure à celle des particules repoussées vers l'extérieur (ce qui augmente la concentration des particules). Cette valeur limite du champ, la rigidité diélectrique du liquide pendant le claquage par pont:

$$E_c = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k.T}{r^3}} \dots \dots (39)$$

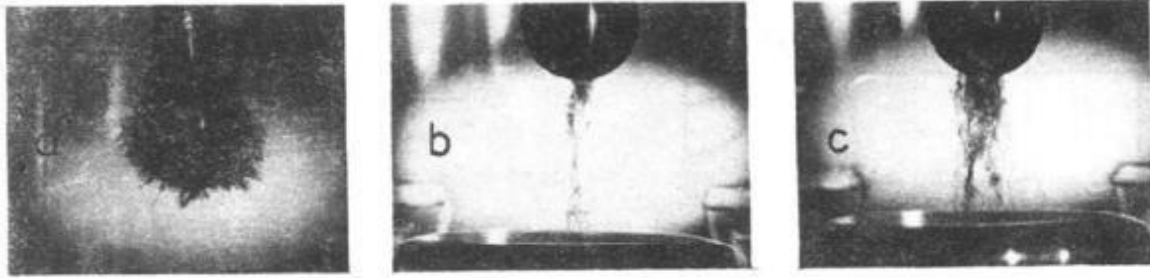


Figure III.10: Claquage par pont de particules [8].

L'eau est l'une des impuretés les plus typiques et les plus dangereuses pour les liquides isolants. Elle peut exister sous trois formes: -eau dissoute -eau en émulsion et eau dite de fond. Les gouttes d'eau sont initialement sphériques et tendent à se déformer sous l'influence du champ électrique. Elles prennent la forme d'ellipsoïdes qui s'allongent dans la direction du champ, en fonction de l'intensité de ce dernier. Lorsque le volume de la goutte est suffisant, il peut ainsi se former un canal d'eau reliant les électrodes. Ce canal sera le siège d'un fort courant de conduction qui provoquerait la vaporisation de l'eau et par suite le claquage dans le canal "vapeur-eau" en cours de formation. Le claquage peut aussi avoir lieu, lorsque le champ en tête de goutte d'eau déformée devient suffisamment intense [8].

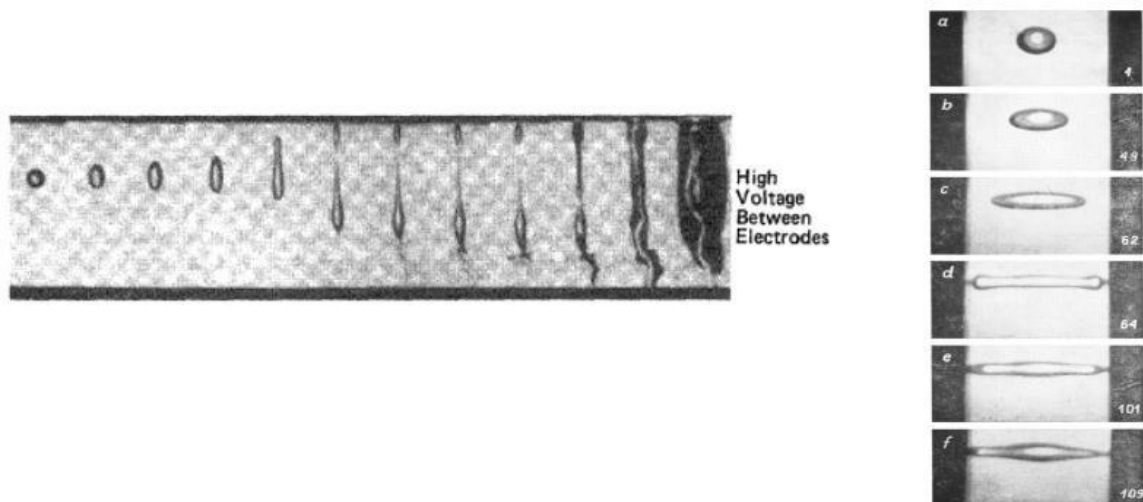


Figure I.11: goutte d'eau étant progressivement allongée par un champ électrique et provoquant finalement une panne l'eau est évaporée par la décharge [8].

III.3.4. Claquage par mouvement électro-hydrodynamique. Electrification des liquides isolants:

L'instabilité hydrodynamique provoquée par la force de Coulomb due à l'injection de porteurs de charge dans le liquide crée des courants de convection et une turbulence hydrodynamique. Le résultat de cette instabilité est l'apparition d'un régime critique qui définit la tension de claquage du liquide. La vitesse caractéristique de l'agitation turbulente est [8] :

$$v = \mu_{EHD} E$$

$$\mu_{EHD} = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0}{\rho}} \dots\dots\dots(40)$$

$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{EHD} E > W \text{ Perturbe le mouvement des charges} \\ \mu_{EHD} E < W \text{ ne perturbe pas} \end{array} \right.$

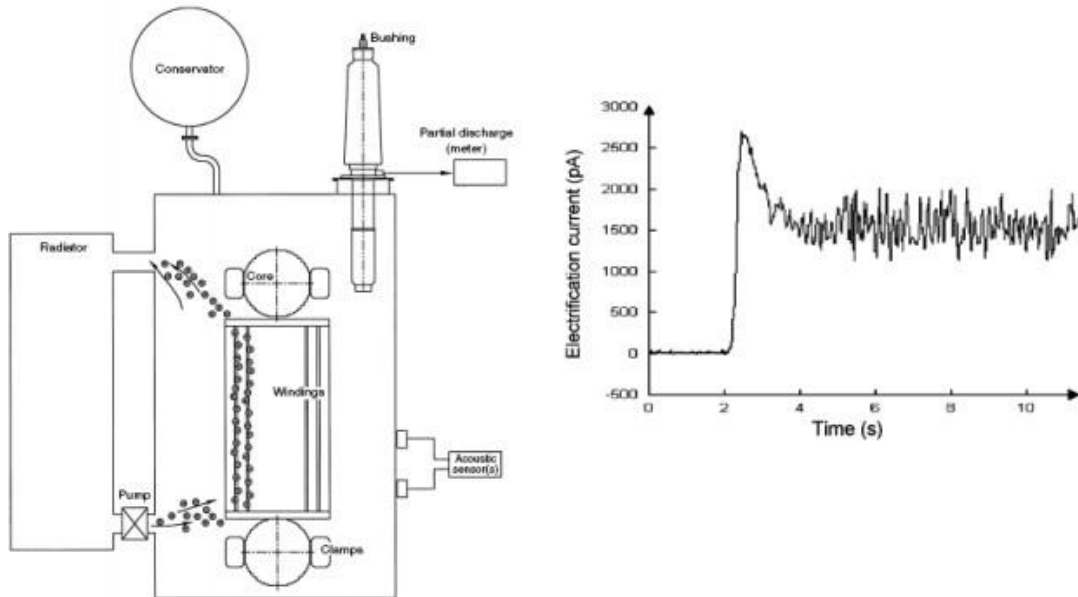


Figure III.12: Claquage par mouvement électro hydrodynamique Electrification des liquides isolants [8]

III.3.5. Claquage des grands intervalles d’huile:

Dans un liquide, des intervalles de quelques centimètres sont considérés comme longs intervalles. Le mécanisme d’évolution des décharges pour de tels intervalles est similaire dans ses caractéristiques générales, à celui observé dans l’air pour des intervalles de l’ordre de quelques mètres. Ce mécanisme est appelé comme dans les gaz: " mécanisme de streamer- leader"[8].

III.4. Détermination des pressions de fonctionnement du mélange SF₆-N₂:

Les résultats des mesures des tensions seuils des décharge couronnes du mélange SF₆-N₂ ont été réalisés au sein du laboratoire LEMD/CNRS Grenoble France.

Les expériences ont été faites dans une cellule en acier inoxydable de 50 ccs équipée de deux fenêtres en quartz comme le montre la figure.13. Des électrodes dans une configuration pointe-plan ont été montées à l’intérieur de la cellule. Les électrodes à pointe de quelques micromètres sont en tungstène et en acier inoxydable. L’électrode de pointe est connectée à la haute tension continue. L’électrode plane en acier inoxydable d’un rayon de 12 mm est connectée à un électromètre qui mesure des courants jusqu’à quelques microampères. Les mesures ont été faites pour des pressions allant de 3 bars à 15 bars. Le courant a été mesuré lorsque la tension varie vers le haut et vers le bas. L’électrode de pointe est changée régulièrement afin de limiter la variation de rayon due au dépôt de fluor et de soufre.

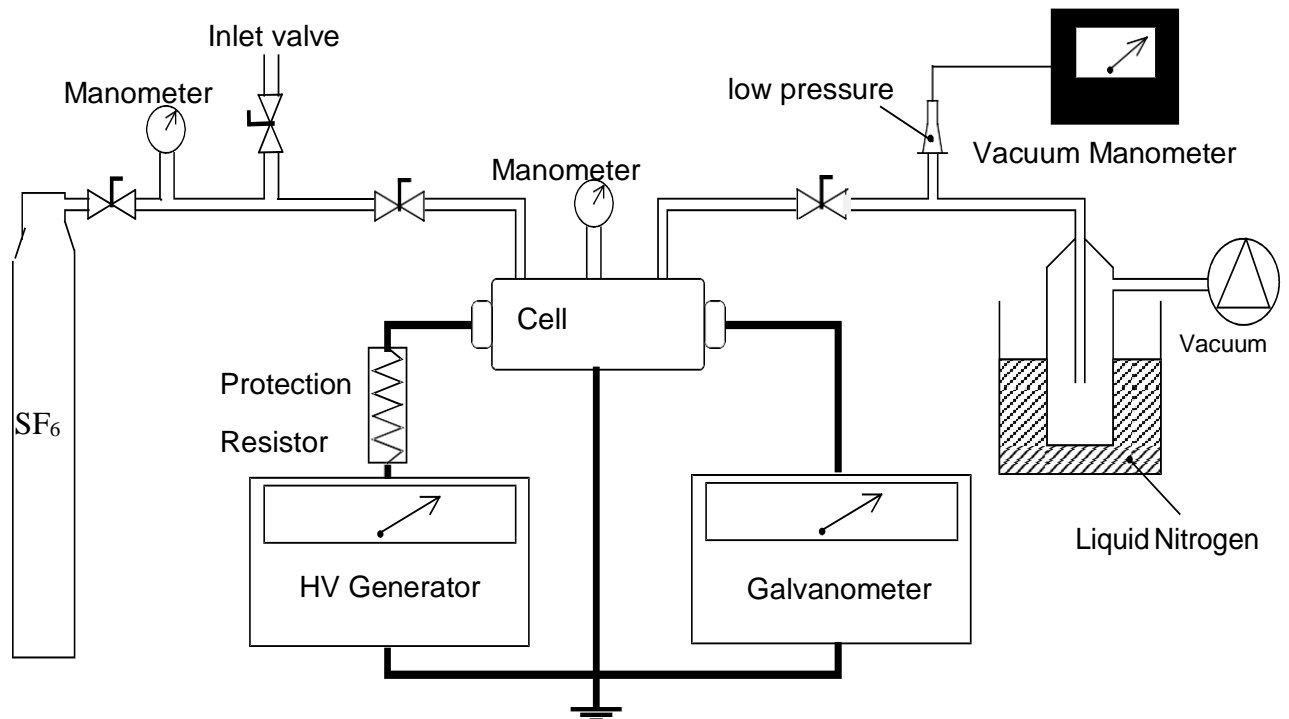


Figure III.13: Dispositif expérimental

Les mesures faites, concernent des pressions et des taux de SF₆ dans le mélange SF₆- N₂ qui sont susceptible d'être utilisés en cas de remplacement du SF₆ sont présentés sur les figures 14 et 15.

Les mesures des tensions seuils pour les polarités positives et négatives en fonction de la pression du mélange pour différents pourcentage du SF₆ dans le mélange SF₆-N₂, sont présentées sur les figures 14 et 15.

Pour les deux polarités l'augmentation des tensions seuils et très forte pour les faible quantités du SF₆ dans le mélange. Pour les quantités plus élevées de SF₆, les tensions seuils des décharges couronnes tendent vers la saturation. Cette tendance a été observée dans plusieurs travaux antérieurs [9-12]. La saturation peut être attribuée au changement de la surface des électrodes de pointe. Pour vérifier cette hypothèse, la surface a été analysée en utilisant la microscopie électronique. L'analyse a montré qu'il y a un dépôt sur la pointe après une série de décharges électriques, ce dépôt est composé de fluor et de soufre, mais comme les tests sont effectués avec une pression décroissante, cet effet ne peut pas expliquer la saturation pour des pressions plus élevées, où la pointe est tout à fait libre de dépôt. La saturation peut être le résultat de la concentration des charges d'espace, qui sont plus actives au voisinage de l'électrode de pointe à une pression plus élevée [9-12].

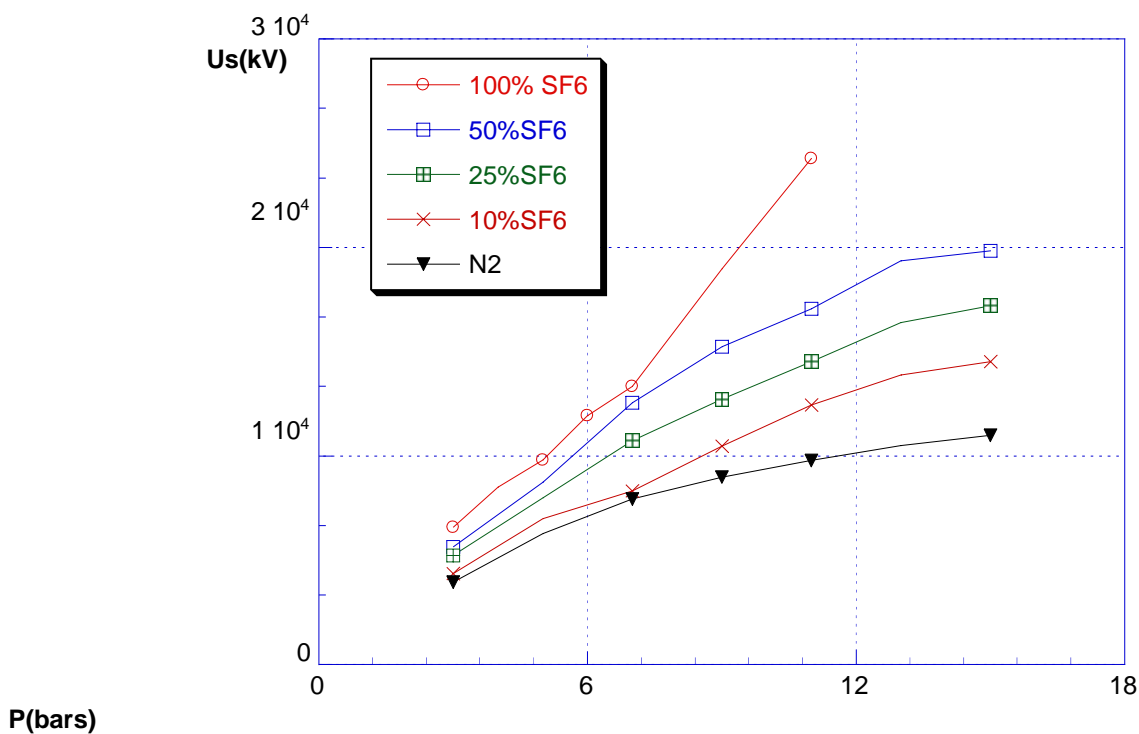


Figure III.14: Courbes de la pression en fonction de la quantité du SF₆ dans le mélange SF₆-N₂ pour une tension seuils constante en polarité négative.

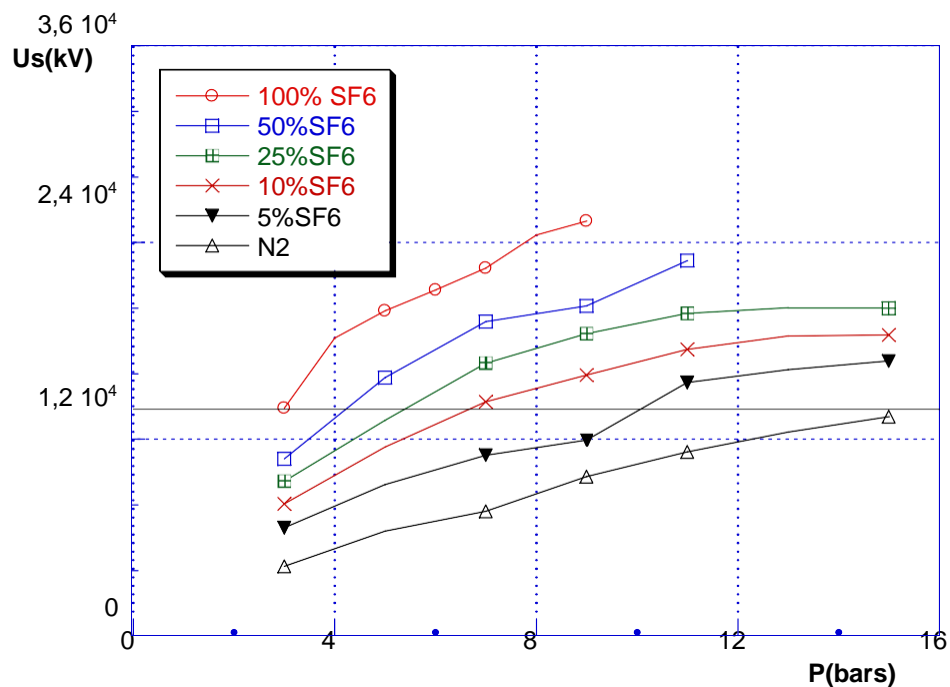


Figure III.15: Courbes de la pression en fonction de la quantité du SF₆ dans le mélange SF₆-N₂ pour une tension seuils constante en polarité positive.

A l'aide des courbes des figures 14 et 15, nous avons pu mesurer la pression de travail pour différents mélanges gazeux SF₆-N₂.

Sur la figure 16, sont tracées les valeurs de pression en fonction du pourcentage de SF₆ dans le mélange SF₆-N₂ pour une même tension seuil (13,8 kV) et pour des polarités positive et négative.

En polarité positive un mélange de 100% de SF₆ a une pression égale à 3 bars; alors que pour 10 % de SF₆ la pression monte à 6,52 bars, afin de supporter la même tension seuil (13,8 kV).

En polarité négative un mélange de 100 % de SF₆ a une pression égale à 7,3 bars; alors que pour 10 % de SF₆ la pression monte à 13,12 bars, afin de supporter la même tension seuil (13,8 kV).

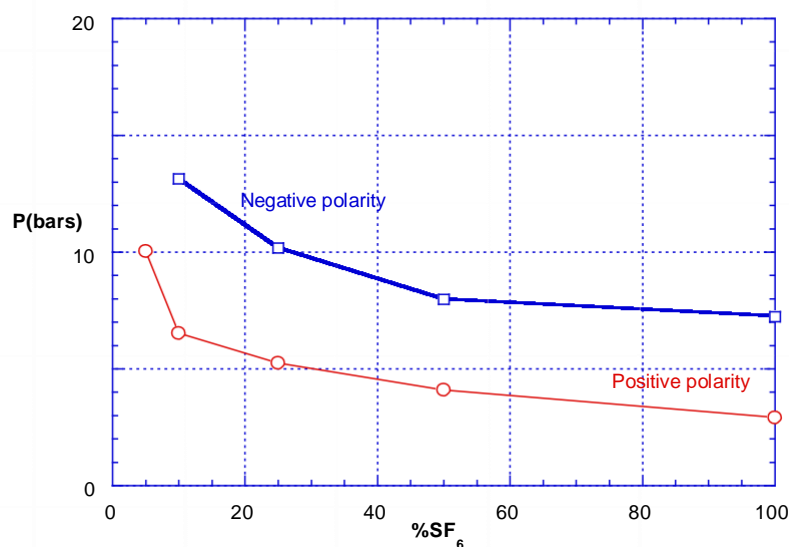


Figure III.16: courbes des valeurs de pression en fonction du pourcentage de SF₆ pour une même tension seuil (13,8 kV) pour les deux polarités (13,8 kV).

On peut dire que pour avoir les mêmes performances que le SF₆ pur les mélange 10%SF₆-90%N₂ doit travailler avec des pressions qui avoisines le double que celles du SF₆ et ceci est valable pour la polarité positive et la polarité négative. Ce résultat est d'une grande importance pour les ingénieurs de haute tension. En effet choisir le mélange adéquat avec la pression adéquate permet de remplacer le SF₆ pour le coût. La diminution de l'utilisation du SF₆ de 90% dans les équipements de haute tension constitue un atout majeur pour la protection de l'environnement.

Conclusion

Conclusion

Conclusion:

Nous avons présenté dans ce mémoire un résumé d'une étude bibliographique sur les isolants en précisant leurs rôles et leurs différents types ainsi que les principales grandeurs électriques. Une étude détaillée sur les différents modes de claquages dans les solides, liquides et gaz isolants a été réalisée.

Une attention particulière est donnée à la détermination des tensions seuils des décharges couronnes des mélanges SF₆-N₂. Sachant que le SF₆ a été listé comme gaz à effet de serre aux accords de Kyoto (Japon en 1997), son remplacement devient plus que nécessaire.

Le mélange 10%SF₆-90%N₂ est le remplaçant potentiel du SF₆. Les résultats obtenus montrent que pour avoir des caractéristiques proches du SF₆ pur le mélange doit fonctionner à des pressions qui peuvent dépassées le triple du SF₆.

Cette solution peut être envisagée afin de limiter les effets environnementaux de l'utilisation abusive du SF₆ pur. En plus le mélange avec l'azote est actuellement utilisé dans les régions très froides ou la combinaison entre le SF₆ et l'azote permet de supporter des températures très basses

Bibliographie

Bibliographie

Bibliographie:

- [1] <https://dokumen.tips/documents/chapitre-3-materiaux-isolants-1-a-types-disolant-aisolants-solidesisolants-solides-bisolants-liquidesisolants-liquides-cisolants-gazeuxisolants-gazeux.html>
- [2] <http://www.surprises.ch/HT/annexes/10.pdf>
- [3] https://fr.wikipedia.org/wiki/C%C3%A2ble_%C3%A9lectrique_%C3%A0_haute_tension
- [4] <http://www.surprises.ch/HT/annexes/11.pdf>
- [5] <https://blog.wika.fr/savoir-faire/qu-est-ce-que-l-hexafluorure-de-soufre-ou-gaz-sf6/>
- [6] BOUZOUAR Rakiche , BOUNOUA Massinissa. <<CALCUL DU CHAMP ELECTRIQUE DANS DIFFERENTS SYSTEMES D'ELECTRODES>> Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADIMIQUE, UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI- OUZOU, 27/09/ 2018
- [7] <http://perso.enp.edu.dz/~boubakeur/wp-content/uploads/2013/12/Vieillissement-du-PRC-utilis%C3%A9-dans-les-c%C3%A2bles-de-HT-ENICABiskra.pdf>
- [8] <https://fr.slideshare.net/AmineSlama2/cours-haute-tension-claquage-des-liquides-isolants>
- [9] Kulkarni and Nema, « Calculation of Breakdown Voltages of Gaseous Insulation with Special Reference to Electronegative and their Mixtures », proceedings of the 4th Int. Symp. High Volt. Eng., paper 33-08, 1983.
- [10] Malik and Qureshi, «Calculation of Discharge Inception Voltages in SF₆/N₂ Mixtures», IEEE Trans. on EI, vol. EI-14, n°2, 1979, pp. 70-76.
- [11] Kline and al., «Dielectric Properties for SF₆ and SF₆ mixtures predicted from basic data», J. Appl. Phys. 50(11), 1979, pp. 6789-6796.
- [12] Crichton and al., «The Dependence of Breakdown Voltage in SF₆ Mixtures on Electrode Surface Roughness», Proc. 4th Int. Conf. Gas Discharges.