

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA
Faculté de Technologies
Département de Génie Electrique



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique
Laboratoire de Génie Électrique de Bejaia

Projet de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique
Option : Électrotechnique / Réseaux électrique

Thème

**EFFET DE LA RAMPE ET DE LA FORME DE
TENSION SUR LA TENSION DE CLAQUAGE
DES FILMS EN POLYETHYLENE**

Réalisé par :

- Mr. AMIROUCHE Azzeddine
- Mr. AMEUR Hicham

Encadré par :

- Mr. LAIFAOUI Abdelkrim

Devant le jury :

- Mr. HERZINE Mohand Seghir
- Mr. ATROUNE Salah

Promotion :
2018 / 2019

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

On nous aurait dit au début de la rédaction que les remerciements seraient la partie la plus difficile à écrire, nous n'y aurait pas cru. Et pourtant, nous pouvons le confirmer maintenant... Ils représentent bien souvent la partie la plus lue d'un mémoire, ou du moins celle qu'un lecteur regardera naturellement en premier. Il s'agit donc de trouver les mots justes pour chacun, tout en n'oubliant personne. Nous commencerons donc par remercier toute personne que nous aurions pu malencontreusement oublier par la suite.

Nous Nos vifs remerciements vont d'emblée à Dieu tout puissant qui nous a doté d'une grande volonté et d'un savoir adéquat pour mener à bien cet humble travail.

Nous tenons à exprimer toute nos reconnaissances et remerciements à notre encadreur Mr LAIFAoui Abdelkrim, pour la confiance et le soutien qu'il nous a accordés tout la période de ce travail.

Nous remercions également monsieur HERZINE Mohand Seghir qui nous a fait l'honneur de présider le jury.

Nous sommes également très reconnaissants envers Monsieur ATROUNE Salah d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous tenons à remercier particulièrement nos parents ainsi que nos familles, nos amis qui nous ont toujours soutenus et encouragés et toute personne qui a contribué de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous tenons à remercier toute la promotion 2018-2019 master 2 Electrotechnique. Ainsi que tous nos enseignants et les membres du département génie électrique de l'Université Abderrahmane Mira, Bejaïa

DEDICACES

DEDICACES

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que je dédie ce modeste travail à :
Mes très chers parents qui ont été toujours la source de ma réussite et de succès. Que dieu les protèges. A mon frère et mes chères sœurs A mon neveu et mes deux nièces. A mes beaux-frères, A mes oncles et ma tante, A ma grande mère sans manquer mes voisins, A tous la famille AMIROUCHE et tous les habitants de village Tizi War, Enfin à tous mes amis avec qui j'ai partagé beaucoup de moments inoubliables et à tous ceux que je n'ai pas pu citer.*

AZZEDDINE

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à ma famille :

- Mes parents qui m'ont toujours aidé*
- Ma sœurs et Mes frères : Wahiba, Zakaria et Abdeslam*
- A mes oncles et mes tontes*
- A ma grand-mère.*
- Et à la mémoire de mon grand-père, que dieu t'accorde sa clémence et t'accueille dans son paradis.*
- A ma belle famille*
- A tous mes amies précisément mes amies Zahi et Walid et aussi à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

HICHAM

TABLE DES MATIERES

Table des matières	i
Liste des Figures	iv
Liste des Tableaux	vi
Glossaire	vii
Introduction générale	1

CHAPITRE I : MATERIAU POLYETHYLENE PE

1	Historique.....	3
2	Définition.....	3
3	Structure.....	4
4	Différents types de polyéthylène :	5
5	Classification.....	5
	5.1 Polyéthylène haute densité (PEHD)	5
	5.2 Polyéthylène basse densité (PEBD).....	5
	5.3 Polyéthylène basse densité linéaire(PEBDL)	6
	5.4 Polyéthylène basse densité- haute pression	6
6	Propriétés PE HD.....	6
	6.1 Propriétés physique.....	6
	6.2 Propriétés mécaniques	7
	6.3 Propriétés thermiques :	7
	6.4 Propriétés électriques.....	7
7	Propriétés PE BD	8
	7.1 Propriétés physique.....	8
	7.2 Propriétés mécaniques	8
	7.3 Propriétés électriques.....	9
8	Utilisation de polyéthylène dans l'isolation électrique.....	9
9	Avantages du PE	9

10	Inconvénients	10
11	Sécurité	10

**CHAPITRE II : MECANISME DE RUPTURE DES ISOLANTS ELECTRIQUES
SOLIDES**

1	INTRODUCTION	11
2	Matériaux diélectriques.....	11
3	Conduction électrique dans les isolants	12
3.1	La rigidité diélectrique.....	12
4	Essais de rigidité électrique	13
4.1	Choix de la tension d’essai	13
4.1.1	Essais de rigidité en tension alternative	13
4.1.1.1	Avantage	13
4.1.1.2	Inconvénients	13
4.1.2	Essais de rigidité en tension continue	14
4.1.2.1	Avantage	14
4.1.2.2	Inconvénients	14
5	Rupture diélectrique.....	14
6	Claquage des isolants solides.....	15
6.1	Claquage thermique	16
6.2	Claquage intrinsèque	17
6.3	Claquage électromécanique ou électrodynamique	18
6.4	Contournement	18
7	Influence de divers paramètres sur la tension de claquage	19
7.1	Tension appliquée.....	19
7.2	Epaisseur.....	19
7.3	Température.....	20
8	Les facteurs d’influence sur les tests diélectriques	20
8.1	Les facteurs physiques	20
8.2	Les facteurs électriques.....	20

8.3	Les facteurs chimiques :	20
9	Conclusion	21

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

1	INTRODUCTION	22
2	MATERIAUX ET TECHNIQUES.....	22
2.1	Matériaux étudiés et préparation des échantillons.....	22
2.2	Dispositifs expérimentaux	23
2.2.1	Dispositif des essais sous tension alternative sinusoïdale.....	23
2.2.2	Dispositif des essais sous tension continue.....	24
2.3	Cellule d'essai.....	25
2.4	Procédure expérimentale	26
2.5	Traitement statistique des données	28
3	RESULTATS ET DISCUSSION	29
3.1	Essais sous tension alternative sinusoïdale et tension continue.....	29
3.2	Résultats de l'analyse statique	32
3.3	Tests d'adéquation	33
3.4	Effet de la rampe de tension sur la tension de claquage	34
3.4.1	Sous rampe de tension alternative sinusoïdale.....	34
3.4.2	Sous rampe de tension continue de polarité positive	35
3.5	Influence de la forme et de la rampe de tension appliquée sur le champ de claquage.....	35
3.6	Discussion.....	36
3.7	Variation du facteur de forme en fonction de la rampe de tension appliquée ..	38
4	Conclusion	40
	CONCLUSION GENERALE	41
5	Bibliographie.....	42

LISTES DES FIGURES

CHAPITRE I :

- Figure I- 1** Polymérisation du polyéthylène 4
Figure I- 2 Schéma représentatif d'une molécule linéaire de polyéthylène 4

CHAPITRE II :

- Figure II- 1** Processus de rupture électrique dans un diélectrique a) faible tension b) tension élevée 15
Figure II- 2 Différents types de claquage des isolants solides 16
Figure II- 3 Représentation schématique des conditions de stabilité et d'instabilité pour le claquage thermique 17
Figure II- 4 Champ électrique de claquage en fonction de la vitesse de montée en tension .. 19

CHAPITRE III :

- Figure III- 1** Eprouvettes utilisées pour les essais de claquage 23
Figure III- 2 Schéma de dispositif des essais de claquage sous tension alternative sinusoïdale 24
Figure III- 3 Schéma de dispositif des essais de claquage sous tension continue 25
Figure III- 4 Cellule d'essais 26
Figure III- 5 Ensemble dispositif-échantillon, entouré par une cage de protection..... 26
Figure III- 6 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 1.46kV/s et de tension continue de 1.89kV/s..... 29
Figure III- 7 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 1.99kV/s et de tension continue de 2.46 kV/s..... 30
Figure III- 8 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 2.43kV/s et de tension continue de 2.95kV/s..... 30
Figure III- 9 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 3.16kV/s et de tension continue de 3.65kV/s..... 31
Figure III- 10 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 3.61kV/s et de tension continue de 4.55kV/s..... 31
Figure III- 11 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 4.24kV/s et de tension continue de 5.09kV/s..... 32
Figure III- 12 Tension de claquage en fonction des vitesses de la tension appliquée 34

Figure III- 13	Tension de claquage en fonction des vitesses de la tension appliquée	35
Figure III- 14	Champ de claquage en fonction des vitesses de la tension appliquée	36
Figure III- 15	Paramètre de forme en fonction des vitesses de la tension appliquée	39

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I :

Tableau I- 1 Les propriétés physiques du PE HD	7
Tableau I- 2 Les propriétés mécaniques du PE HD	7
Tableau I- 3 Les propriétés thermiques du PE HD	7
Tableau I- 4 Les propriétés électriques du PE HD	8
Tableau I- 5 Les propriétés physiques du PE BD	8
Tableau I- 6 Les propriétés mécanique du PE BD	9
Tableau I- 7 Les propriétés électriques du PE BD	9

CHAPITRE III :

Tableau III- 1 Résultats de mesures pour la tension alternative	33
Tableau III- 2 Résultats de mesures pour la tension continue positive DC+	33

GLOSSAIRE

C_v: capacité thermique massique à volume constant
C_x: quotient de la capacité
E: le champ électrique,
tgδ : Facteur de pertes diélectrique,
E_{ex}: champ électrique extérieur,
E_p: champ électrique propre,
HT: haute tension,
K: conductivité thermique,
pa: polarisation ionique,
Pa: pascal,
Pd: polarisation dipolaire,
pe: polarisation électronique,
PE: Polyéthylène,
PE-BD: polyéthylène basse densité,
PE-BDL: polyéthylène à basse densité linéaire,
PE-HD: polyéthylène haute densité,
PE-MD: polyéthylène à moyenne densité,
PE-R: polyéthylène réticulé,
PE-RHD: polyéthylène réticulé à haute densité,
PE-TBD: polyéthylène à très basse densité,
PE-UHPM: polyéthylène à masse molaire élevée,
Pi: polarisation interrassiale,
Pt: polarisation totale,
T: la température,
ε₀: la constante diélectrique du vide,
ρ: la masse volumique,
σ: la conductivité électrique,
Ω: ohm,
Ω.m: ohm × mètre,
ε_a: La permittivité absolue,
ε_r: permittivité relative,

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, il est impossible d'ignorer l'importance des plastiques dans le développement des nouvelles technologies. Ils sont légers, simples à mettre en œuvre et ont un prix de revient nettement plus bas que la majorité de leurs concurrents.

Au sens large, les matériaux ont joué un rôle majeur dans le progrès des équipements électriques, en particulier des matériaux d'isolation indispensables dans le domaine de l'électricité, car ils sont responsables de la sécurité et de la continuité des équipements électriques.

Les matériaux diélectriques, appelés plus communément les isolants électriques, sont des milieux qui ne peuvent pas conduire le courant électrique sous condition normale d'utilisation, tels que : le vide, le verre et de nombreux plastiques comme le polyéthylène.

Le polyéthylène est une matière synthétique dure et relativement bon marché qui se prête parfaitement aux travaux d'isolation. En effet, cette matière synthétique est résistante à la lumière du soleil et à d'autres conditions atmosphériques (plus sévères) telles que des températures très basses (jusqu'au -30°C) ou très hautes (jusqu'au $+80^{\circ}\text{C}$). En plus, l'isolant en polyéthylène offre une bonne protection contre de produits chimiques et il est résistant à l'humidité. L'abréviation de polyéthylène est PE, pourtant les fabricants et consommateurs utilisent encore souvent sa dénomination en toutes lettres.

Ce manuscrit s'articule en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de polyéthylène PE : définition, structure, différents types, classification et propriétés et en fin, avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre concerne les différents mécanismes de la rupture diélectrique des isolants électriques : dans le premier temps, traite les matériaux diélectrique et polarisation diélectrique ainsi que ces caractéristiques, ensuite nous pressentons la rigidité diélectrique, la rupture diélectrique, et les différents phénomènes de claquage des isolants solides, en termine par les facteurs d'influence sur les tests diélectriques.

Le chapitre trois décrit les techniques expérimentales utilisées durant nos essais. Concernant la préparation des échantillons la procédure expérimentale et les dispositifs utilisés, ainsi que les appareilles de mesure. Et comme la rupture diélectrique est un phénomène aléatoire nous allons traiter la distribution des valeurs en utilisant le modèle statistique de Weibull Aussi, dans ce chapitre, les différents résultats obtenus seront exposés et exploités.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale qui résume les points forts de cette étude ainsi que les perspectives ouvertes par ce travail.

Chapitre I **Matériau**

polyéthylène PE :

1 Historique

Depuis 1940 le polyéthylène (PE) a été, et continue d'être largement utilisé dans la fabrication des câbles, en raison de son faible coût. Cet excellent matériau d'isolation, utilisé généralement en haute tension, est caractérisé par une très bonne rigidité diélectrique et de faibles pertes diélectriques [1]. Selon le procédé technologique, plusieurs types de PE de propriétés physiques, et de structures différentes sont obtenus. Ils sont classés selon leur densité et sont obtenus par divers procédés.

Le procédé à haute pression est historiquement le plus ancien (1930). Ce procédé de polymérisation en masse nécessite de comprimer l'éthylène gazeux à plus de 1000 bars et à une température de 150 à 300°C, en présence d'oxygène ou peroxyde organique, ce qui conduit à un PE comportant des ramifications (20 à 40 ramifications / 1000 carbone). Il est appelé Polyéthylène à basse densité (PEBD) et sa densité varie de 0,910 à 0,920 g / cm³

Les procédés basse pression sont basés sur l'utilisation de catalyseurs et nécessitent des pressions faibles < 50 bars ce qui permet d'obtenir un PE plus cristallin que le PEBD (1 à 5 ramifications / 1000 carbones). Il est appelé polyéthylène haute densité (PEHD) et sa densité varie de 0,940 à 0,960 g / cm³ [2].

2 Définition

Appartient à la famille des polyoléfines, le polyéthylène (PE) ou polythène est un des polymères les plus simples et les moins chers. C'est un thermoplastique, translucide, chimiquement inerte, facile à manier et résistant au froid. Il est aussi le plastique le plus populaire du monde. Le PE possède une structure très simple, voir même plus simple que celle de tous les polymères commercialisés dans le monde.

Une molécule (ou chaîne) de PE est une longue chaîne d'atomes de carbone, avec deux atomes d'hydrogène attachés à chaque atome de carbone [3].

Le polyéthylène possède une haute rigidité diélectrique et une bonne résistance au cheminement des décharges superficielles. La rigidité diélectrique en champ alternatif peut être augmentée par des additifs aromatiques qui améliorent également la résistance aux décharges partielles. Sa permittivité est indépendante de la fréquence jusque dans les hyperfréquences et il en est de même du facteur de pertes diélectriques car la molécule est non

polaire. La variation de la permittivité relative et du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température résulte uniquement du changement de densité. Le polyéthylène est assez inerte chimiquement, mais il brûle [4].

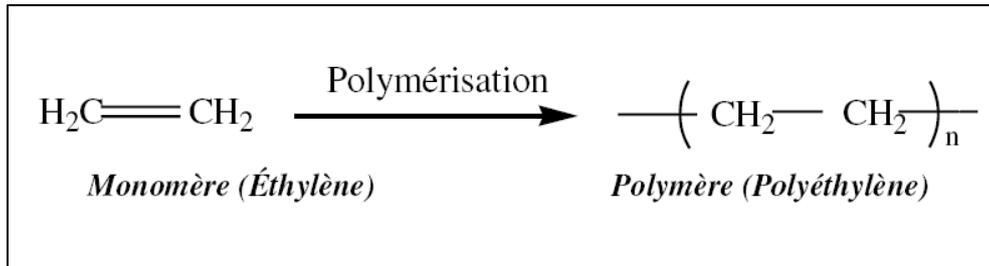


Figure I- 1 Polymérisation du polyéthylène

3 Structure

Représentation schématique d'une molécule linéaire de polyéthylène (la figure I-2).

Elle est faite de la succession de motifs CH₂.

L'atome de carbone C (représenté en noir) est accompagné de deux atomes d'hydrogène (en blanc). Représente la molécule linéaire de polyéthylène [5].

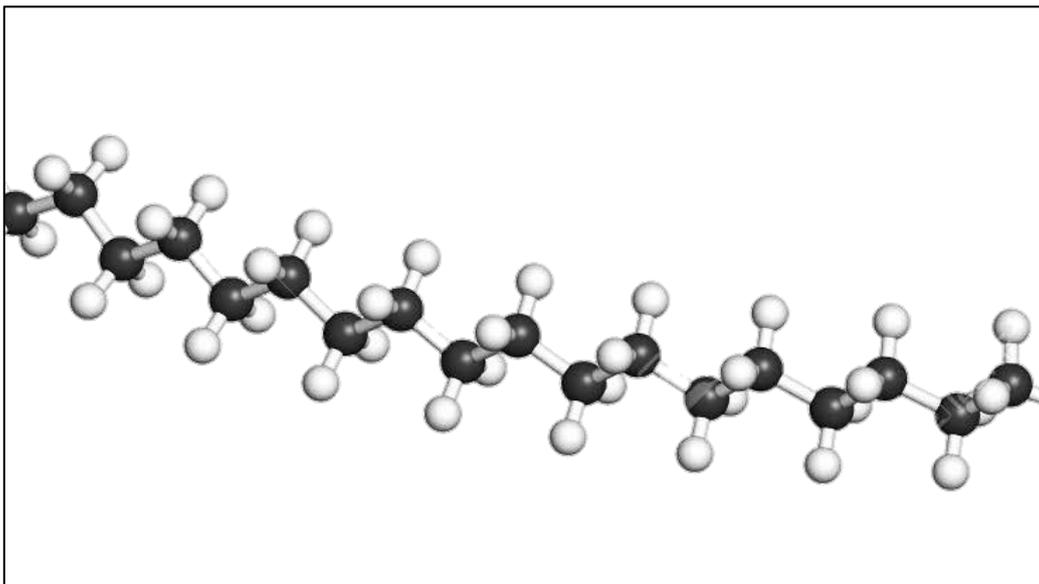


Figure I- 2 Schéma représentatif d'une molécule linéaire de polyéthylène [5]

4 Différents types de polyéthylène :

Il existe différents types de polyéthylène et ils sont classés en fonction de leur densité qui dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes sur les chaînes moléculaires [6].

- PE-BD, polyéthylène basse densité.
- PE-BDL, polyéthylène à basse densité linéaire.
- PE-HD, polyéthylène haute densité.
- PE-UHPM, polyéthylène à masse molaire élevée.
- PE-R, polyéthylène réticulé.
- PE-RHD, polyéthylène réticulé à haute densité.
- PE-MD, polyéthylène à moyenne densité.
- PE-TBD, polyéthylène à très basse densité.

5 Classification

Selon les conditions de polymérisation (pression, température, catalyseurs,...) on distingue trois grandes variétés de polyéthylène : le polyéthylène à basse densité (PEBD), le polyéthylène à haute densité (PEHD) et le Polyéthylène basse densité linéaire(PEBDL).

5.1 Polyéthylène haute densité (PEHD)

Le polyéthylène haute densité est dit aussi “basse pression” est obtenu par polymérisation sous des conditions moins sévères que celle de PEBD. La pression de polymérisation est inférieure à 50 bars et la température est voisine de 100°C. Sa densité est de 0.96g/cm³ et son taux de cristallinité de 93%. Sa température de fusion est comprise entre 130°C et 145°C Les chaînes de PEHD sont beaucoup plus alignées que celles de PEBD, ce qui explique la valeur élevée de sa densité [7].

5.2 Polyéthylène basse densité (PEBD)

A été découvert en 1933 par Fawcett et Gibson [8]. Ce matériau est constitué de chaînes macromoléculaires comprenant des ramifications latérales de longueurs variables [9]. La présence de ces ramifications dans la chaîne de polyéthylène influe sur les propriétés physiques (densité, flexibilité, viscosité,...), et favorise l'initiation de l'oxydation [10].

La polymérisation du PEBD se fait à une pression comprise entre 1000 et 3000 atmosphères et à une température comprise entre 100°C et 300°C. Différents catalyseurs sont employés, dont le premier est l'oxygène. Sa concentration est très importante. En effet les rendements optimaux sont obtenus à environ 0.05% à 0.06%. Par la suite, le PEBD est extrudé avec incorporation éventuelle de quelques additifs du type antioxydant et mis sous forme de granulés utilisables directement dans l'industrie [11]. Grâce à sa structure non polaire, le PEBD possède de bonnes propriétés diélectriques. Pour cela il est utilisé comme un isolant dans la fabrication des câbles. La première tentative de son utilisation remonte à 1940 [12].

5.3 Polyéthylène basse densité linéaire (PEBDL)

Les polyéthylènes basses densités linéaires sont obtenus par copolymérisation de l'éthylène et d'une ou plusieurs oléfines (butène-1, hexène-1, octène-1, tétraméthyl-4-pentène-1) sous pression inférieure à 10^7 Pa, où les catalyseurs sont de type Ziegler ou Phillips [1]. Ces produits ont des caractéristiques voisines de celles des polyéthylènes basses densités haute pression (densité varie de 0.9 à 0.94 et un point de fusion qui varie de 115-128°C) [13].

5.4 Polyéthylène basse densité- haute pression

Les polyéthylènes basse densité- haute pression est un polymère à branches à longues et courtes fabriqués par amorçage radicalaire avec les procédés haute pression de masse volumique 0.910 à 0.935 g/cm³ [13].

6 Propriétés PE HD

6.1 Propriétés physique

La pression de polymérisation est inférieure à 50 bars et la température est voisine de 100°C. Sa densité est de 0.96 g/cm³ et son taux de cristallinité comprise entre 65 et 80 %.

Propriétés	Unité	PE HD
-Structure		Linéaire
-Masse volumique	g/cm ³	0,945-0,960
-Taux de cristallinité	%	65-80
-Température max de service	°C	80
-Température de fusion	°C	128-135

-Transition vitreuse	°C	Env.-110
-Indice de réfraction		1,54
-Permittivité relative à 1MHz		2,3-2,4
-Résistivité	$\Omega.m$	$10^{15}-10^{18}$

Tableau I- 1 Les propriétés physiques du PE HD [14]

6.2 Propriétés mécaniques

La rigidité et la dureté du PEHD augmentent avec la densité, et donc avec la cristallinité. La rigidité est mesurée au moyen de module d'élasticité qui varie d'environ 1600 MPa (dans le cas du PEHD) alors que la dureté (Shore D) varie d'environ 60.

Propriétés	Unité	PE HD
Contrainte à la Rupture	MPa	13 – 25
-Module de traction	MPa	200 – 300
-Module de flexion	MPa	60 – 400
-Dureté (shore)	Échelle D	41 – 60

Tableau I- 2 Les propriétés mécaniques du PE HD [15]

6.3 Propriétés thermiques :

Propriétés	Unité	PE HD
T° de fusion	°C	120 - 136
-T° Vicat	°C	85 – 87
-Tg	°C	Environ –110
-Plage de T° de résistance	°C	De – 70 à + 60
-Retrait au moulage	%	1,5 – 3,5

Tableau I- 3 Les propriétés thermiques du PE HD [15]

6.4 Propriétés électriques

Le PE présente d'excellentes propriétés d'isolation électrique quelles que soient sa masse moléculaire et sa cristallinité. Sa faible permittivité relative et son faible facteur de dissipation diélectrique font de lui un matériau de choix en isolation électrique [16].

Propriétés	Unité	PE HD
-Cte diélectrique 1MHz		2.25 – 2.35
-Résistivité volumique	$\Omega \cdot \text{Cm}$	$> 10^{18}$
-Rigidité diélectrique	kV	≥ 65 pour épaisseur de 0,4mm

Tableau I- 4 Les propriétés électriques du PE HD [15]

7 Propriétés PEBD

7.1 Propriétés physique

Le PEBD est un polymère semi-cristallin, de densité située entre 0.91 et 0.92. Son taux de cristallinité est d'environ 43% à 50% et sa température de fusion cristalline est située entre 110 °C et 120 °C.

Propriétés	Unité	PE BD
- Structure		Ramifiée
-Masse volumique	g/cm^3	0,915-0,935
-Taux de cristallinité	%	55-70
-Température max de service	°C	70
-Température de fusion	°C	110-120
-Transition vitreuse	°C	Env. 110
-Indice de réfraction		1.51
-Permittivité à 1MHz		2.2-2.35
-Résistivité	$\Omega \cdot \text{Cm}$	10^{15} - 10^{18}

Tableau I- 5 Les propriétés physiques du PE BD [14]

7.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du PEBD dépendent essentiellement de sa masse molaire et de sa cristallinité. Nous pouvons citer entre autres [17]:

- La résistance à la traction variant de 9 à 23 MPa.
- L'allongement à la rupture variant de 150% à 1000%.
- Le module d'élasticité en traction variant de 200 à 500MPa.

Propriétés	Unité	PE HD
-La résistance à la traction	MPa	9-23

-L'allongement à la rupture	%	150-1000
-Le module d'élasticité en traction	MPa	200-500

Tableau I- 6 Les propriétés mécanique du PE BD [15]

7.3 Propriétés électriques

Le PEBD est une substance non polaire, caractérisée par : une permittivité relative faible (≈ 2 à 3) limitant ainsi le courant de déplacement, un facteur de pertes diélectriques relativement faible, et une rigidité diélectrique élevée [17].

Propriétés	Unité	PE HD
-Permittivité relative		Fiable (2-3)
-Facteur de pertes diélectriques		Fiable
-Rigidité diélectrique		Elevé

Tableau I- 7 Les propriétés électriques du PE BD [18]

8 Utilisation de polyéthylène dans l'isolation électrique

Le polyéthylène(PE) est principalement utilisé pour les câbles moyenne et haute tension en raison de ses excellentes propriétés diélectriques. Il existe sous deux formes : le polyéthylène basse densité (PEBD) et le polyéthylène haute densité (PEHD) qui est utilisé dans les réseaux de transport où la tension peut atteindre 500 kV est également utilisé pour la fabrication d'objets plastiques rigides [19].

9 Avantages du PE

On peut citer ces différents avantages [20] :

- Excellentes propriétés d'isolation électrique ;
- Il possède une solidité importante ;
- Il résiste aux chocs et à l'abrasion, même à froid ;
- Ces propriétés mécaniques lui garantissent une robustesse et inaltérabilité ;
- Il est employé pour la fabrication des gilets pare-balles ;
- Il possède également un faible coefficient de friction ;
- Inertie chimique ;
- Non toxique pour usages alimentaire ;

- Il a une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation ;
- Employé pour la production de cuves ;
- Il empêche la formation d'algues et il peut être traité avec des agents anti-UV.

10 Inconvénients

On peut citer ces différents inconvénients [20]:

- Sensibilité aux UV en présence d'oxygène ;
- Sensibilité à la fissure sous contrainte ;
- Mauvaise tenue à la chaleur ;
- Collage important.

11 Sécurité

Le polyéthylène est léger et résistant, les produits en polyéthylène sont faciles à manipuler et réduisent les risques sur les chantiers par exemple, comparé à d'autres matériaux [21].

Chapitre II

MECANISME DE

RUPTURE DES ISOLANTS ELECTRIQUES SOLIDES

1 INTRODUCTION

La partie qui a incité le plus d'attention et d'études dans les équipements électriques de haute tension est l'isolation. Elle est indispensable pour le bon fonctionnement de l'équipement. Sa fonction principale est de garantir l'isolation électrique des éléments actifs. Sa fonction secondaire est de diffuser efficacement la chaleur produite par l'effet de Joule, afin de diminuer la température de fonctionnement et ainsi de prolonger la durée de vie des installations [22].

Un matériau d'isolation subit bien sûr une contrainte de champ électrique mais aussi en général une contrainte de température et diverses autres contraintes chimique ou mécanique. Dans la mesure où le matériau peut être en contact avec l'atmosphère, les effets de l'oxygène et de l'eau doivent être considérés [23].

Les matériaux, au sens large, ont joué un rôle prépondérant dans les progrès faits par les matériels électriques et les matériaux isolants sont parmi ceux dont le choix et l'emploi posent les problèmes les plus délicats à résoudre dans la conception, la réalisation et l'exploitation des systèmes électriques [24].

Dans ce chapitre, nous définissons en premier lieu, les matériaux diélectriques ou isolants électriques, et ses différentes caractéristiques, puis nous intéressons à la rupture diélectrique des isolants solides et les différents mécanismes du phénomène de claquage ainsi que les facteurs d'influences sur les tests diélectriques.

2 Matériaux diélectriques

Les matériaux diélectriques peuvent être assimilés aux matériaux isolants. L'isolation électrique est rattachée à une grandeur physique mesurable appelée résistivité, qui s'exprime en ohms multiplié par l'unité de longueur ($\Omega.m$). À la différence d'un milieu conducteur, les matériaux diélectriques idéaux ne contiennent pas de charges libres dans leur volume car les atomes impliqués dans ces matériaux partagent leurs électrons et sont donc liés structurellement par des forces électriques. Ces charges liées ne sont pas susceptibles d'effectuer que de faibles déplacements par rapport à leur position d'équilibre.

Les meilleurs isolateurs les plus courants sont le quartz, l'alumine, le polycarbonate, le polyéthylène et le polypropylène [25].

3 Conduction électrique dans les isolants

Dans le cas des diélectriques parfaits, la conductivité est nulle : il n'y a pas de conduction.

L'énergie nécessaire à un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction est trop élevée. Étant donné que les diélectriques sont des isolants qui possèdent des défauts, la réalité est bien différente. Les impuretés présentes dans l'isolation agissent de la même manière que les dopants dans les semi-conducteurs. Ces impuretés peuvent être métalliques ou ioniques et posséder des électrons libres.

Les polymères semi-cristallins, qui sont souvent utilisés comme isolant, ont des zones cristallines et amorphes. Les électrons provenant des impuretés sont situés dans les zones amorphes et ils peuvent faire de petits sauts d'un site à un autre grâce à l'agitation thermique.

Ces sites sont en fait différentes zones amorphes. Ces zones peuvent être reliées à plusieurs autres et créer un réseau où des charges sont capables de voyager et traverser complètement l'isolation. Ce phénomène, appelé conduction par saut, peut également créer un courant très faible qui peut toutefois être détecté dans certaines situations [25].

3.1 La rigidité diélectrique

D'après Menguy, la rigidité diélectrique d'un matériau est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut lui appliquer sans que ne se produise un claquage. Le claquage est précédé par une augmentation importante du courant circulant dans le matériau avec des conséquences thermiques destructives pour le matériau qui n'assure plus son rôle d'isolant.

La tenue diélectrique est une des propriétés les plus importantes car elle qualifie la fonctionnalité principale de l'isolant : sa tenue en tension maximale garantissant toujours ses propriétés d'isolation électrique.

Le claquage survient d'autant plus facilement que des défauts ou impuretés ionisables sont présentes dans l'isolant. Citons par exemple le dé piégeage massif de la charge stockée

ou encore la sur-sollicitation locale due à des charges d'espace modifiant le champ local. Le suivi de cette propriété présente donc un intérêt pour notre étude [26].

4 Essais de rigidité électrique

L'essai de rigidité diélectrique est destiné à éprouver les éléments isolants des composants et des différents sous-ensembles constituant un équipement électrique et à vérifier que les lignes de fuite, soit entre points, soit entre points et la masse, sont convenablement prévues suivant la technologie employée.

Le principe d'un essai de rigidité diélectrique est d'appliquer une tension (continue ou alternative) entre les points définis et après stabilisation de la tension de vérifier qu'il n'y a pas un courant de fuite supérieur à la valeur nominale admissible dû à des phénomènes de claquage ou de décharges disruptives (dans l'air ou dans les matériaux isolants).

La sanction de défaut est déterminée par l'analyse de la forme, de l'amplitude et du temps de maintien du courant fourni par le générateur à l'élément en test et par comparaison avec une consigne déterminée [27].

4.1 Choix de la tension d'essai

Les essais de rigidité diélectrique devant permettre de vérifier que des matériaux ou des équipements répondent aux exigences des normes, il est important de se référer à ces normes pour choisir la tension de mesure.

En l'absence d'indication concernant la valeur de tension d'essai, une règle habituelle est d'appliquer la formule suivante [27]:

$$U_{\text{essai}} = 2 \times U_{\text{nominal}} + 1000 \text{ volts.} \quad (\text{II. 1})$$

4.1.1 Essais de rigidité en tension alternative

4.1.1.1 Avantage

- L'échantillon est éprouvé avec les 2 polarités de tension [27]

4.1.1.2 Inconvénients

- Nécessite d'ajuster le seuil de courant de fuite permanent (IMAX) en fonction de la capacité de chaque échantillon.

- Dans le cas d'un produit utilisé en final sous une tension continue, l'essai en tension alternative peut avoir des conséquences gênantes sur sa durée de vie en raison notamment de l'échauffement et de l'effet CORONA. L'orientation des molécules sous l'action d'un champ électrique se fait avec frottement donc avec échauffement qui se produira en tension alternative à chaque période soit toutes les 20 ms ou 16 ms. D'où un essai plus sévère que ce qui est prévu en tension continue [27].

4.1.2 Essais de rigidité en tension continue

4.1.2.1 Avantage

- La puissance de la source HT peut être inférieure à celle nécessaire en alternatif (poids moindre et sécurité pour l'utilisateur). Le courant ne circule dans l'échantillon que durant la phase décharge [27].

4.1.2.2 Inconvénients

- Le courant de charge peut faire déclencher la détection de claquage.
- L'échantillon ayant été chargé il faut le décharger au travers de la résistance de décharge incorporée dans les appareils (1,5 MW). Attention attendre suffisamment pour que la capacité de l'échantillon se soit déchargée avant de le déconnecter de l'appareil soit d'environ 8 secondes par μF .
- L'échantillon n'est essayé que dans une seule polarité.
- La tension d'essai doit être supérieure à celle prévue en alternatif. Une règle simple est d'utiliser le facteur de correction 1,4 (racine carrée de 2 = rapport entre la valeur efficace d'un signal alternatif et sa valeur crête) entre la tension continue et la tension alternative [27].

$$U_{\text{continue}} = 1,4 \times U_{\text{alternative}} \quad (\text{II. 2})$$

5 Rupture diélectrique

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

traction qui n'est pas uniquement fonction de la force appliquée, mais fonction de la force par unité de section transversale.

Si la tension appliquée est augmentée progressivement, il y aura une tension à laquelle la rupture électrique se produira, c'est-à-dire, au cours de laquelle une étincelle transitera entre les deux électrodes. On pourra alors calculer la rigidité diélectrique ou le champ disruptif du matériau isolant [28].

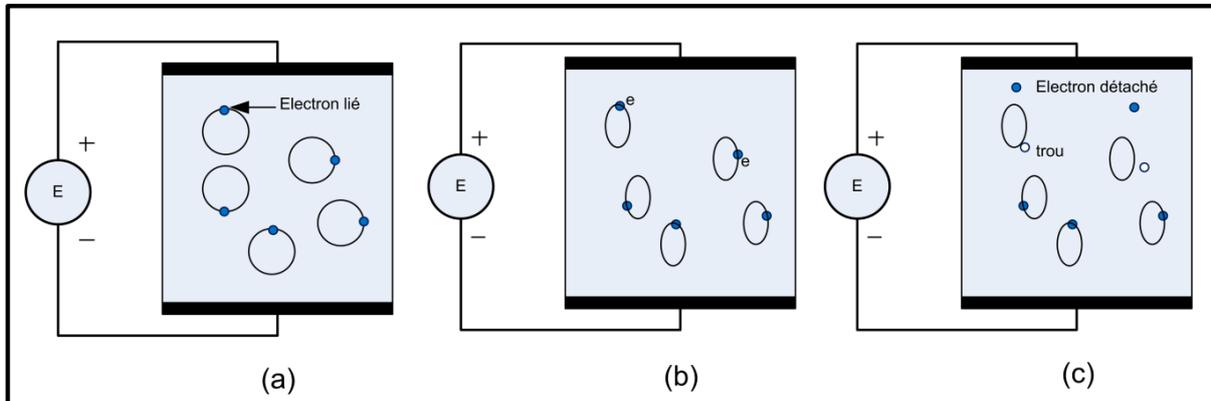


Figure II- 1Processus de rupture électrique dans un diélectrique a) faible tension b) tension élevée c) tension de rupture [22]

Trois cas de rupture à court terme sont évoqués dans la caractéristique :

- La rupture thermique : toutes les ruptures électriques finissent par un effet thermique, mais dans la rupture thermique, c'est la température qui est à l'origine de la rupture par un effet d'emballement du courant non compensé par la diffusion de la chaleur.
- La rupture électrique (ou électronique) : il y a un développement d'une instabilité électrique très rapide dans laquelle sont impliqués les porteurs électroniques.
- La rupture électromécanique : elle est due à l'apparition d'une force de compression impliquant une diminution de l'épaisseur du matériau et donc une augmentation du champ électrique ce qui engendre la rupture.

6 Claquage des isolants solides

Les matériaux solides isolants sont souvent présents dans les équipements électriques. Ils sont généralement constitués de polymères organiques tels que les résines d'époxy, le polyéthylène, le papier, etc. Ils ont de bonnes propriétés diélectriques, pouvant atteindre

1000 kV.mm⁻¹, leur rigidité est la meilleure qui soit. Mais la présence de défauts tels que des impuretés, des cavités gazeuses ou des aspérités condamne de façon très remarquable cette tenue électrique.

Le claquage des diélectriques solides est un phénomène destructif, complexe qui implique plusieurs mécanismes de dégradation (électronique, thermique et mécanique). Il modifie de façon irréversible la structure du matériau. Comme pour les gaz et les liquides, la rupture diélectrique des solides se rattache à plusieurs paramètres, physiques, électriques et chimiques tels que la géométrie et la structure des échantillons, les paramètres environnants (température, contraintes mécaniques), ainsi que la procédure d'application de la tension [28,29,30].

Selon les mécanismes responsables des claquages, on peut les classer comme suit [31]:

- Le claquage thermique,
- Le claquage intrinsèque,
- Le claquage électromécanique.

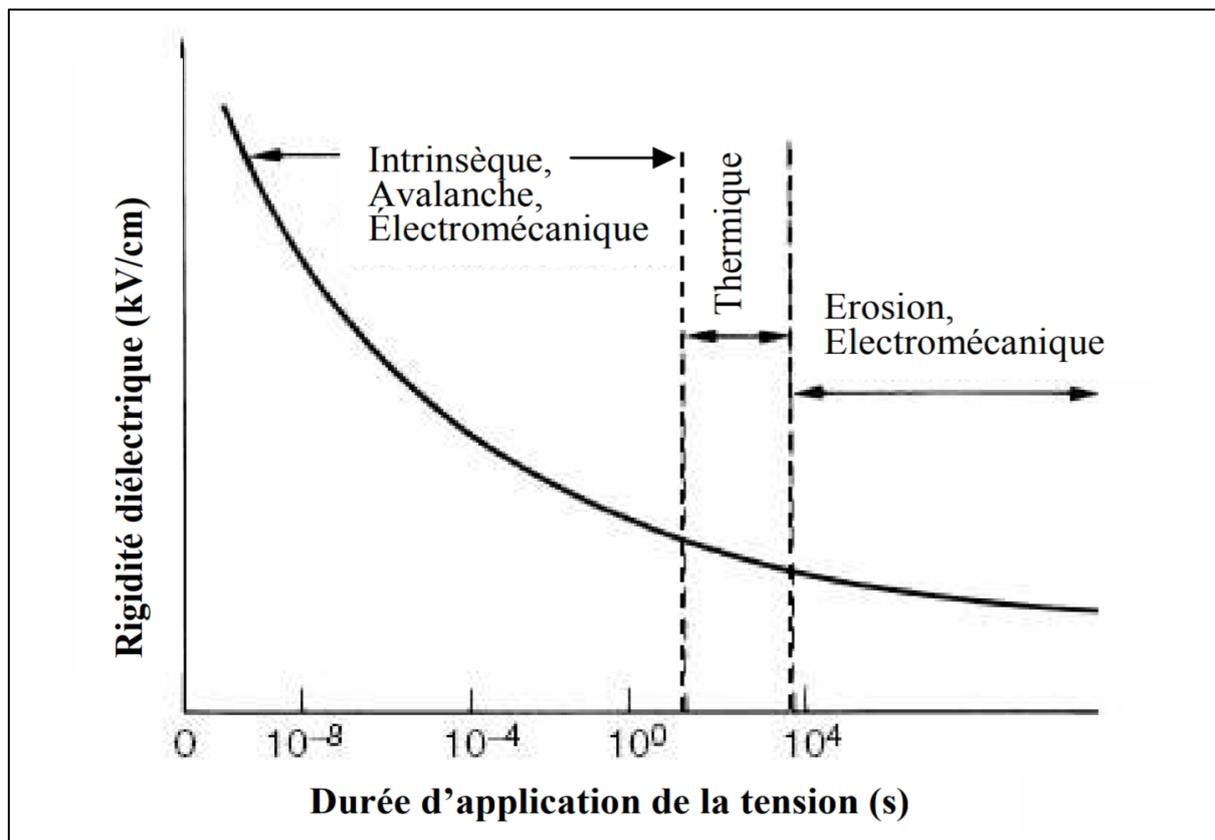


Figure II- 2 Différents types de claquage des isolants solides

6.1 Claquage thermique

Lorsque l'on applique un champ électrique à un matériau isolant, on sait qu'un courant

(généralement très faible) circule entre les électrodes. La circulation de ces courants dans le matériau a pour conséquence un transfert d'énergie qui chauffe le matériau. Cet échauffement doit être compensé par les pertes thermiques par conduction dans le matériau pour que l'équilibre soit conservé [31].

L'équilibre entre la dissipation thermique et l'énergie prise au champ est décrit par l'équation différentielle suivante (II. 3) :

$$\sigma E^2 = c_v \rho \frac{dT}{dt} - \text{div.} [K \text{ grad } T] \quad (\text{II. 3})$$

C_v :représente la capacité thermique massique à volume constant,

ρ :la masse volumique,

T : la température,

σ :la conductivité électrique,

E : le champ électrique,

K : conductivité thermique

t : le temps.

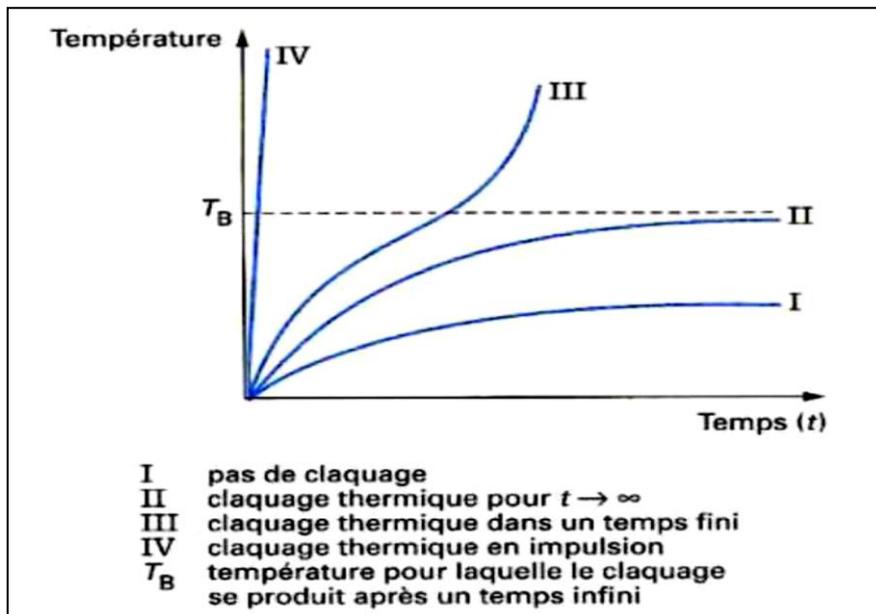


Figure II- 3 Représentation schématique des conditions de stabilité et d'instabilité pour le claquage thermique [32]

6.2 Claquage intrinsèque

Il s'agit du mécanisme le plus simple parmi les différents mécanismes de claquage existants.

Ce type de claquage appelé parfois «claquage purement électrique» ne dépend pas des électrodes ni de l'épaisseur de l'isolant. Sous l'effet du champ électrique, des électrons de la bande de conduction entrent en collision avec les particules de l'isolant produisant le claquage. Le claquage intrinsèque a lieu lorsque l'intensité du champ électrique est suffisamment élevée pour produire une instabilité du courant électronique. Pour que cette instabilité ait lieu, il faut que les électrons reçoivent plus d'énergie du champ extérieur qu'ils n'en perdent lors de leur freinage [20,33].

6.3 Claquage électromécanique ou électrodynamique

En plus des contraintes électriques, ce type de claquage dépend fortement des propriétés mécaniques notamment le module de Young . Il est la résultante de l'effet des deux contraintes électriques et thermiques. Lorsque l'isolant est assujéti à un champ électrique intense, son épaisseur tend à diminuer sous l'effet de l'attraction électrostatique entre les électrodes. Cela entraîne un renforcement du champ électrique menant à sa rupture.

À l'équilibre, la pression créée par les forces électrostatiques est égale à la réponse élastique de l'isolant. Ainsi, on peut écrire [34]

$$\epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{v}{d}\right)^2 = Y \log \left\{ \frac{d_0}{d} \right\} \quad (\text{II. 4})$$

Y est le module de Young, d_0 est l'épaisseur initiale de l'isolant et d représente l'épaisseur finale de l'isolant après l'application de la tension V. D'où

$$v = d \left(\frac{2Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \log \left(\frac{d_0}{d} \right) \right)^{1/2} \quad (\text{II. 5})$$

Où ϵ_r est la permittivité relative et ϵ_0 représente la permittivité du vide qui est égale à $8,85 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$.

6.4 Contournement

Il est évident que la rigidité diélectrique des isolants solides est beaucoup plus grande que celles des isolants liquides et gazeux. Par conséquent, il se produira une décharge glissante plutôt qu'un claquage. Le contournement est la formation d'un chemin de conduction permanent sur la surface d'un isolant qui, dans la plupart des cas provoque la dégradation de l'isolation [35].

7 Influence de divers paramètres sur la tension de claquage

Lors des essais, il est très important de tenir compte des différents paramètres qui peuvent influencer les valeurs de la tension de claquage des isolants solides lors de l'interprétation des résultats. Parmi les facteurs influençant la tension de claquage, nous pouvons citer [36].

7.1 Tension appliquée

La tension appliquée est celle qui influe en premier lieu suivant sa forme, son amplitude, sa durée d'application ou sa polarité (continue, alternative ou impulsionnelle). À titre purement indicatif, on retiendra que la rigidité diélectrique en tension continue est souvent proche de celle en tension alternative (valeur efficace) multipliée par $\sqrt{2}$. Toujours à titre indicatif, on constate que le rapport entre la rigidité diélectrique en onde de choc (1,2/50 μ s) et celle mesurée en tension continue est de l'ordre de 2. Cependant, ces valeurs sont à prendre avec prudence et doivent être vérifiées sur le matériau expérimenté [36].

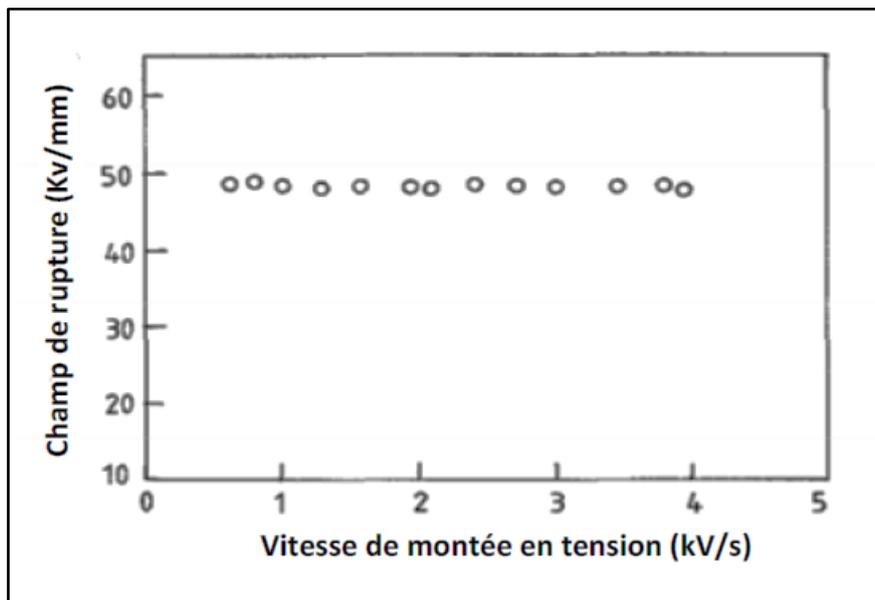


Figure II- 4 Champ électrique de claquage en fonction de la vitesse de montée en tension

7.2 Epaisseur

L'augmentation de la densité de défauts (cavités gazeuses, impuretés conductrices, présence d'humidité par absorption) dans le volume soumis au champ réduit considérablement la valeur de la rigidité diélectrique. C'est pour cette raison que l'augmentation de l'épaisseur de l'éprouvette réduit la valeur de la rigidité diélectrique. On constate que la tension de claquage est généralement proportionnelle à l'épaisseur à la

puissance n (avec n voisin de 0,7). Il est donc indispensable de donner, avec toute valeur de rigidité diélectrique, l'épaisseur des éprouvettes d'essai [36].

7.3 Température

Le comportement diélectrique à la rupture des isolants solides diffère selon qu'on se place dans la plage haute ou basse température par conséquent il faut considérer deux gammes de température, haute et basse températures, la gamme haute température correspond aux températures au-dessous de la température de frittage mais voisine de cette dernière. Contrairement à la gamme basse température, la rigidité diélectrique des céramiques dans la gamme haute température a tendance à diminuer d'une manière très significative. Généralement, l'augmentation de la température a pour effet, de réduire la rigidité diélectrique. Cela a différentes origines telles que l'augmentation de la conduction, l'obtention d'un claquage thermique [36].

8 Les facteurs d'influence sur les tests diélectriques

On appelle facteurs d'influence sur les essais de rigidité et d'isolement, tous les éléments qui peuvent modifier ces propriétés [31].

Parmi les facteurs d'influence on peut citer :

8.1 Les facteurs physiques

- température,
- humidité,
- contraintes mécaniques : vibrations, chocs, déformations, pression...

8.2 Les facteurs électriques

- tensions,
- courant continu : polarité,
- courant alternatif : fréquence,
- chocs électriques : impulsions.

8.3 Les facteurs chimiques :

- impuretés,
- oxydation,

- etc.

Il est important de noter qu'en pratique ses facteurs n'agissent jamais seuls (sauf en laboratoire au cours d'expériences spécialement mises en œuvre pour étudier un facteur particulier), bien souvent ils interagissent en modifiant les lois qui les caractérisent et rendent ainsi plus complexes leurs analyses.

9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les matériaux isolants solides en général, en termes de rigidité, de polarisation et de caractéristiques, ainsi que les essais de rigidité, mais nous nous intéressons particulièrement au mécanisme de rupture des isolants solides et aux facteurs qui influent sur les tests diélectriques.

Chapitre III Partie

expérimentale

1 INTRODUCTION

Dans ce travail, la démarche adoptée consiste à effectuer des tests pour déterminer la rigidité diélectrique des films en polyéthylène. Il existe plusieurs procédures de base qui peuvent être utilisées pour déterminer la rigidité diélectrique d'un isolant. Pour nos essais la procédure qui nous intéresse est le teste à court terme, ces procédures peuvent être réalisées selon le même principe en plaçant un échantillon entre deux électrodes. Les tests se réalisent dans l'air ou dans l'huile, généralement, ils doivent être réalisés dans l'huile pour éviter le contournement de l'isolant.

Dans ce chapitre, nous exposons en premier lieu, le matériau étudié, la préparation des éprouvettes et les dispositifs expérimentaux. En deuxième lieu, nous expliquons la procédure expérimentale. Enfin et en dernier lieu, nous donnons les résultats obtenus ainsi que leurs interprétations.

Entre autres, les résultats de mesure des essais de rupture à court terme, seront traités par la méthode de Weibull, ensuite soumis au test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov, tout en utilisant, des intervalles de confiance à 90 % pour encadrer les vraies valeurs recherchées.

2 MATERIAUX ET TECHNIQUES

2.1 Matériaux étudiés et préparation des échantillons

Les échantillons étudiés sont des films préparés à partir d'un rouleau en polyéthylène, qui a été fourni par le Laboratoire de Haute Tension de l'Université de Bejaia.

Les polyéthylènes sont des polymères qui font partie de la famille des polyoléfinés et en particulier des thermoplastiques, est principalement utilisé pour les câbles moyenne et haute tension en raison de ses excellentes propriétés diélectriques.

Le rouleau est de 100m de longueur et de 2m de largeur. Les éprouvettes découpées, sont rectangulaires de $(25*40)$ cm² et de 0.197mm d'épaisseur.



Figure III- 1 Eprouvettes utilisées pour les essais de claquage

2.2 Dispositifs expérimentaux

2.2.1 Dispositif des essais sous tension alternative sinusoïdale

La figure ci-après montre le dispositif de mesure de la tension de claquage sous tension alternative. Ce dispositif est composé des éléments suivants :

- Un générateur haute tension composée d'un transformateur HT(T100) 0.8/135 kV; pouvant délivrer une tension allant de 0 à 100 kV pour des essais en alternatif, et d'un appareil de commande avec deux modes : automatique et manuelle, et avec plusieurs vitesses de montée de la rampe,
- Un diviseur de tension capacitif ($C_0=0.1\mu F$ et $C_u=41.4\mu F$),
- Un voltmètre de crête (V) AC/DC de type MU11, à affichage digital,
- Une résistance de protection $R=106k\Omega$ limitant le,
- Un bâti servant de support pour l'ensemble éprouvette et électrodes,
- Cellule de mesure,
- Enfin, l'ensemble dispositif-échantillon est entouré par une cage de protection.

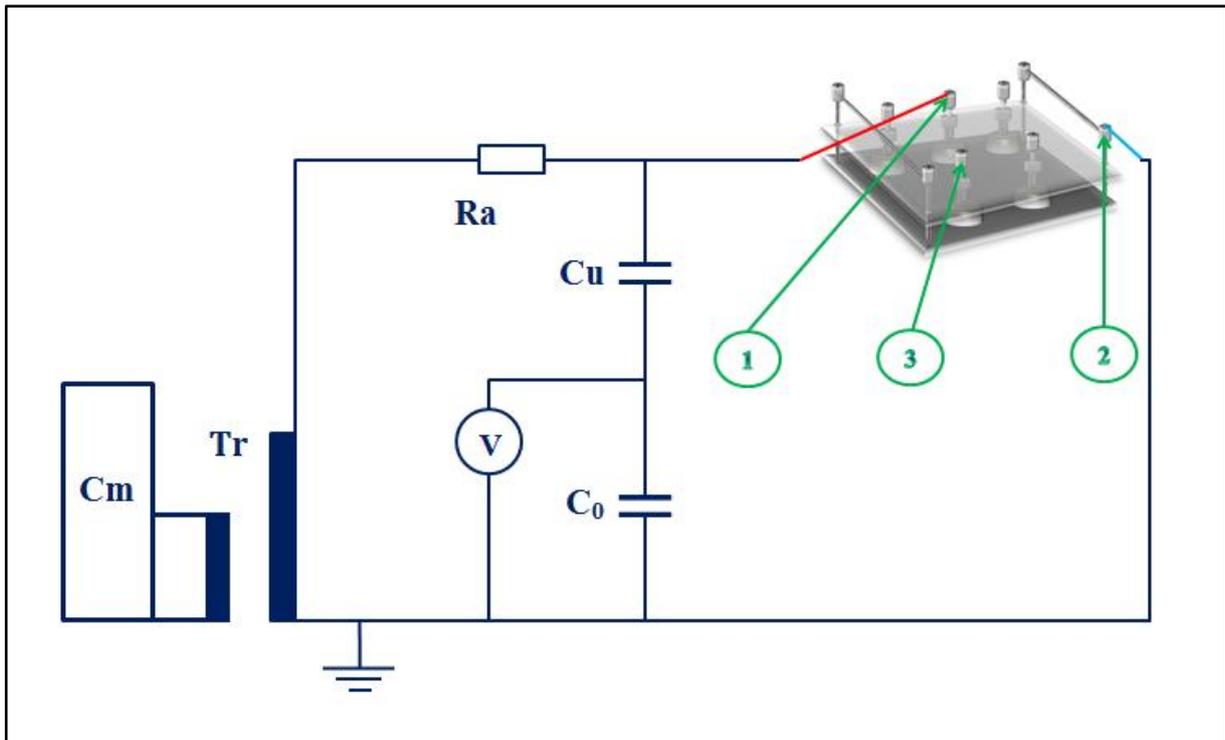


Figure III- 2 Schéma de dispositif des essais de claquage sous tension alternative sinusoïdale

1 et 3 : Electrodes HT (haute tension)

2 : Electrode de la terre

Cm : Appareil de commande automatique et manuelle

Tr : Transformateur HT

Ra : Résistance de protection ($R_a = 106 \Omega$)

Cu : Condensateur de haute tension ($C_u = 41 \mu F$)

C₀ : Condensateur de base tension ($C_u = 0.1 \mu F$)

V : Voltmètre de crête

2.2.2 Dispositif des essais sous tension continue

La figure ci-dessous montre le dispositif de mesure de la tension de claquage sous tension continue. Il contient les mêmes éléments que le dispositif précédent, sauf qu'à la place du diviseur capacitif, on utilise un diviseur résistif ($R_0=0.1 \text{ M}\Omega$ et $R_u=250\text{M}\Omega$), associé à un condensateur de lissage et une diode haute tension G270

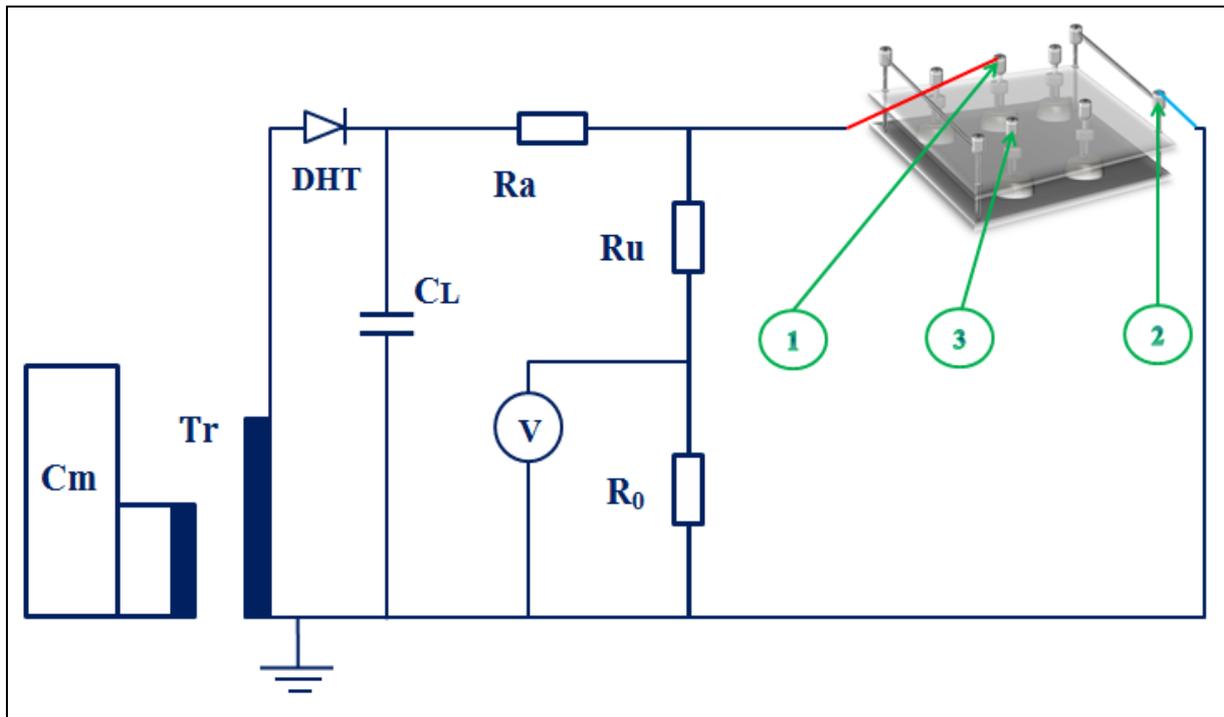


Figure III- 3 Schéma de dispositif des essais de claquage sous tension continue

1 et 3 : Electrodes HT (haute tension)

2 : Electrode de la terre

Cm : Appareil de commande automatique et manuelle

Tr : Transformateur HT

DHT : diode de haute tension (270kV)

CL : Condensateur de lissage ($CL = 10 \mu F$)

Ra : Résistance de protection ($Ra = 106 \Omega$)

Ru : Résistance de haute tension ($Ru = 250 k\Omega$)

R₀ : Résistance de base tension ($R_0 = 0.1 k\Omega$)

V : Voltmètre de crête

2.3 Cellule d'essai

La cellule d'essai est composée de cinq (5) électrodes haute tension de géométrie cylindrique en inox, de quatre (4) électrodes de terre, reliés entre eux via une plaque en inox. Cette cellule peut-être immergée dans un récipient contenant une huile isolante minérale pour éviter la survenue des décharges superficielle ou de tout contournement dans l'air entre l'électrode haute tension et les électrodes de terre.

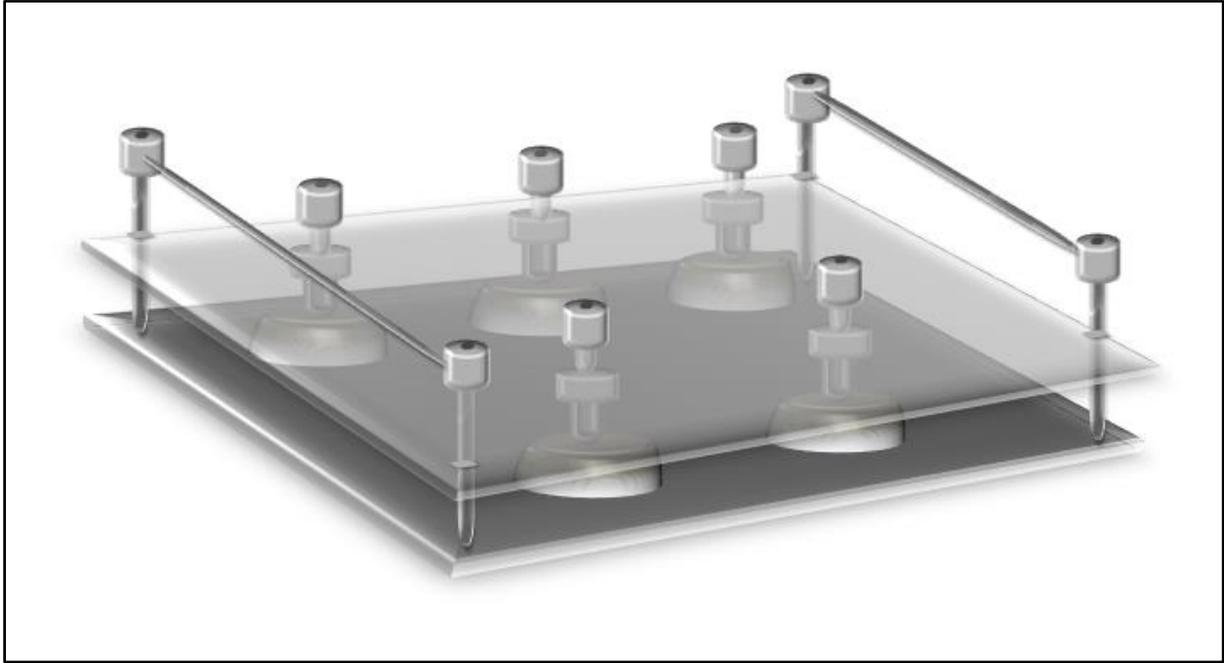


Figure III- 4 Cellule d'essais

Remarque :

L'ensemble dispositif-échantillon est entouré par une cage de protection, voir figure III- 5.



Figure III- 5 Ensemble dispositif-échantillon, entouré par une cage de protection

2.4 Procédure expérimentale

Nos essais consistent à appliquer une tension en forme de rampe à l'échantillon jusqu'au claquage, après avoir placé ce dernier entre deux électrodes et l'immergée dans une huile isolante de type Borak22 pour éviter la survenue des décharges superficielles ou de tout contournement.

Les essais ont été effectués sous six (06) différentes vitesses de rampe de tension. Les valeurs de la rampe sont entre 0,5 et 5,09 kV/s.

Les conditions ont lieu à l'air libre et la température ambiante du laboratoire, cependant, on a essayé de reproduire les mêmes conditions pour tous les essais (conditions normales de température, d'humidité et de pression).

Les essais sont effectués sous deux formes de tension : alternative sinusoïdale et continue de polarité positive. Pour chaque vitesse de rampe de chaque forme de tension ; 25 échantillons de PE sont utilisés et testés, ce qui donne un nombre de 300 points de mesure obtenus.

Des phénomènes acoustiques et lumineux ont été constatés avec l'augmentation de la tension appliquée. Au départ, nous avons observé des décharges superficielles qui éclairent le milieu, puis des crépitements suivis de bruit sourd caractérisant le claquage. La valeur de la tension de claquage est affichée et mémorisée pendant 5 secondes sur le voltmètre de crête MU11.A la carbonisation du matériau caractérisant le lieu du claquage. S'il n'y a pas de trace de claquage sur l'échantillon, c'est qu'il y a eu contournement. Dans ce cas, il est nécessaire de remuer l'huile pour dissiper les particules de carbonisation entreposées aux alentours des électrodes.

Cette opération a été faite pour toutes les éprouvettes testées sous deux formes de tension ; alternative sinusoïdale, continue de polarité positive. Et pour chaque forme de tension, les essais ont été réalisés aux différentes vitesses de rampe de tension suivantes :

1,46 ; 1,99 ; 2,43 ; 3,16 ; 3,61 ; 4,24 pour la tension alternative sinusoïdale.

1,89 ; 2,46 ; 2,95 ; 3,65 ; 4,55 ; 5,09 pour la tension continue de polarité positive.

Néanmoins, la rupture diélectrique est un phénomène aléatoire. Il s'avère alors, indispensable de soumettre une population importante d'échantillons au claquage pour chaque vitesse de l'application de la tension. Dans notre cas, ce lot est constitué de 25 échantillons. Le modèle statistique le plus utilisé pour la caractérisation de la rupture des isolants solides est le modèle de Weibull. Les valeurs de la tension de claquage relevées ont été analysées statistiquement en utilisant le modèle de WEIBULL à deux paramètres.

2.5 Traitement statistique des données

Pour le traitement des résultats de mesure obtenus lors des essais de claquage, on a choisi: le modèle statistique de Weibull [37,38]. L'équation de ce modèle à deux paramètres, approprié à l'étude des tensions de rupture, s'écrit de la forme suivante :

$$P(U) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{U}{U_c} \right)^\beta \right] \quad (\text{III.1})$$

Avec:

- P(U): probabilité de rupture,
- U: tension de claquage mesurée,
- β : paramètre de forme,
- U_c : tension nominale de claquage qui représente le paramètre d'échelle et qui correspond à une probabilité de 63,2%.

Cette probabilité de rupture est calculée par la formule des rangs médians donnée par l'équation suivante [39,40]:

$$P(i, N) = \frac{i-0.3}{N+0.4} 100\% \quad (\text{III.2})$$

Avec :

- i : Rang des valeurs de claquage après avoir trier par ordre croissant,
- N : Nombre d'échantillons testés.

Pour l'estimation des paramètres de Weibull et le lissage des points expérimentaux, on a opté pour la méthode du maximum de vraisemblance [37,41,42], et on a considéré des intervalles de confiance [37,41,43,44] à 90%.

Enfin, on a utilisé le test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov [37,41,45,46] pour valider et ajuster les résultats de traitement statistique obtenus.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Essais sous tension alternative sinusoïdale et tension continue

Diagrammes de Weibull à deux paramètres

Les résultats sont présentés dans un système d'axes, donnant $Y_i = \log\text{Ln}\left(\frac{1}{1-P_i}\right)$ en fonction de $X_i = \log U_i$. Où : U_i est la tension de claquage et P_i est la probabilité cumulée de rupture.

Ainsi, de la figure III- 6 à la figure III-11, sont représentés les graphiques de Weibull à deux paramètres des valeurs de rupture de nos échantillons pour différents niveaux de la vitesse et sous tension alternative sinusoïdale et tension continue.

Dans les figures ci-dessous (Figure III-6 à Figure III- 11) :

- AC-50Hz : tension alternative sinusoïdale,
- DC+ : tension continue de polarité positive.

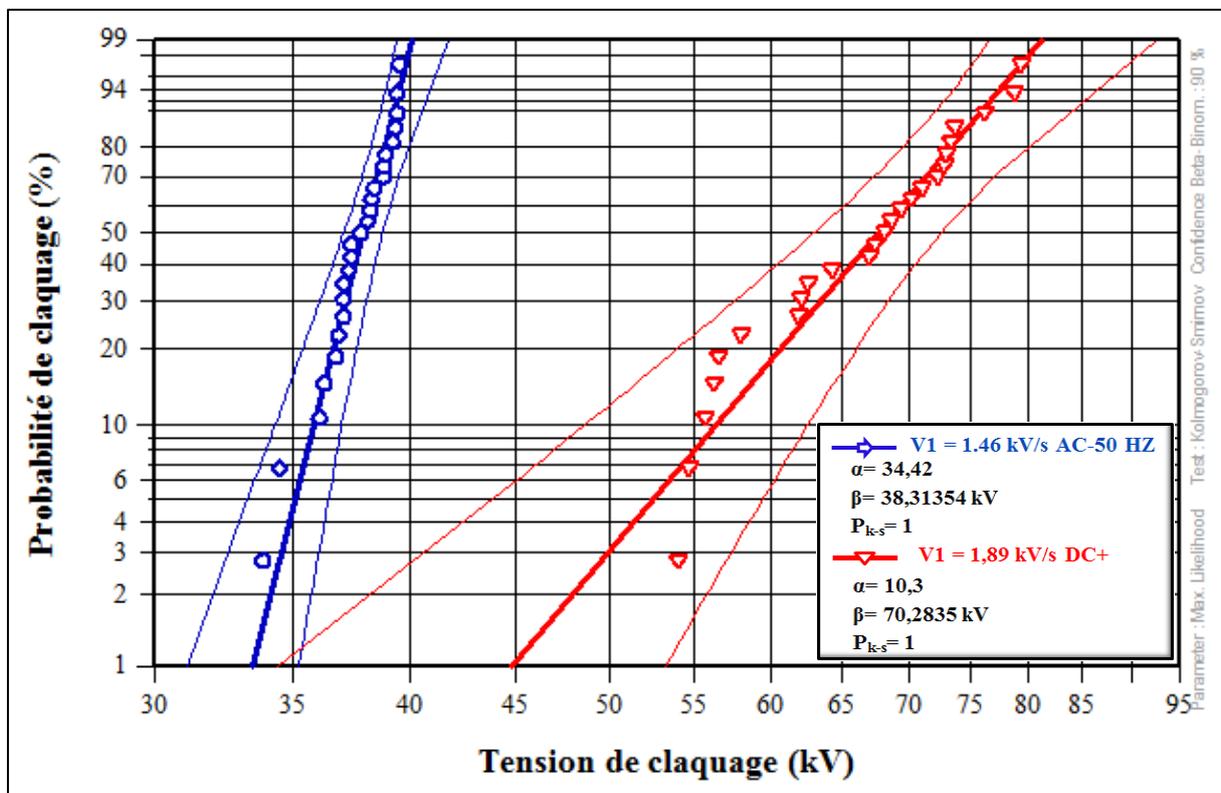


Figure III- 6 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 1.46kV/s et de tension continue de 1.89kV/s

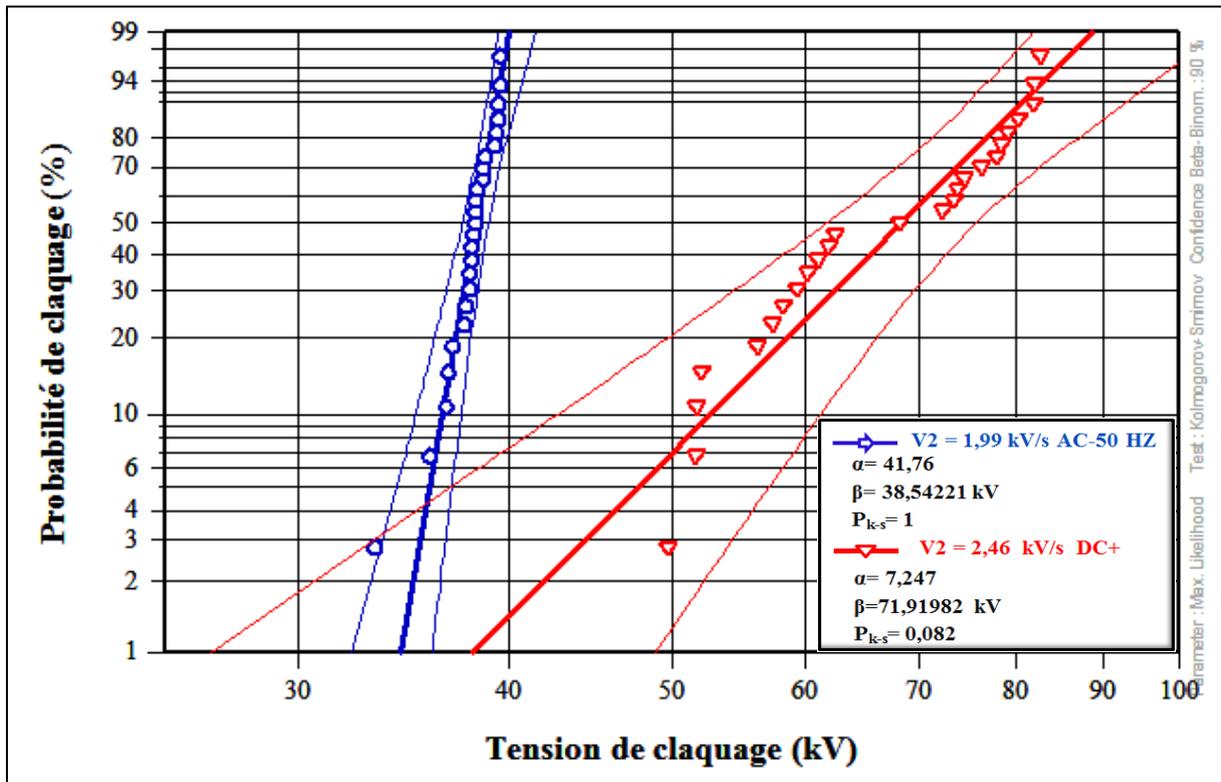


Figure III- 7 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 1.99kV/s et de tension continue de 2.46 kV/s

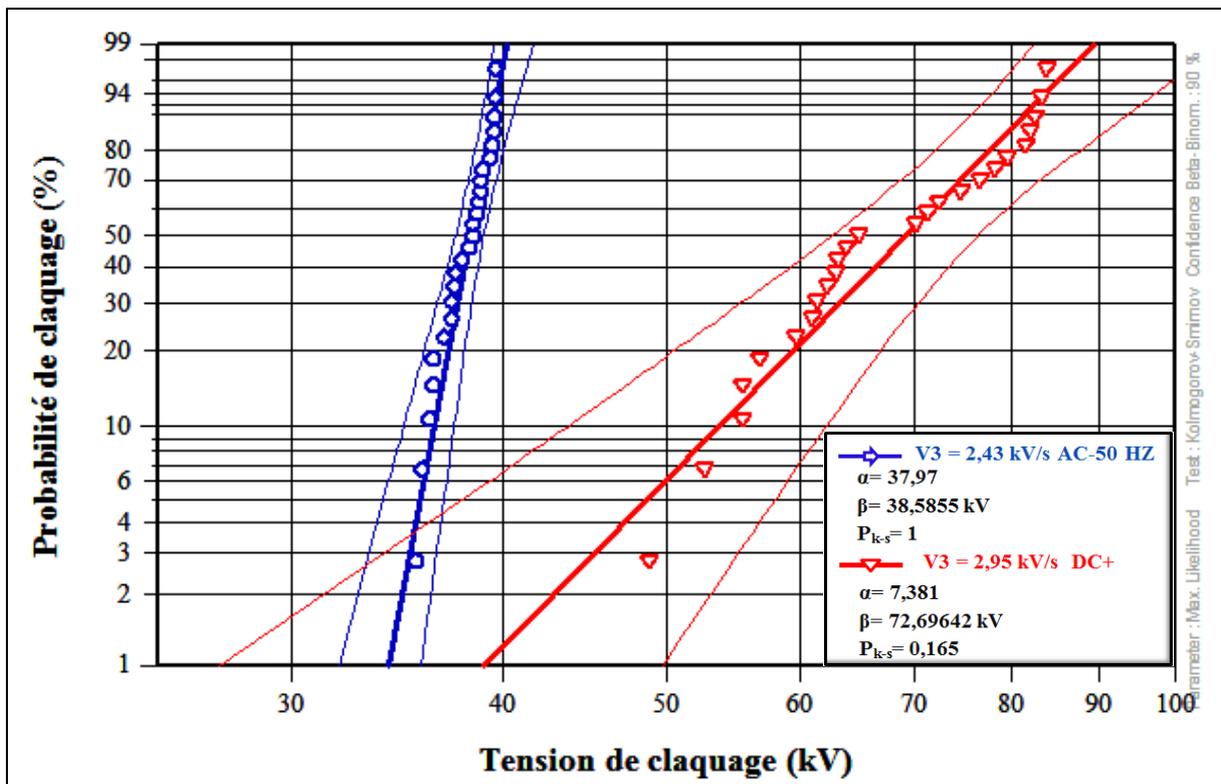


Figure III- 8 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 2.43kV/s et de tension continue de 2.95kV/s

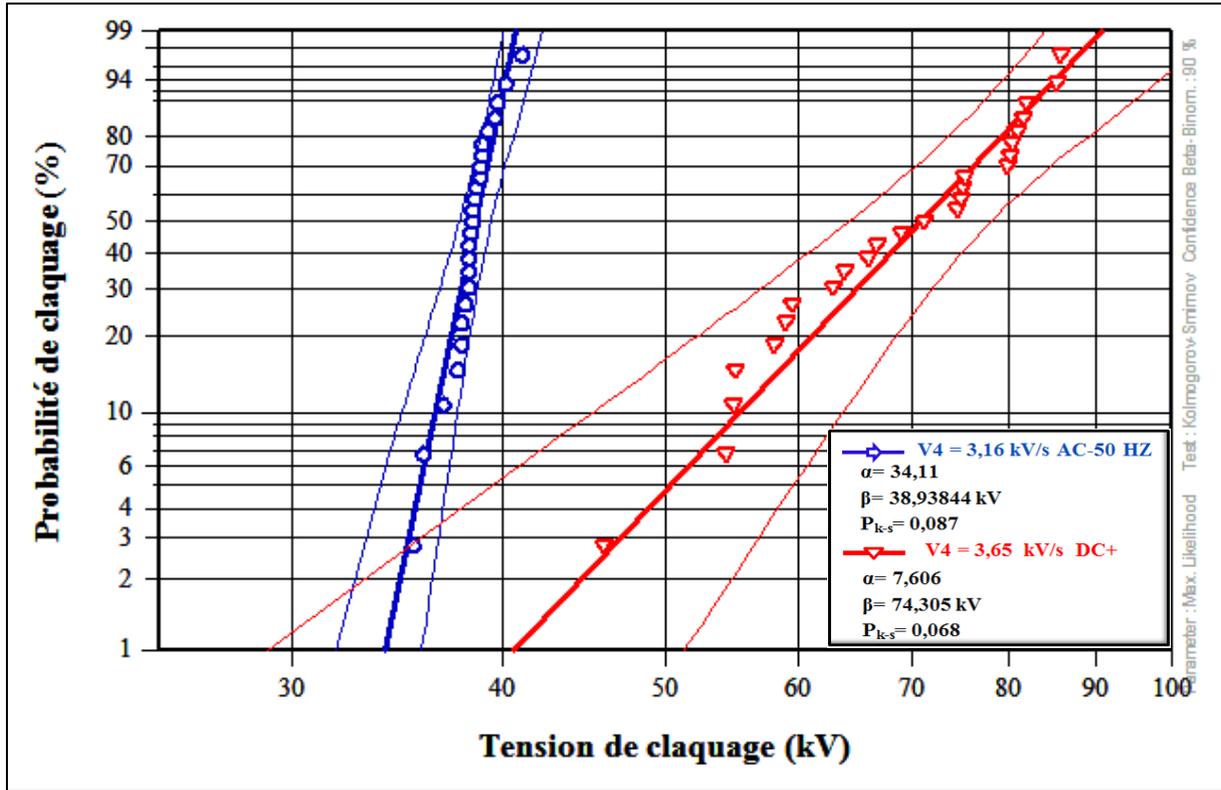


Figure III- 9 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 3.16kV/s et de tension continue de 3.65kV/s

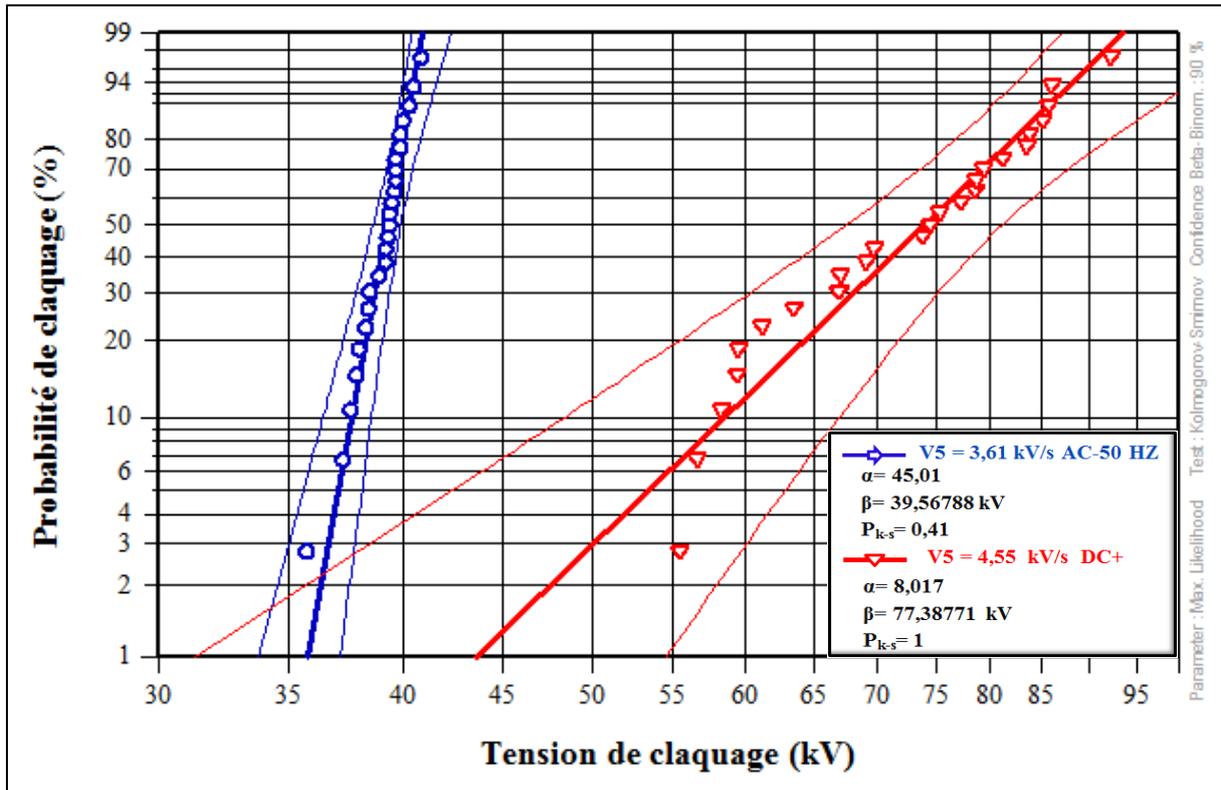


Figure III- 10 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 3.61kV/s et de tension continue de 4.55kV/s

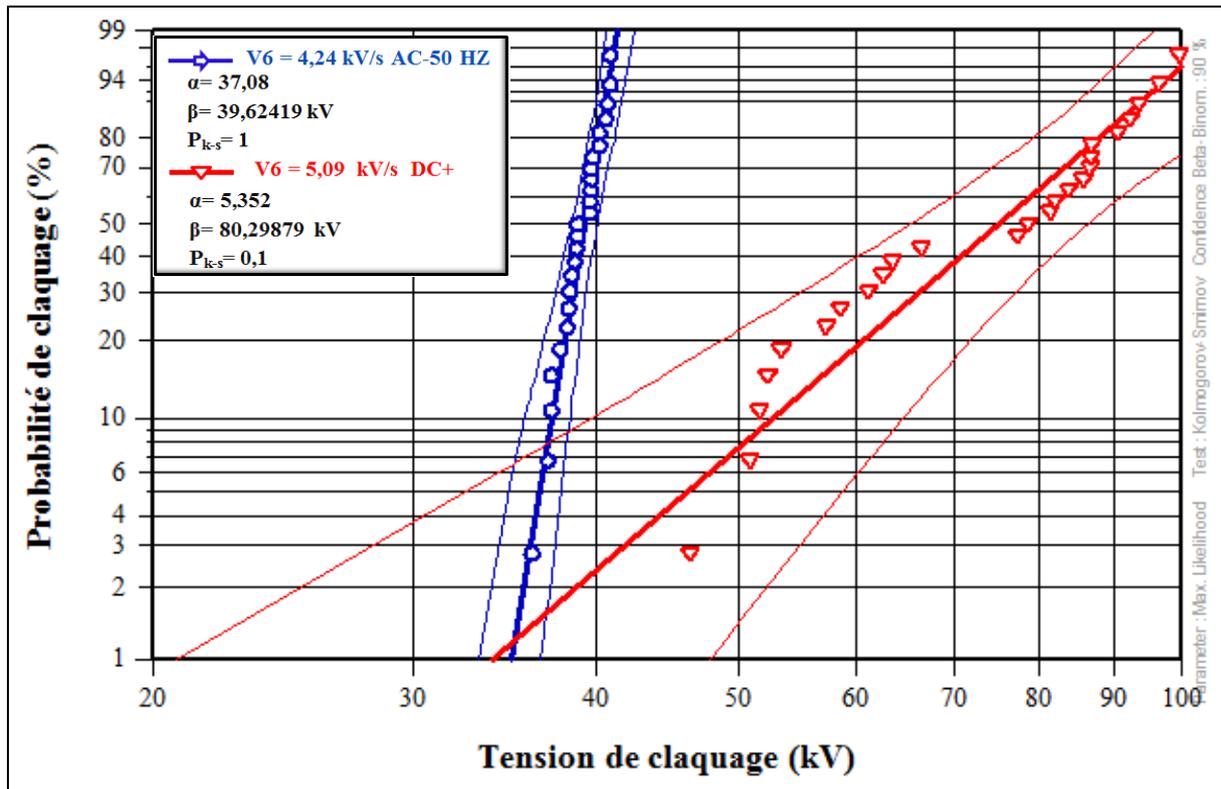


Figure III- 11 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 4 .24kV/s et de tension continue de 5.09kV/s

3.2 Résultats de l'analyse statique

Le claquage étant de nature statistique, nous avons adopté une méthode de traitement suivant la théorie de Weibull. Les données expérimentales ont été analysées à l'aide du logiciel XSel14eInst. Nous les avons représentés respectivement dans un diagramme de Weibull, illustrés sur les figures III-6, III-7, III-8, III- 9, III-10 et III-11

Tous les points expérimentaux sont situés dans les intervalles de confiance à 90 %. Le modèle de Weibull à deux paramètres peut donc être retenu sur le critère des intervalles de confiance avec un risque de 10% pour tous les points étudiés

Les tableaux III- 1 et III- 2 résument les valeurs de la rigidité diélectrique que nous avons calculés et les valeurs du Paramètre de forme α et du Paramètre d'échelle β et les valeurs du Test de Kolmogorov-Smirnov P_{KS} calculés par la méthode de Weibull à l'aide de logiciel XSel14eInst en fonction de la Rampe de tension alternative AC 50Hz (kV/s) et tension continue de polarité positive :

Rampe de tension alternative AC 50Hz (kV/s)	Paramètre de forme α	Paramètre d'échelle β = Tension de rupture (kV)	Valeur du Test de Kolmogorov-Smirnov P_{KS}	Champ de rupture (kV/mm)
1,46	34,42	38,31	1	194,48
1,99	41,76	38,54	1	195,65
2,43	37,97	38,59	1	195,87
3,16	34,11	38,94	0,087	197,66
3,61	45,01	39,57	0,41	200,85
4,24	37,08	39,62	1	201,14

Tableau III- 1 Résultats de mesures pour la tension alternative

Rampe de tension continue DC+ (kV/s)	Paramètre de forme α	Paramètre d'échelle β = Tension de rupture (kV)	Valeur du Test de Kolmogorov-Smirnov P_{KS}	Champ de rupture (kV/mm)
1,89	10,3	70,03	1	355,47
2,46	7,247	71,92	0,082	365,08
2,95	7,381	72,70	0,165	369,02
3,65	7,606	74,31	0,068	377,18
4,55	8,017	77,39	1	392,83
5,09	5,352	80,30	0,1	407,61

Tableau III- 2 Résultats de mesures pour la tension continue positive DC+

3.3 Tests d'adéquation

En ce qui concerne les tests d'adéquation, nous avons opté pour le test de distribution théorique de Kolmogorov-Smirnov pour lequel nous avons testé l'ajustement des résultats de rupture obtenus et observés depuis le modèle de Weibull à deux paramètres adoptés.

Les résultats de ce test sont donnés dans les deux tableaux : tableau III- 1, et tableau III- 2.

Le principe du test est de comparer entre la distribution observée ou issue du modèle adopté avec la distribution théorique du test [47,48].

Depuis les deux tableaux, on remarque :

Les valeurs du test de Kolmogorov-Smirnov sont toutes supérieures à 0,05.

On déduit alors que ces tests sont très favorables et confirment les résultats obtenus avec le modèle de Weibull à deux paramètres.

3.4 Effet de la rampe de tension sur la tension de claquage

3.4.1 Sous rampe de tension alternative sinusoïdale

À partir du tableau III- 1, nous avons tracé la caractéristique donnant l'effet de la rampe de tension alternative sur la tension de claquage (Figure III- 12).

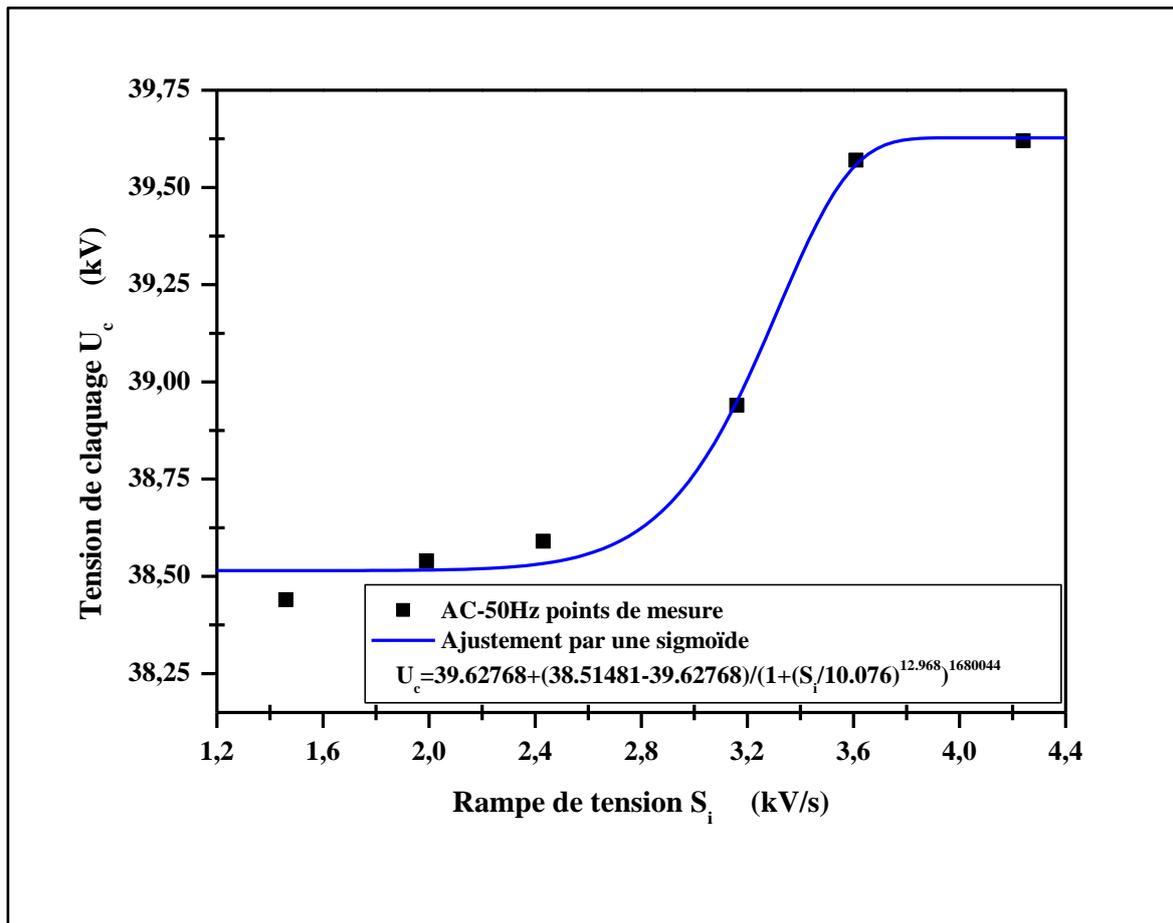


Figure III- 12 Tension de claquage en fonction des vitesses de la tension appliquée

Les résultats de la tension de claquage mesurée sont illustrés sur la même figure. Nous constatons que la tension de claquage U_c augmente en fonction de la rampe de tension S_i . Pour les faibles vitesses, on remarque une très légère augmentation de 38,31 kV jusqu'à 38,59 kV pour la vitesse 2,43kV/s, puis on remarque une grande augmentation jusqu'à 39,59 kV pour la vitesse 3,61kV/s, en suite une légère augmentation jusqu'à 39,62 kV pour la vitesse 4,24 kV/s.

Les résultats obtenus confirment que l'augmentation de la rampe de tension est accompagnée par une augmentation de la tension de claquage.

3.4.2 Sous rampe de tension continue de polarité positive

À partir du tableau : III- 2, nous avons tracé la caractéristique donnant l'effet de la rampe de tension continue sur la tension de claquage (figure III- 13).

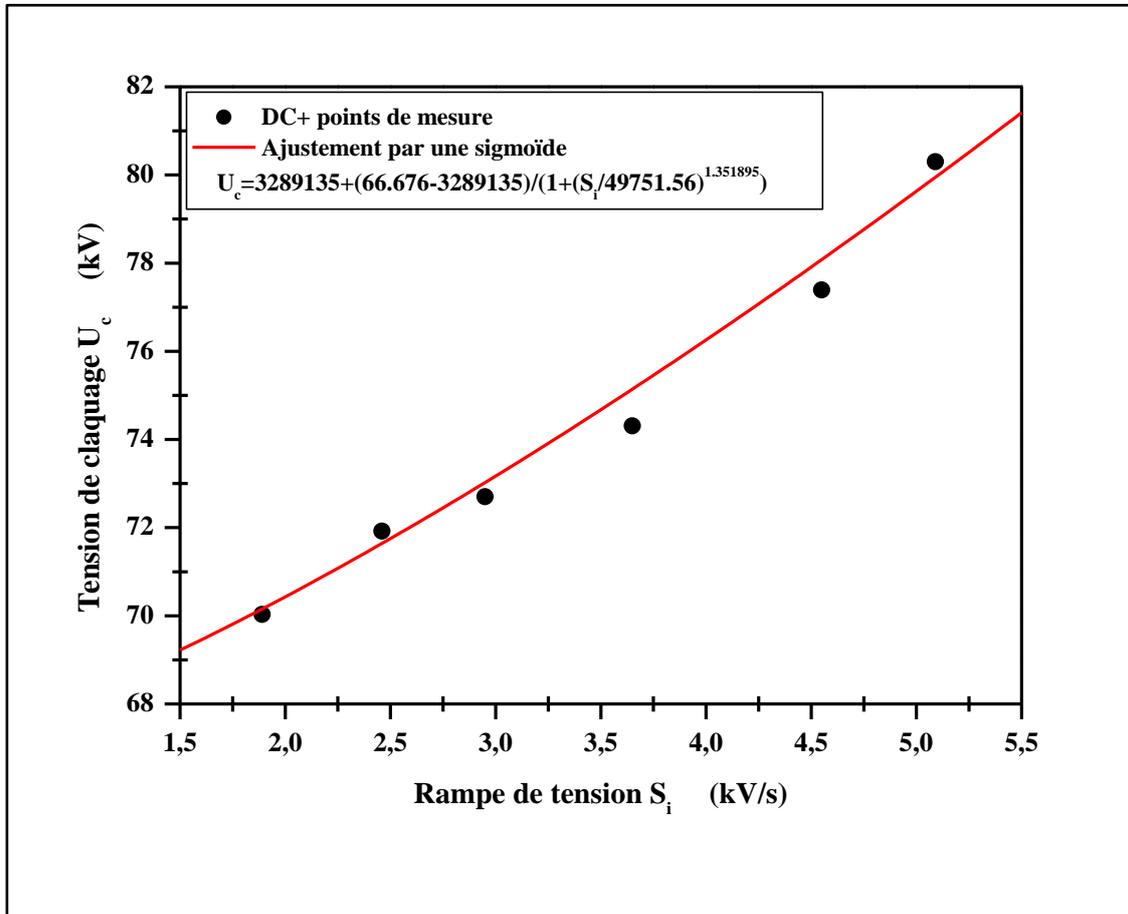


Figure III- 13 Tension de claquage en fonction des vitesses de la tension appliquée

La figure III- 13 montre que la valeur de la tension de claquage est croissante en fonction de la rampe de tension continue de polarité positive. En effet à 1,89 kV/s la tension de claquage est de 70,03 kV et augmente jusqu'à 80,30 kV correspondant à la vitesse 5,09kV/s.

3.5 Influence de la forme et de la rampe de tension appliquée sur le champ de claquage

À partir des deux tableaux : III- 1 et III- 2, nous avons tracé les caractéristiques donnant l'influence de la forme et de la rampe de tension appliquée sur le champ de claquage (figure III- 14).

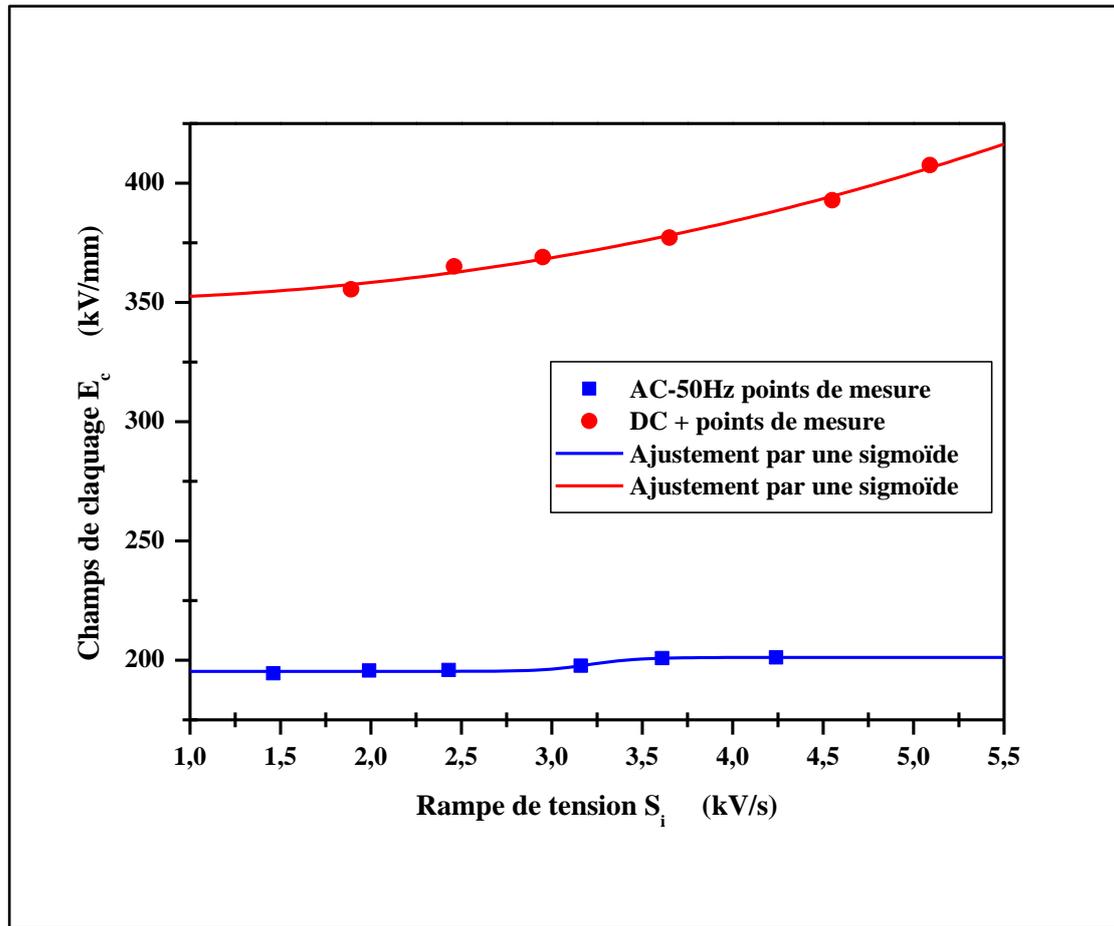


Figure III- 14 Champ de claquage en fonction des vitesses de la tension appliquée

Les graphes présentés dans la figure III- 14 ; montrent que les champs de claquage de notre matériau sous les deux formes de tensions : alternative 50 Hz et continue de polarité positive et, qui sont exprimés en kV/mm, augmente progressivement en fonction de la rampe de tension.

3.6 Discussion

Les deux caractéristiques données par les figures III-12 et III-13, n'ont pas la même allure. Mais l'ajustement des points de mesure peut se faire par la fonction sigmoïdale, dite aussi, courbe en S. Cette fonction s'écrit sous la forme suivante :

$$f(x) = d + \frac{a-d}{1+(\frac{x}{c})^b} \quad (\text{III.3})$$

Avec : a, b, c et d sont des constantes à déterminer expérimentalement.

On aura alors, pour les deux types de tension appliquée, les équations empiriques suivantes :

$$\text{AC-50Hz : } U_C = 39.62768 + \frac{38.5148-39.62768}{1+\left(\left(\frac{S_i}{10.07577}\right)^{12.96784}\right)^{1680044}} \quad (\text{III.4})$$

$$\text{DC+ : } U_C = 3289135 + \frac{66.67656-3289135}{1+\left(\frac{S_i}{49751.56}\right)^{1.351895}} \quad (\text{III.5})$$

Sous tension alternative sinusoïdale, nous constatons que la tension de claquage croît d'abord linéairement pour les faibles vitesses. Au-delà d'une vitesse de 2,43 kV/s, la tension de claquage, augmente et prend une forme exponentielle et ensuite comme on pourrait le prévoir, tend vers une certaine saturation à partir de la vitesse de 3,61 kV/s.

Sous tension continue de polarité positive, la caractéristique $U_c=f(S)$ est différente de celle en tension alternative sinusoïdale. Elle augmente d'une manière presque linéaire de 1,89 kV/s jusqu'à 5,09 kV/s.

On remarque aussi, que pour les deux formes de tension appliquée, la tension de claquage la plus élevée ; correspond à la vitesse de rampe la plus élevée. Ces tensions sont plus importantes dans le cas d'une tension continue de polarité positive. Alors, quelles sont moins importantes lors de l'application d'une tension alternative sinusoïdale.

Au cours du temps de conditionnement duquel s'opère l'accumulation de défauts et de charges provoquant la rupture, la vitesse de la rampe de tension appliquée à l'isolant joue un rôle important sur sa tension de claquage.

L'augmentation de la tension de claquage avec la vitesse de la rampe de tension appliquée peut être expliquée par le temps nécessaire à l'accumulation de défauts et/ou de charges conduisant à un claquage de l'isolant. Ce phénomène a été communiqué par Jonscher et Lacoste [49] et confirmé par Fanggao Cheng [50], qui a indiqué que la tension de claquage a tendance à être plus élevés pour les vitesses les plus élevés de la rampe. En effet, l'isolant est soumis à l'action cumulée du champ électrique et du temps [37,41,51]. On peut dire, en simplifiant, qu'il s'agit d'une illustration de l'action combinée du champ et du temps, c'est-à-dire de l'amplitude et de la durée de la contrainte. Donc, l'accroissement de la raideur de la rampe diminue en quelque sorte le délai laissé à l'incubation et augmente l'amplitude du champ de rupture du moins tant quand on n'atteint pas le claquage dit intrinsèque du matériau qui se produit d'une manière progressive [37,41,50,51].

Nous pouvons voir que, la tension de claquage sous rampe de tension continue est plus élevée que celles obtenues pour la rampe de tension alternative. Ces résultats sont en concordance avec ce qu'on trouve dans la littérature ; les travaux effectués sur les isolants solides ont montré que la tension de claquage sous rampe de tension continue est plus élevée que celle obtenue sous rampe de tension alternative [52,53]. Sans doute, le phénomène est attribué dans une certaine mesure à la dissipation d'énergie en raison de la fatigue causée par la contrainte alternée [54,55].

La tension de claquage sous rampe de tension alternative sinusoïdale, tend vers une certaine saturation. Cela correspond à des vitesses sensiblement plus élevées, probablement en raison du plus grand nombre de défauts dans le matériau ainsi que de leur nature. On peut penser que la tension de claquage est très liée à la structure du matériau et à un de ses défauts intrinsèques [37,41,51].

3.7 Variation du facteur de forme en fonction de la rampe de tension appliquée

À partir des deux tableaux : III- 1 et III- 2, nous avons tracé les caractéristiques donnant la variation du facteur de forme en fonction de la rampe de tension appliquée (figure III- 15).

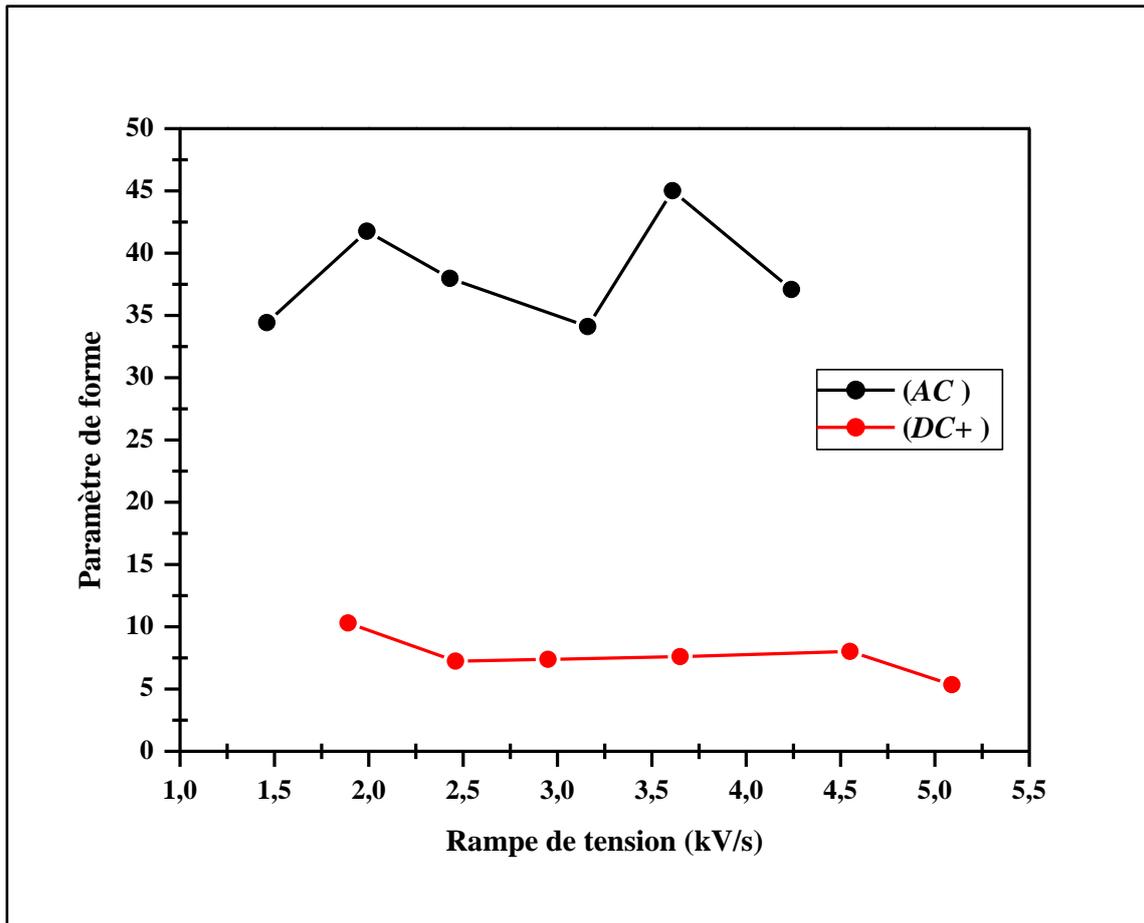


Figure III- 15 Paramètre de forme en fonction des vitesses de la tension appliquée

L'évolution du facteur de forme en fonction de la rampe de tension appliquée est présentée à la figure III- 15.

Chauvet a montré, au cours de son étude sur la rupture diélectrique à court terme du polyéthylène, que plus le facteur de forme est grand, moins la distribution est dispersée [56]. Il en résulte que la distribution est plus dispersée pour la vitesse de 5,09 kV/s sous tension continue de polarité positive et moins dispersée pour la vitesse de 1,99 kV/s sous tension alternative sinusoïdale.

Les résultats de claquage sont moins dispersés sous tension alternative sinusoïdale que sous tension continue de polarité positive.

4 Conclusion

Dans l'étude que nous avons menée dans ce chapitre, nous voulions connaître l'effet de la rampe et de la forme de la tension sur la tension de claquage des films en polyéthylène.

Nous avons montré à travers les résultats et l'analyse statistique et après étude technique du matériau PE que la vitesse de montée de la tension appliquée peut avoir un impact sur le champ de rupture diélectrique. Des tests à court terme ont été réalisés sur des échantillons à base de PE pour différentes valeurs de vitesse de montée (0,5 à 5,09 kV/s). Le changement typique prévu est une augmentation de la rigidité diélectrique en fonction de l'augmentation de la vitesse de montée. Effectivement, les essais réalisés dans le cas du matériau polyéthylène révèlent que la vitesse de montée affecte la rigidité diélectrique de matériau testé. Nous avons montré aussi que la rigidité diélectrique de ce matériau est plus importante dans le cas d'une application d'une tension continue que celle durant l'application d'une tension alternative.

La détermination des valeurs de la tension de claquage elle été analysées statistiquement en utilisant le modèle de Weibull à deux paramètres.

La valeur maximale de la rigidité diélectrique du matériau PE étudié est de 407,61 kV/mm, elle correspond à la valeur 5,09 kV/s qui est la vitesse maximale de la tension continue.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le but de cette étude, était de vérifier et d'étudier expérimentalement l'influence de la montée en tension et la forme de la tension appliquée sur la tension de claquage des films en polyéthylène utilisés dans l'isolation électrique.

Tout d'abord, l'analyse bibliographique (chapitre I et II) nous a permis de bien identifier et de définir le polyéthylène, sa structure, ses différents types, sa classification et propriétés, et en fin, ses avantages et ses inconvénients. Nous avons aussi défini les matériaux diélectriques, ses différentes caractéristiques, puis la rupture diélectrique des isolants solides et les différents mécanismes du phénomène de claquage ainsi que les facteurs d'influences sur les tests diélectriques.

Plusieurs paramètres de mesure peuvent fortement influencer les valeurs de la rigidité diélectrique, telles que l'épaisseur de l'isolant, la forme des électrodes, la température. Et la rampe de montée et de la forme de la tension appliquée

Par la suite, la partie expérimentale a été réalisée au sein du Laboratoire des Décharges Electrique au Bloc de Haute Tension de l'université de Bejaia. Nous l'avons dédié à l'étude expérimentale de l'effet de la rampe et de la forme de tension sur la tension de claquage des films en polyéthylène.

La mesure de la tension de claquage a été effectuée sous deux formes de tension alternative sinusoïdale et continue de polarité positive, et pour chaque forme de tension, plusieurs rampes de tensions ont été utilisées.

Néanmoins, la rupture diélectrique est un phénomène aléatoire, on a choisi le modèle de Weibull pour le traitement des résultats de rupture vu qu'il est le mieux et le plus utilisé dans le domaine de la rupture diélectrique des isolants solides. Par contre, la méthode du maximum de vraisemblance, s'impose vu qu'ils existent au sein de la même série de mesure de rupture, des valeurs qui se répètent. Pour tous les essais effectués sur la rupture diélectrique du matériau étudié, aucun point à faible probabilité ne sort à gauche de l'intervalle de confiance, donc la recherche d'un seuil de rupture n'est pas justifiée. La représentation à deux paramètres de Weibull s'est avéré la plus adéquate que celle à trois paramètres. Il en résulte que le seuil de rupture est nul durant ces essais.

Les résultats du test d'adéquation sont avérés favorables ; et le choix du test de Kolmogorov-Smirnov est justifié par le nombre moyen (≤ 25) d'éprouvettes des films en PE testés durant la même série de mesure.

La méthode des rangs médians est utilisée pour le traçage des diagrammes de Weibull, et pour l'estimation des différents paramètres de cette loi, la méthode de rapport de maximum de vraisemblance a été utilisée.

En perspectives, le travail présenté peut être enrichie dans le futur par des mesures de paramètres diélectriques en fonction de la température et en fonction de la fréquence par la spectroscopie d'impédance-mètre.

BIBLIOGRAPHIE

5 Bibliographie

- [1]. **A.Boubakeur, Y. Mecheri, M. Boumerzoug.** "Comportement diélectrique et mécanique du polyéthylène réticulé chimiquement soumis à un vieillissement thermique continu". s.l. : Annales de Chimie, Science des matériaux,, 2000. Vol. 25, pp. 457-470, .
- [2]. **Chadia, mme Ihemouchene née Benmerad.** "effet du traitement de surface sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques des composites polyethylene haute densite / farine de grignon d'olive". s.l. : magister en génie des procédés, 2008/2009.
- [3]. **guero, Gbeuili.** " Etude du vieillissement physique et chimique du polyéthylène ". s.l. : pour l'obtention de la maîtrise en génie mécanique., 08 septembre 2006.
- [4]. **ROBERT, P.** " Matériaux de l'électrotechnique ". s.l. : Edition Dunod, 1987. Volume II.
- [5]. **Simon, M. Sain.** " Analyse Spectrochimique ". s.l. : Encyclopédie Universalis,, 2011. Corpus 17, 25,.
- [6]. **A. Polard, C. Rivoire.,** " Fiabilité et statistiques prévisionnelles : la méthode de Weibull ". s.l. : Editions Eyrolles, 1971.
- [7]. **Boukezzi., L.** " Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension ". alger. : thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [8]. **A.Smedberg, B. Gustafsson, T. Hjertberg.,** " What is Crosslinked Polyethylene ". Toulouse France : IEEE, International Conference on Solid Dielectrics,, July 5-9 2004.. Vol.1, pp. 415-418.
- [9]. **R.Fournie.** " Les isolants en électrotechnique. Essais, mécanismes de dégradation, applications industrielles ". , Edition Eyroles, Paris, : , Edition Eyroles,, 1990.
- [10]. **A. Barlow.** " The chemistry of polyethylene insulation ". s.l. : IEEE, Electrical Insulation Magazine,, 1991. Vol. 7, N° 1, pp. 8-19,.
- [11]. **N. Demay, J.C. Bobo.,** "Câbles haute tension à isolation polyéthylène ou polyéthylène réticulé chimiquement ". s.l. : , R.G.E., Septembre 1976. Tome 85, N°9, pp. 731-736,.

- [12]. **E. Peschke, R. Von-Olshausen.** “ Cable Systems for high and Extra-high Voltage ”.
- [13]. **S, Fûzesséry .** " Polyéthylène basse densité ". s.l. : Techniques de l'ingénieur, A 3310,1-34...
- [14]. **H. Boureghda.** " Etude de l'influence de la mise en form sur la cristalisation et les propriétés physiques de polymères ". université de Batna : Mémoire de magister, 2006.
- [15]. **ELFATCHEM, société.** " Connaissance de polyéthylène ". s.l. : Documentation technique, 1995.
- [16]. " Le polyéthylène " en ligne Disponible sur : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Polyéthylènehautedensité>.
- [17]. **E. David, J.-L. Parpal, J.-P. Crine.** “ Influence of mechanical strain and stress on the electrical performance of XLPE cable insulation ”. Pittsburgh, PA USA, June : IEEE, Conference Record of the International Symposium on Electrical Insulation,. pp. 170-173,.
- [18]. **Fuzesserry, S.** " Polyéthylènes basse densité ". 1996.
- [19]. **M. Pays.** " Câbles de transport d'énergie – Technologies. Caractéristiques ". s.l. : Techniques del'ingénieur, rubrique Réseaux Electriques Mixtes - Ingénierie des Réseaux,, décembre 1994. - Ingénierie des Réseaux, D 4520,.
- [20]. **A. Bérroual.** “ Les diélectriques solides ”. france : support de cours pour étudiants en deuxième année du Master Recherche (M2R), option : Génie Electrique, Ecole Centrale de Lyon.
- [21]. **A Krzan, al.** " standarsation and certification in the area of environmentally degradation plastics polym degrade stab " vol91 2891. 2006.
- [22]. **Danouj, Boujemaa.** " caractirisation des signatures de décharges partielles en utilisant une nouvelle génération de coupleurs piézoélectriques ". québec : école de technologie supérieure, 14 septembre 2012.
- [23]. **Zerkak Mounir, Souami Islam.** " étude de la tenue diélectrique du matériau polyéthylène utilisé dans l'isolation électrique ". université de béjaia : Mémoire de Fin d'Étude,Département de Génie Électrique., 2017.

- [24]. **Hellal Farid, Oulagha Amazigh.** " Application de quelques méthodes statistiques pour la détermination de la rigidité diélectrique ". université de bejaia : mémoire de fin de cycle, Option : Réseaux Electriques., 2014.
- [25]. **Bodeux, R.** " Rôle des interfaces sur les propriétés diélectriques de condensateurs à base de CCTO déposé par PLD ". france : Thèse de doctorat, Université François- Rabelais., 2009. 168p..
- [26]. **MENGUY, C.** " Mesures des caractéristiques des isolants solides ". s.l. : Techniques de l'ingénieur,, 1997. D 2310,.
- [27]. **Mandinet, Parc d'Activités du.** - 19, rue des Campanules77185 -LOGNES - MARNE LA VALLEE.
- [28]. **Boggs, S. A.** " Partial discharge. III. Cavity-induced PD in solid dielectrics ". s.l. : Electrical Insulation Magazine, 1990. IEEE, vol. 6, no 6, p. 11-16..
- [29]. **Kemp, I. J.** " Partial discharges in solid insulation ". s.l. : In HV Technology (Digest No.1996/173), IEE Colloquium on Advances in. (4 Oct 1996),, 1996. p. 5/1-5/8..
- [30]. **Zeller, H. R.** " Breakdown and Prebreakdown Phenomena in Solid Dielectrics ". s.l. : IEEE Transaction on, 1987. vol. EI-22, n°2, p. 115-122.
- [31]. **M.C. Lessard, L. V. Niffterik, M. Massé, J. F. Penneau, R. Grob.** " Thermal aging study ofinsulating papers used in power transformers ". s.l. : IEEE Conference on Electrical Insulation andDielectric Phenomena, October 20-23, 1996. pp. 854-859,.
- [32]. **A. Anton.** " Matériaux isolants solides - Caractéristiques électriques ". s.l. : Techniques de l'Ingénieur, rubrique Matériaux à propriétés électriques et optiques,, août 2003. D2315,.
- [33]. **Fothergill, Dissado L.A. and J.C.** Electrical Degradation and Breakdown in polymers». s.l. : First éditionG.C.Stevens, U.K., Peter Peregrinus, Ltd., 1992. p 601..
- [34]. **Peregrinus, Peter.** " Electrical Degradation and Breakdown in polymers ". U.K : First éditionG.C.Stevens, 1992. Ltd. p 601.
- [35]. **Djamal, BELKACEMI.** " Etude des caractéristiques des matériaux isolants pour transformateurs ". Tizi-Ouzou : Université Mouloud Mammeri l'obtention du diplôme de Magiste, 2012.

- [36]. **Menguy, C.** " Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides ". s.l. : Techniques de l'Ingénieur, rubrique Matériaux isolants en électrotechnique, août 1997. D 2310.
- [37]. **A. Laifaoui, J.M. Reboul, M.S. Herzine and al.** " Breakdown strength measurements on cylindrical polyvinyl chloride sheaths under AC and DC voltages ". s.l. : Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2014. vol. 21, no 5, pp. 2267-2273.
- [38]. **K. Wu, Y. Wang, Y. Cheng, L.A. Dissado and X. Liu.** " Statistical behavior of electrical breakdown in insulating polymers ". s.l. : J. Appl. Phys, 2010. Vol. 107, 064107, pp. 064107-1-064107-6.
- [39]. **Enis Tuncer, D Randy James, Isidor Sauers, Alvin R Ellis and Marshall O Pace.** " On dielectric breakdown statistics ". s.l. : J. Phys. D: Appl. Phys, 2006. N°39, 2006, pp 4257–4268.
- [40]. **Fothergill, L.A. Dissado and J.C.** Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. London : IEE materials and devices series, 9. Editor: G.S. Stevens, Peter Peregrinus Ltd, 1992.
- [41]. **Laifaoui, A.** " Etude de la tenue diélectrique des gaines en polychlorure de vinyle sous tension alternative et continue ". Algérie : Thèse doctorat, Université de Bejaia, 2016.
- [42]. **Cohen, A.C.** " Maximum likelihood estimation in the Weibull distribution based on complete and on censored samples ". s.l. : Thechnometrics, 1965. Vol. 7, No. 4, pp. 579-588.
- [43]. **Lawless, J.F.** " Confidence interval estimation for the Weibull and extreme-value distribution ". s.l. : Thechnometrics, 1978. Vol. 20, No. 4, pp. 355-363.
- [44]. **P. Chapouille, R. de Paizzis.** " Fiabilité des systèmes ". s.l. : Édition Masson, 1965.
- [45]. **R. Lacoste, E. Loudghiri, J. Meric.** " Sur la notion du gradient de seuil dans le phénomène de rupture diélectrique des isolants solides soumis à des rampes de tension ". s.l. : REG, Octobre 1985. 10/85, pp. 769-775.

- [46]. **Simoni, L.** " Dielecttrici proprieta e comportamento nel tempo ". Bologna : Universitaria Editrice, 1974.
- [47]. **P. Chapouille, R. de Paizzis.** " Fiabilité des systèmes ". s.l. : édition Masson, 1965.
- [48]. **Simoni, L.** " Dielecttrici proprieta e comportamento nel tempo ". Bologna : Universitaria Editrice, 1974.
- [49]. **Lacoste, A.K. Jonscher and R.** " On a cumulative model of dielectric breakdown in solids ". s.l. : Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 1984. no 6, pp. 567-577.
- [50]. **Chang, F.** " Electrical properties of flexible polypropylene based cable insulation materials ". s.l. : J MATER SCI 41, 2006. pp. 2037–2043.
- [51]. **A. Laifaoui, J.M. Reboul, M. Aissou and al.** " Study of the dielectric failure of polyvinyl chloride sheaths under AC and DC high voltages ". Setif, Algeria : International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, ICEEAC, 2013. 24-26 No.
- [52]. **W. Li, J. Li, F. Zhou, S. Wang, H. Li, S. Li.** " The Effect of Frequency on the Breakdown of XLPE Cable Insulation with Artificial Defects ". s.l. : Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012 Annual Report Conference on. IEEE, 2012. pp. 375-3.
- [53]. **K. Katsutsa, A. Toya, S. Katakai, M. Kanoaka, Y. Sekkii.** " Influence of defects on insulating properties on XLPE cable ". s.l. : 3rd international conference on properties and applications of dielectric materials, july 8-12, 1991. pp. 485-489.
- [54]. **M. Nedjar, Y. Mecheri, A. Lamure, M. Aufray, C. Drouet.** " Effect of moisture on breakdown voltage of Polyesterimide used in electrical machines". s.l. : Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2010 Annual Report Conference on. IEEE, 2010. pp..
- [55]. **Crine, J.P.** " AC and DC electrical aging of polyethylene ". s.l. : Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 26 - 29 October 2008. pp. 60-62.
- [56]. **C. Chauvet.** " Mise au point d'une méthodologie pour les essais de rupture à court terme en vue de la caractérisation des isolants synthétiques ". Toulouse : Thèse de doctorat, 1992.